

بهینه‌سازی مصرف آب در سامانه هوای ورودی موتور توربین گاز به روش خنک‌کاری مه‌پاشی

سید جمال موسوی^۱، رضا آقائی طوق^{۲*}

چکیده

مقاله حاضر به بررسی بهینه‌سازی فرآیند خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور توربین گاز به روش مه‌پاشی می‌پردازد. مدل مطالعاتی در این کار، توربین گاز نوع GE - LM2500 بوده و نتایج حاصل نشان داد که موثرترین عوامل در خنک‌سازی هوا، دبی جرمی آب و دبی جرمی هوا می‌باشد. رابطه بین این پارامترها از طریق مدل‌های ریاضی رگرسیون خطی و مرتبه دوم با هدف به حداقل رساندن مصرف آب و به حداکثر رساندن سرعت خنک‌سازی تعریف گردید. فرآیند مه‌پاشی در مجرای ورودی موتور به صورت دو فازی و با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی مدل‌سازی شد. به منظور بهینه‌سازی، از الگوریتم ژنتیک چند هدفه (MOGA) و طراحی شبکه عصبی (CCD) استفاده شد. مجموعه‌ای از مدل‌های بهینه‌یافته به صورت عددی مورد ارزیابی قرار گرفت و پس از انتخاب سه مدل برتر، بهترین مدل معرفی گردید. نتایج نشان می‌دهد که در مدل بهینه‌یافته، مصرف آب ۴۶٫۵ درصد کاهش یافته و دمای هوای خروجی حدود ۱ درصد بیشتر کاهش پیدا کرده است. علاوه بر این، توان خروجی توربین نیز در محدوده‌ی پایدار و قابل قبول باقی مانده است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۱۰

کلمات کلیدی:

توربین گاز
هوای ورودی
مه‌پاشی
بهینه‌سازی
الگوریتم ژنتیک چند
موضوعی

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هوافضا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

mousavi_aero@yahoo.com

^۲ استادیار، گروه مهندسی هوافضا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران reza_tog@srbiau.ac.ir

* نویسنده مخاطب

۱ مقدمه

امروزه با پیشرفت روز افزون علم و تکنولوژی و رو به زوال رفتن منابع انرژی‌های فسیلی و تجدیدناپذیر، استفاده بهینه از انرژی جایگاه ویژه‌ای یافته است. توربین‌های گازی به‌عنوان تامین کننده انرژی نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند. همچنین، توربین‌های گاز نقش بسیار مهمی در تامین برق مورد نیاز کشورها بر عهده دارند. از آنجایی که توربین‌های گازی نقش مهمی در تولید برق و کاربردهای مختلف صنعتی ایفا می‌کنند، بهینه‌سازی و بهبود عملکرد، کارایی و قابلیت اطمینان آن‌ها ضروری است. از مشکلات اصلی این توربین‌ها، تغییرات زیاد تولید توان آن‌ها بر اثر تغییر شرایط جوی می‌باشد.

اما به‌طور واضح، شرایط محیطی برای موتورهای توربین گازی در اقلیم‌ها و شهرهای مختلف متفاوت است. هومجی و بهارگاو (۲۰۰۲) [۱] با مطالعه‌ی روند رو به افزایش ساخت نیروگاه‌های حرارتی در بازار تولید برق و نیاز به انعطاف‌پذیری بیشتر از نظر افزایش نیرو در دوره‌های تقاضای بالای برق (به‌ویژه فصول گرم سال)، نشان دادند که اپراتورهای نیروگاه در سراسر جهان به دنبال ابزاری برای افزایش توان توربین‌های گاز موجود و جدید هستند. روشی که به‌طور فزاینده‌ای نیز محبوب است، سیستم پاشش قطرات آب در داخل مجرای هوای ورودی به کمپرسور (شکل ۱) یا به عبارتی مه‌پاشی^۱ است. در این مطالعه یک تحلیل پارامتری جامع بر روی اثرات مه‌پاشی ورودی بر روی طیف وسیعی از توربین‌های گاز موجود ارائه شده است. روش مه‌پاشی در سال ۱۹۵۰ با ایده تزریق آب به داخل هوای ورودی کمپرسور که باعث کاهش دمای خروجی هوا از کمپرسور و متعاقب آن کاهش کار مصرفی کمپرسور توسط ویلکاکس و تروت (۲۰۱۳) [۲] پیشنهاد شد و از دهه ۱۹۸۰ تا کنون مورد استفاده قرار گرفته است.

دوست محمدی (۲۰۱۵) [۳] با بررسی توربین‌های گازی و شرایط محیطی موثر نشان داد که بهترین روش جهت افزایش راندمان نیروگاه‌ها در مناطق گرم و خشک، خنک کننده مه‌پاشی است. خنک‌سازی مه‌پاشی روشی است که در آن قطرات آب به ورودی کمپرسور تزریق می‌شود (شکل ۲). مصطفی و همکاران (۲۰۱۸) [۴] با مطالعه روش‌های خنک‌کاری نشان دادند که دمای محیط تأثیر قابل توجهی بر عملکرد توربین گاز دارد و یک پارامتر مهم است. این اثر در روزهای گرم سال نامطلوب بوده و منجر به کاهش توان خروجی و راندمان حرارتی می‌شود. چگالی هوا با افزایش دمای محیط کاهش می‌یابد و منجر به کاهش نرخ جریان جرمی هوای ورودی به کمپرسور می‌شود به‌طوری‌که، کار مصرفی کمپرسور افزایش یافته و کار خالص خروجی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای محیط، نرخ گرما و در نتیجه هزینه عملیاتی افزایش می‌یابد. از طرفی در زمان پیک مصرف شبکه برق و همزمان با ماه‌های گرم سال، توان تولیدی توربین‌های گازی تحت تأثیر افزایش دمای محیط، به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

ایکپه و همکاران (۲۰۲۰) [۶] با استفاده از داده‌های عملیاتی یک نیروگاه خاص نشان دادند که استفاده از سیستم مه‌پاش، از نظر مصرف سوخت، راندمان حرارتی نیروگاه، نیاز برق و انتشار گازهای گلخانه‌ای Nox عملکرد بهتری داشته و مقرون به‌صرفه است.



شکل ۱. سامانه ورودی هوای توربین گاز V94.2

به علاوه نشان دادند که کاهش دمای هوای ورودی به یک واحد توربین گاز، دبی جرمی و توان خروجی خالص آن را افزایش می دهد و همچنین، مصرف سوخت ویژه و نرخ گرما را کاهش می دهد. آگباده و کیانگا (۲۰۲۱) [۱۶] با بررسی عملکرد و مزایای اقتصادی استفاده از سیستم مه پاشی در ورودی توربین گاز صنعتی سنگین مدل F-9E با استفاده از نرم افزار عملکرد توربین گازی^۵ و در یک تحلیل فنی و اقتصادی نشان دادند که استفاده از سیستم مه پاشی دارای صرفه اقتصادی بسیاری است

اودیلا و ابیتو (۲۰۲۳) [۷] با بررسی های فنی روش های مختلف عملکرد توربین های گازی نشان دادند که خنک کاری از طریق هوای ورودی مرقون به صرفه ترین راه برای افزایش کارایی توربین گاز می باشد. هاشم سعید هاشم و همکاران (۲۰۲۳) [۸] نشان دادند که روش مه پاشی در سال های اخیر محبوب تر شده است. زیرا علاوه بر هزینه کمتر، توان خروجی را نیز افزایش می دهد. همچنین، بهینه سازی ساختار خنک کننده توربین های گازی اخیراً به عنوان راهی برای بهبود عملکرد سیستم خنک کننده محبوبیت پیدا کرده و مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. النصور و فوریه (۲۰۲۴) [۹] با مقایسه دو نمونه خنک کننده بدون مه پاش و با مه پاش در شرایط محیطی با دمای بسیار بالا نشان دادند که نمونه دارای مه پاش عملکرد و کارایی بالاتری دارد. همچنین، با افزایش نرخ جریان هوای ویژه، مصرف سوخت ویژه^۲ و مصرف گرمای ویژه در واحد توربین گاز نیز کاهش یافته است.

دهقانی محمد ابادی و همکاران (۱۳۹۶) [۱۲] تعداد نازل پاشش آب و قطر قطرات را در سامانه مه پاشی هوای ورودی و تاثیر آن بر دمای ورودی به کمپرسور با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت مورد مطالعه قرار دادند. آنان دریافتند که تعداد ۱۴۰ نازل (شکل ۲) عملکرد بهینه تری داشته و با افزایش تعداد نازل^۳ قطر قطرات به شدت زیاد شده و موجب کاهش میزان تبخیر قطرات آب شده و تاثیر منفی بر عملکرد کمپرسور خواهد داشت.



شکل ۲. چیدمان نازل ها در داخل مجرای هوای ورودی توربین گاز GE7-EA

کوفار و ژانگ (۲۰۲۰) [۱۴ و ۱۵] با بهره گیری از روش تحلیل عددی، با استفاده از نرم افزار انسیس CFX و مدل سازی مجرای هوای ورودی، جریان پاشش نازل ها (شکل ۳) در سامانه مه پاش در امتداد کانال مجرای ورودی هوای توربین گازی Alstom GT13E2 را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج به دست آمده نشان داد که مه پاشی اثرات قابل توجهی بر سرعت جریان جرمی به دلیل انتقال گرمای تبخیر ناشی از هوا به قطرات آب در مجرای ورودی داشته و تأثیر زیادی بر عملکرد کمپرسور و توربین دارد.



شکل ۳. تست نحوه پاشش آب توسط نازل‌ها قبل از نصب

ایشان علاوه بر کار عددی، با استفاده از داده‌های تجربی تونل باد و شبیه سازی جریان دو فازی با روش اویلری لاگرانژی و مدل آشفته k-epsilon نشان دادند که پاشش مه‌پاش به دلیل انتقال گرمای تبخیر ناشی از هوا به قطرات آب در مجرای ورودی، اثرات قابل توجهی بر سرعت جریان جرمی دارد که تأثیر زیادی بر عملکرد کمپرسور و توان خروجی توربین دارد.

حوزه‌ی کار حاضر، بهبود عملکرد یک توربین گازی از طریق بهبود خنک کاری سیستم هوای ورودی به کمپرسور می‌باشد. یکی از راه‌های برون‌رفت از این مشکل سرد کردن هوای ورودی به کمپرسور توربین گاز است. لذا اتخاذ روش‌های بهینه جهت سرمایش هوای ورودی کمپرسور این موتورها و بازیابی توان از دست رفته آن‌ها ضروری می‌باشد. سامانه‌های خنک کننده هوای ورودی کمپرسور از فناوری‌های خنک کننده مختلفی مانند تبرید جذبی یا فشرده‌سازی بخار برای خنک کردن هوای ورودی استفاده می‌کنند.

از طرفی قرار گرفتن کشور ایران در اقلیم آب و هوایی گرم و روند رو به افزایش گرما و بحران آب در کشور نیاز به تولید بیشتر برق صنایع و خانگی و کاهش چشمگیر توان تولیدی نیروگاه‌ها، نیاز به استفاده از روشی که راندمان تولید برق را افزایش دهد به شدت احساس می‌شود، لذا نویسندگان را بر آن داشت که به تحقیق حاضر بپردازند.

در این شبیه سازی و بهینه سازی تلاش بر این بوده است که جریان سیال در هندسه ورودی یک توربین گازی شبیه سازی شده و میزان مصرف آب برای خنک کاری به کمترین میزان خود برسد و همچنین دما در ورودی توربین نیز در کمترین مقدار خود باشد از این رو با استفاده از روش طراحی آزمایش مسئله بهینه سازی تعریف شده و با کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین و الگوریتم ژنتیک بهینه سازی انجام گرفته است و نقاط عملکردی مناسب استخراج شده است. نتایج حاصل نشان داد که در مدل بهینه، مصرف آب ۴۶/۵ درصد کاهش داشته و نیز، حدود ۱ درصد دمای خروجی هوا بیشتر کاهش یافت.

۲. روابط حاکم و روش حل مسئله

حیاتی و علی‌گودرز (۱۳۹۵) [۱۰] برای محاسبه‌ی کار آیزن‌تروپیک کمپرسور، قوانین اول و دوم ترمودینامیک قبل و بعد از کمپرسور را مطابق زیر بیان نمودند:

$$\dot{w}_c = \dot{m}_{air} (h_2 - h_1) \quad (۱)$$

$$\dot{Q}_{in} = (\dot{m}_{air} + \dot{m}_{gas}) h_3 - \dot{m}_{air} h_2 \quad (۲)$$

$$\dot{w}_t = (\dot{m}_{air} + \dot{m}_{gas}) (h_3 - h_4) \quad (۳)$$

ایشان روابط انتقال حرارت برای سیستم مه‌پاشی به عنوان حجم کنترل بیان کننده بالانس انتقال حرارت و جرم بین آب و هوا بدون تلفات را مطابق زیر بیان نمودند:

$$\dot{Q}_{water} - \dot{Q}_{air} = 0 \quad (۴)$$

$$\dot{Q}_{air} - \dot{Q}_{humid} = 0 \quad (۵)$$

$$\dot{m}_{\text{Evap.}} + \dot{m}_{\text{air}} (\dot{\omega}_{\text{out}} + \dot{\omega}_{\text{in}}) = 0 \quad (۶)$$

فرزانه‌گرد و دیمی (۱۳۸۸) [۱۱] شرایط استاندارد محیطی و ترمودینامیکی مهمترین عامل موثر بر راندمان توربین‌های گازی را به شکل زیر بیان کردند:

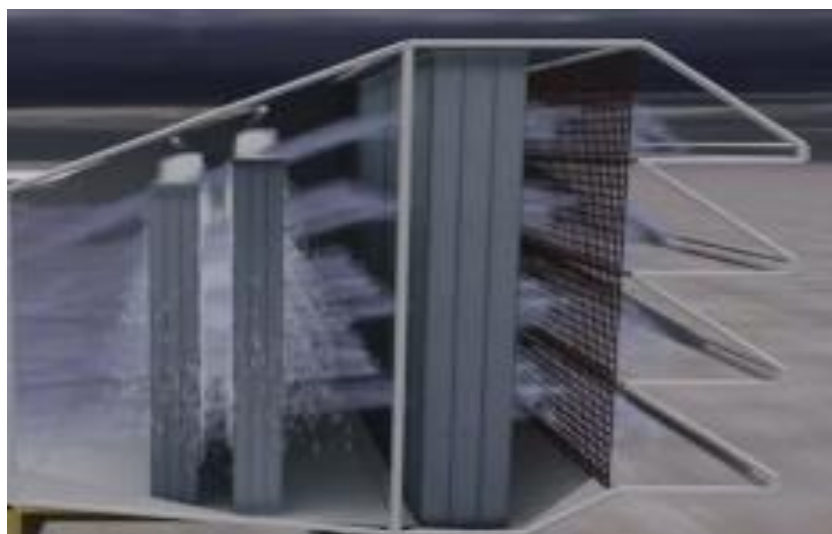
۱- دمای خشک ۱۵°C

۲- دمای تر $۷/۲^{\circ}\text{C}$

۳- رطوبت نسبی ۶۰٪

۴- فشار محیط ۱ اتمسفر

۵- عدم افت فشار در قسمتهای ایزوبار (هم‌فشار)



شکل ۴. شماتیک مه‌پاشی^{۲۴}

قطرات آب به دلیل دمای بالا به سرعت تبخیر می‌شوند و گرما را از هوای اطراف یا گازهای حاصل از احتراق جذب می‌کنند. این اثر خنک کننده تبخیری به کاهش دمای هوای ورودی به توربین کمک می‌کند.

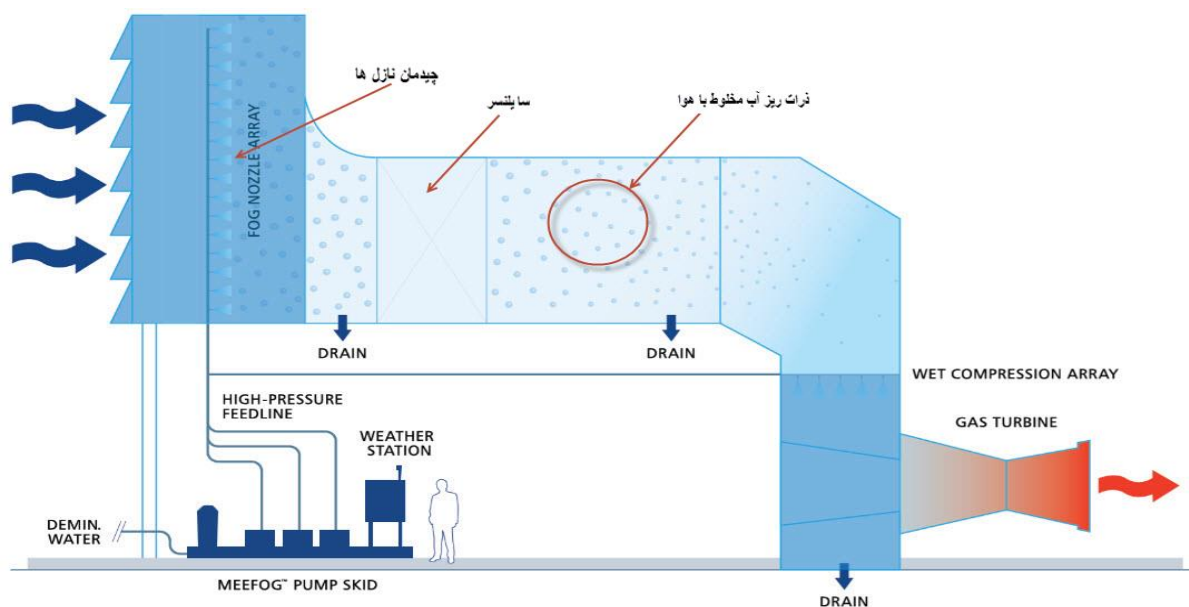
در مدل فاز گسسته، فاز اصلی به صورت گاز یا هوا بوده و فازهای دیگر به صورت مایع یا ذرات و قطرات پراکنده می‌باشند و با دیدگاه اویلری - لاگرانژی شبیه سازی میشوند که فاز پیوسته با حل معادلات ناویر استوکس شبیه سازی میشوند و با ردیابی مسیر حرکت تعداد زیادی از ذرات یا حبابها یا قطرات در داخل میدان جریان حل میشوند. در این روش فاز ثانویه یا قطرات آب باید دارای کسر حجمی کم و کمتر از ۱۰ درصد از حجم سیال را داشته باشند ولی محدودیتی در دبی جرمی آن وجود ندارد. فازهای گسسته می‌تواند شامل ذرات یا قطرات یا مواد محترقه و یا ترکیبی از چند مولفه باشد.

برای قطرات آب از مدل فاز گسسته (DPM) استفاده شده که حرکت قطرات را در چارچوب لاگرانژی مدل می‌کند. این مدل اثرات تبخیر، انتقال حرارت و جرم بین هوا و قطرات را در نظر می‌گیرد. این معادلات با نرم‌افزار ANSYS Fluent و روش حلگر فشارمحور (pressure-based) همراه با الگوریتم SIMPLE حل شده‌اند تا نتایج دقیقی از رفتار جریان و خنک‌کاری به دست آید.

یکی از بهترین و کاربردی‌ترین روش‌ها برای جبران اثرات منفی افزایش دما، پاشش مه (ذرات بسیار ریز آب) در مجرای هوای ورودی توربین گاز است. این ذرات تبخیر شده و با دریافت گرمای لازم از جریان هوا طی فرایند سرمایش تبخیری، موجب کاهش دمای جریان هوای ورودی به توربین گاز می‌شوند.

استفاده از خنک‌کننده مه‌پاشی (شکل ۵) در توربین‌های گاز مزایای متعددی دارد. اولاً، با افزایش نرخ جریان جرمی هوا از طریق کمپرسور، توان خروجی توربین گاز را افزایش می‌دهد. هوای خنک‌تر متراکم‌تر است و در نتیجه تولید برق بیشتر می‌شود. ثانیاً، خنک‌سازی

مه‌پاشی با کاهش مصرف سوخت خاص، کارایی کلی توربین گاز را بهبود می‌بخشد. دمای ورودی پایین‌تر باعث راندمان احتراق بهتر می‌شود و نیاز به سوخت اضافی را کاهش می‌دهد. خنک‌کننده مه‌پاشی نیز مزایایی را از نظر کاهش آلاینده‌ها فراهم می‌کند. دمای پایین‌تر احتراق ناشی از سیستم خنک‌کننده به کاهش تشکیل اکسیدهای نیتروژن^۴ که آلاینده‌های مضر هستند، کمک می‌کند. علاوه بر این، خنک‌کننده مه‌پاشی می‌تواند به کاهش تاثیر نقاط داغ و تنش‌های حرارتی روی پره‌های توربین کمک کند و احتمال خرابی‌های مکانیکی را کاهش دهد.



شکل ۵. شماتیک (طرح‌واره) سیستم فاگ^{۲۴}

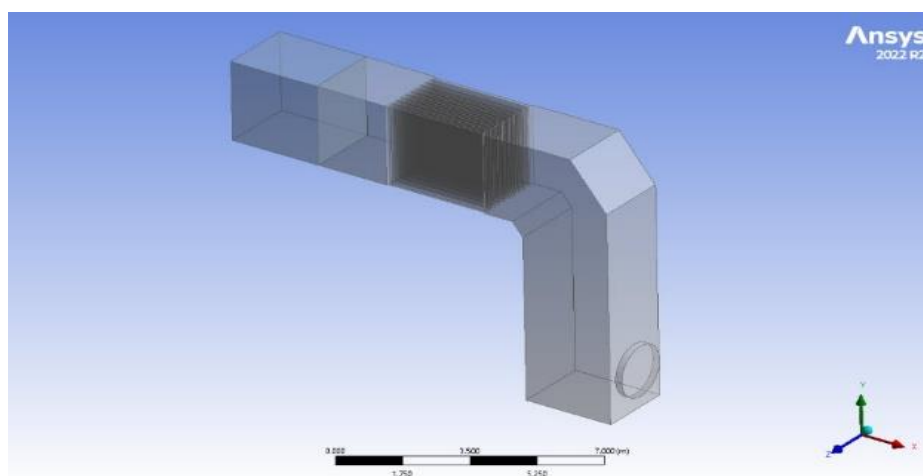
۳. هندسه مورد مطالعه و تولید شبکه

خالد نعیم و همکاران (۲۰۲۲) [۱۸] با استفاده از مدل فاز گسسته^۶ و مدل اغتشاش $k-\omega$ تاثیرات پارامترهای طول مجرای ورودی، تعداد نازل، قطر قطرات یکنواخت و زاویه نازل بر دمای هوای ورودی کمپرسور و رطوبت نسبی^۷ را در روش مه‌پاشی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. باراکات و وانگ (۲۰۲۳) [۱۹] با روش فاز گسسته DPM و مدل توربولانسی کا-اِپسیلون^۸ و شبکه‌بندی در انسیس مشینگ و حلگر عددی فشار محور^۹ و الگوریتم SIMPLE نشان دادند که خنک کاری از طریق سیستم مه‌پاشی تاثیر زیادی بر افزایش توان خروجی توربین دارد. البدوی و فرخی (۲۰۲۱) [۲۰] با مطالعه‌ی بهبود عملکرد موتور توربین گازی در شرایط آب و هوایی گرم که باعث کاهش قابل توجه توان خروجی و افزایش مصرف سوخت ویژه می‌شود، بر روی موتور توربین گاز مدل LM6000 جنرال الکتریک با توان خروجی 43 MW نشان دادند که افزایش توان خالص خروجی^{۱۰} و بهبود مصرف سوخت ویژه از مزایای خنک کاری هوای ورودی به کمپرسور می‌باشد.

در پژوهش حاضر مدل طراحی شده توسط نرم افزار دیزاین مدلر^{۱۱} مدل‌سازی شده است (شکل ۶). در مرحله اول با استناد به مراجع انتخاب شده، هندسه داکت ورودی توربین گاز نوع LM2500 شرکت جنرال الکتریک با توان خروجی 21-37 MW برای انجام بهینه‌سازی انتخاب شده است. هندسه مدنظر با استفاده از نقشه‌های ترانس گذاری شده با نرم افزار دیزاین مدلر تولید شده و شبکه محاسباتی ایجاد شده است. در گام اول برای اعتبار سنجی مقاله‌ی پایه [۱۲] و رسیدن به جواب مستقل از شبکه و مدلی قابل استناد برای بهینه‌سازی پس از چندین شبیه‌سازی با پایش تغییرات دما در محفظه و خروجی داکت و اعمال تغییرات مورد نیاز به شبکه محاسباتی و مدل مناسب بدست آمد.

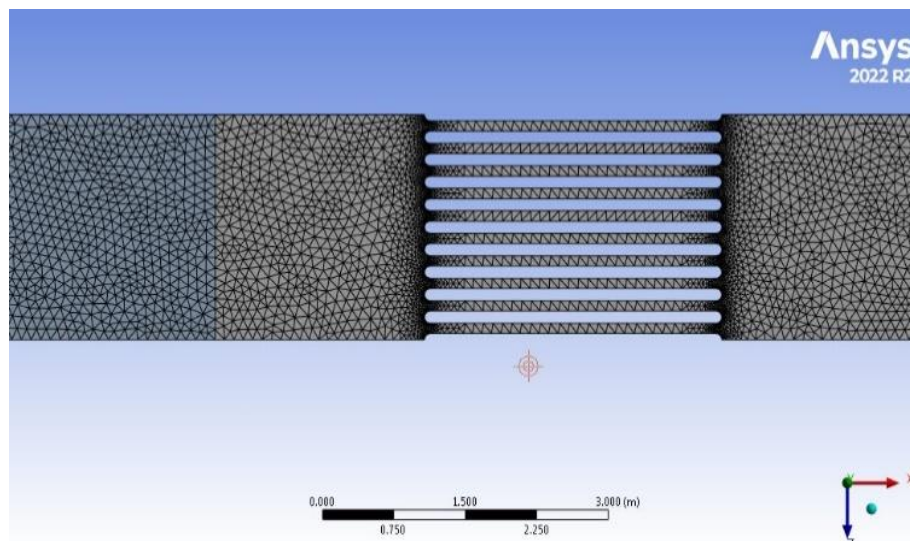
شبکه محاسباتی مورد استفاده در این پروژه بصورت یک شبکه نامنظم دارای ۵ لایه مرزی منظم برای لایه مرزی با استفاده از نرم افزار انسیس مشینگ تولید شده است و بررسی استقلال از شبکه انجام گرفته تا شبکه‌ای با کیفیت برای جلوگیری از تولید داده‌های دارای خطای

عددی، تولید شود. ملاک انتخاب ارتفاع لایه مرزی بر حساب مقدار y^+ کمتر مساوی یک بوده و اطمینان حاصل شده است که لایه مرزی حرارتی و سیال (با استفاده از معیار پرنتل) به درستی تصویر شده باشد. در تحقیق پیش رو جهت تولید شبکه از روش «شبکه بی‌سازمان سه بعدی چهار وجهی سازگار»^{۱۲} استفاده شده و تعداد سلول‌های شبکه حدود 2,500,000 سلول در نظر گرفته شده است (ردیف ۳ جدول ۱). برای اطمینان از صحت و عدم وابستگی جوابهای بدست آمده از حل عددی مسأله به ابعاد سلولهای محاسباتی، از چهار شبکه با تعداد سلولهای متفاوت استفاده گردید. فرآیند استقلال از شبکه در این پژوهش بدین صورت است که ابتدا از یک شبکه خیلی درشت شروع نموده و به مرور اندازه سلول‌ها ریزتر و کوچکتر گردید (شکل‌های ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰) و تاثیر تغییرات شبکه در جواب‌ها ثبت و مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی جریان سیال (هوا و قطرات آب) در مجرای ورودی ورودی توربین گاز با روش مه‌پاشی، از معادلات ناویر-استوکس استفاده شده که رفتار جریان را توصیف می‌کنند. این معادلات با مدل توربولانسی k-omega SST ترکیب شده‌اند تا دقت شبیه‌سازی افزایش یابد. این متد توانایی بسیار خوبی در کاهش تعداد ران‌های شبیه‌سازی و دقت بالا در بهینه‌سازی چند هدفه را دارد.

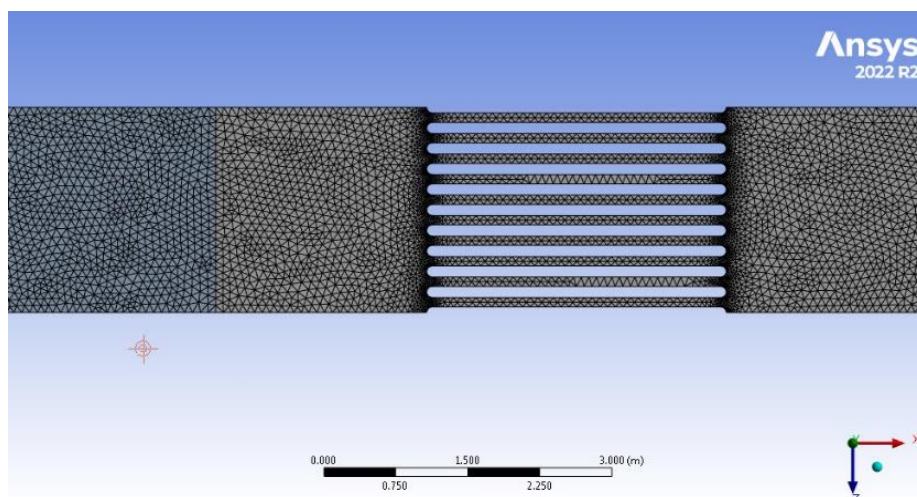


شکل ۶. مدل هندسی مجرای ورودی توربین گاز نوع LM2500

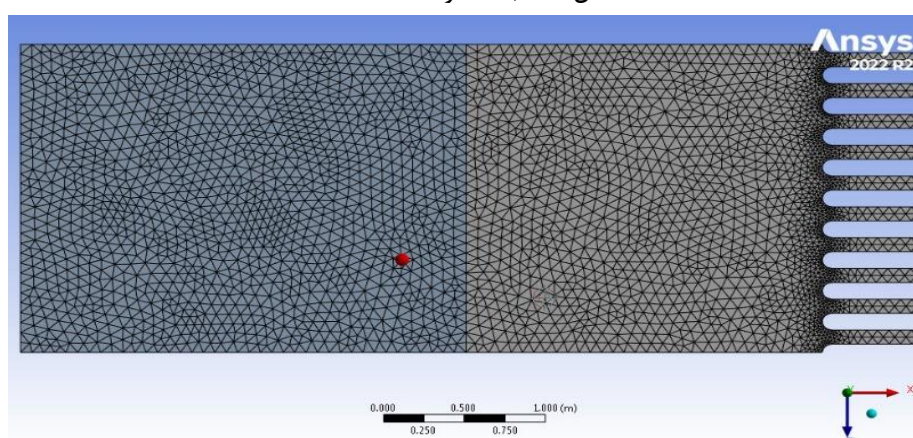
در عکس‌های زیر نیز می‌توان شبکه‌های بدست آمده را مشاهده نمود.



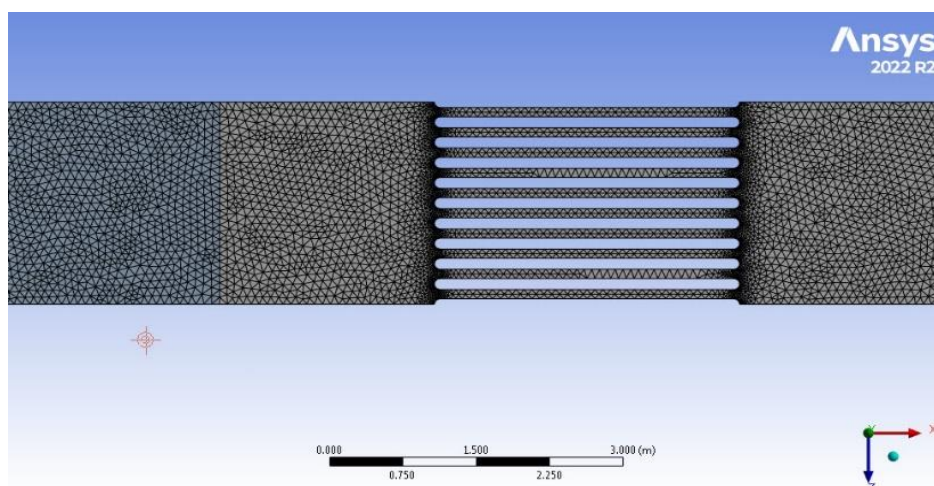
شکل ۷. شبکه درشت



شکل ۸. شبکه متوسط



شکل ۹. شبکه ریز

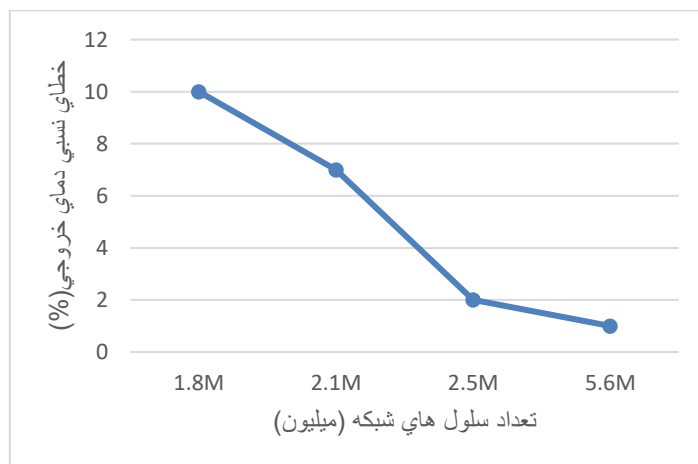


شکل ۱۰. شبکه خیلی ریز

جدول در صد میزان خطای شبکه محاسباتی و تعداد سلول ها و شبکه انتخابی و نمودار استقلال از شبکه نیز در زیر نشان داده شده است (جدول ۱).

جدول ۱. درصد میزان خطای شبکه محاسباتی

ردیف	شبکه محاسباتی	تعداد سلول	میزان خطا
۱	درشت	۱۸۷۷۸۲۸	۱۰٪
۲	متوسط	۲۱۸۳۵۸۰	۷٪
۳	ریز	۲۴۹۲۰۷۴	۲٪
۴	خیلی ریز	۵۶۵۸۷۱۷	۱٪



شکل ۱۱- نمودار بررسی استقلال از شبکه نسبت به پارامتر دمای خروجی

۴. الگوریتم ژنتیک

برای بهینه‌سازی مصرف آب و دمای خروجی در فرآیند خنک‌کاری مه‌پاشی، از الگوریتم ژنتیک چند هدفه (MOGA) و طراحی شبکه عصبی مکعب مرکزی (CCD) استفاده شده است. این روش با الهام از تکامل زیستی، برای مسائل پیچیده و غیرخطی مناسب است. پارامترهای اصلی الگوریتم ژنتیک عبارتند از:

اندازه جمعیت (Population): انتخاب راه‌حل‌های مناسب برای کاوش گسترده در گزینه‌های ممکن.

تولید نسل (Generation): تولید جمعیت جدید با استفاده از عملگرهای انتخاب.

نرخ تقاطع (Crossover Probability): ترکیب ویژگی‌های خوب راه‌حل‌ها و ایجاد جواب‌های جدید.

نرخ جهش (Mutation Probability): برای افزودن تغییرات تصادفی و جلوگیری از توقف در جواب‌های غیربهینه.

مراحل انجام شبیه‌سازی در این پژوهش به شرح زیر است:

ایجاد راه‌حل‌های تصادفی با پارامترهای ورودی شامل دبی آب، سرعت آب، دمای آب، دبی هوا

(Estimated number of Evaluation): عملکرد هر راه‌حل، با استفاده از شبیه‌سازی در نرم افزار انسیس فلوئنت

و مدل‌سازی سطح پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفت که در مجموع ۱۹۲۰۰ حالت بررسی شد.

(number of Iterations samples): انتخاب بهترین راه‌حل‌ها با استفاده از روش تصادفی و بر اساس معیار بهترین

عملکرد انجام شده که منجر به تولید ۴۰۰۰ حالت گردید.

(number of samples per Iteration): ترکیب راه‌حل‌ها برای تولید پاسخ‌های جدید و تعداد ۸۰۰ نمونه برای تکرار

آزمایش انتخاب گردید.

(Max. number of Iteration): مراحل یاد شده تا دستیابی به همگرایی کامل، به صورت ۲۰ تکرار برای هر آزمایش ادامه یافت.

انتخاب بهترین راه حل بر اساس کمینه سازی پارامترهای دبی جرمی آب و دمای خروجی انجام شد.

دلایل انتخاب الگوریتم ژنتیک در این پژوهش به شرح زیر ارائه شده است:

مناسب برای چند هدف: ایجاد تعادل بین پارامترهای مختلف مانند کاهش مصرف آب و دمای خروجی در این مطالعه

مدیریت پیچیدگی: مناسب برای مسائل غیرخطی مانند جریان دوفازی مه پاشی

انعطاف پذیری: کارایی بالا در مدیریت و پردازش تعداد متغیرهای زیاد (مانند دبی، سرعت و دما)

برتری بر روش های تکاملی دیگر و عملکرد بهتر برای مسائل چند هدفه

سازگاری با طراحی آزمایش (DOE): ترکیب با RSM و CCD و کاهش تعداد شبیه سازی ها

۵. روش شبیه سازی عددی و شرایط مرزی

در این تحقیق روش استفاده شده برای طراحی آزمایش مورد استفاده برای بهینه سازی از روش الگوریتم ژنتیک چند موضوعی^{۱۳} و شبکه عصبی نوع طراحی مکعب مرکزی^{۱۴} استفاده شده است. این متد توانایی بالایی در طراحی آزمایش با کمترین تعداد ران مورد نیاز و دقت داده های مناسب برای تولید نمودار سطح پاسخ RSM را دارا است. این روش با استفاده از یک ماتریس کوادروتیک نقاط طراحی را تولید می کند و سپس توسط نرم افزار فلوئنت شبیه سازی انجام گرفته و نقاط بدست آمده توسط الگوریتم یادگیری ماشین برای تولید کانتورهای سطح پاسخ مورد استفاده قرار می گیرد. در این شبیه سازی شرایط مرزی ثابت و بازه مجاز مربوط به تغییرات پارامترها به شرح جدول زیر است (جدول ۲ و ۳).

جدول ۲. پارامترها و مقادیر تنظیم شده برای شرط مرزی ورودی

متغیر	واحد	مقدار/نوع
نوع شرط مرزی	-	دبی جرمی
مقدار دبی جرمی هوا	Kg/s	[۱۰ - ۴۵]
مقدار دبی جرمی آب	Kg/s	[۰ - ۱۴]
جهت جریان	-	عمود بر شرط مرزی
شدت توربولانس	%	۵
دمای هوا	K	۳۰۰
دمای آب	K	[۲۷۵ - ۲۹۰]
سرعت اسپری آب	m/s	[۰ - ۲۰]

جدول ۳. پارامترها و مقادیر تنظیم شده برای شرط مرزی خروجی

متغیر	واحد	مقدار/نوع
نوع شرط مرزی	-	فشار خروجی
فشار سکون	Pa	۱۰۱۳۲۵
جهت جریان	-	عمود بر شرط مرزی
شدت توربولانس	%	۵
دمای کل	K	۳۲۳

۶. تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این شبیه سازی و بهینه سازی تلاش بر این بوده است که جریان سیال در هندسه ورودی یک توربین گازی شبیه سازی شده و میزان مصرف آب برای خنک کاری به کمترین میزان خود برسد؛ همچنین، دما در ورودی توربین نیز در کمترین مقدار خود باشد. از این رو با استفاده از روش نرم افزار طراحی آزمایشات^{۱۵} مسئله بهینه سازی تعریف شده و با کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین و الگوریتم ژنتیک بهینه سازی انجام گرفته است و نقاط عملکردی مناسب استخراج شده است. جدول نتایج را برای هر نقطه طراحی ارائه می کند و نرخ جریان آب مصرفی پارامتر ورودی در محور سمت راست نمایش داده می شود. این پارامتر میزان مصرف آب در سیستم را نشان می دهد. در سمت چپ، محور عمودی نتایج دمای خروجی را نشان می دهد که دمای سیستم را در مکان‌ها یا مناطق خاص مورد نظر نشان می دهد. محور افقی با نقاط طراحی مطابقت دارد و امکان مقایسه و تجزیه و تحلیل آسان پیکربندی‌های مختلف را فراهم می کند.

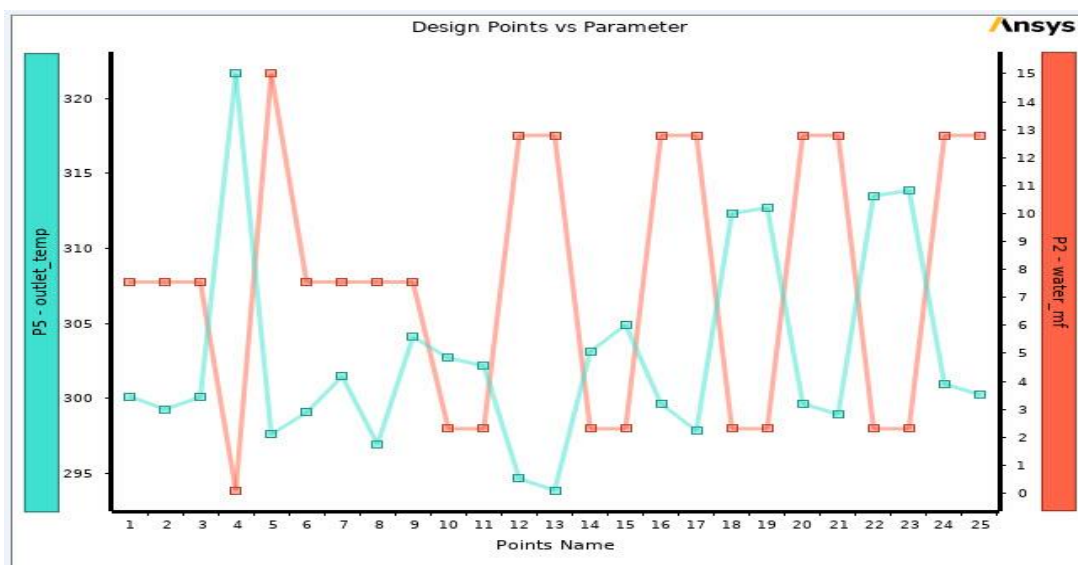
با تجزیه و تحلیل نتایج، می توان تأثیر پارامتر ورودی، یعنی نرخ جریان آب مصرفی، بر دمای خروجی را مشاهده کرد. با بررسی داده‌ها می توان الگوها و روندها را شناسایی کرد و اطلاعات ارزشمندی را برای بهینه سازی طراحی ارائه کرد. به عنوان مثال، ممکن است آشکار شود که نرخ‌های جریان خاص منجر به توزیع دمای مطلوب تر می شوند یا نقاط طراحی خاص عملکرد حرارتی بهتری را نشان می دهند. با مطالعه رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی، مهندسان و طراحان می توانند تصمیمات آگاهانه‌ای در مورد پارامترهای طراحی بگیرند. این فرآیند تکراری امکان اصلاح و بهبود را فراهم می کند و منجر به یک سیستم بهینه شده که معیارهای عملکرد مورد نظر را برآورده می کند.

داده‌های ورودی شامل سرعت آب و دبی آب و دمای آب و دبی هوا بوده و پارامتر خروجی، دمای خروجی از داکت می باشد (جدول ۴).

جدول ۴. پارامترهای ورودی و خروجی

ورودی	پارامترها	
P1	water_V	سرعت آب
P2	water_mf	دبی جرمی آب
P3	water_temp	دمای آب
P4	air_mf	دبی جرمی هوا
خروجی		
P5	outlet_temp	دمای خروجی

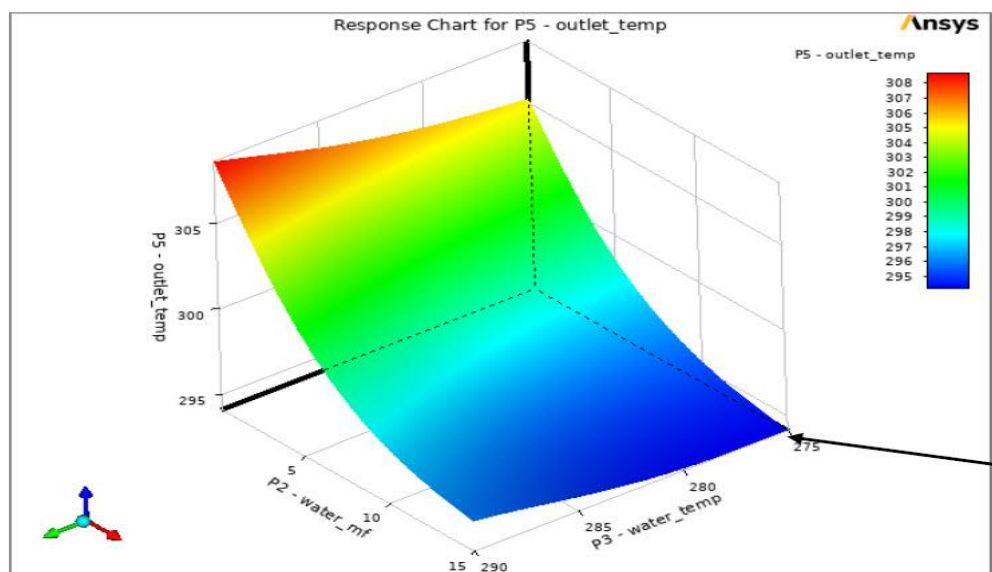
نمودار زیر تغییرات رفتار دبی آب ورودی را نسبت به دمای خروجی کانال در هر ۲۵ نقطه طراحی نشان می‌دهد (شکل ۱۱). این نمودار اکسترمم‌های نقاط طراحی را در طول فرآیند پاشش نشان می‌دهد. این استراتژی آزمایشگر را قادر می‌سازد تا اثرات هر یک از پارامترها را به طور مستقل نسبت به پارامتر خروجی ارزیابی نموده و جهت بهینه‌سازی شرایط مطلوب را مدل نماید.



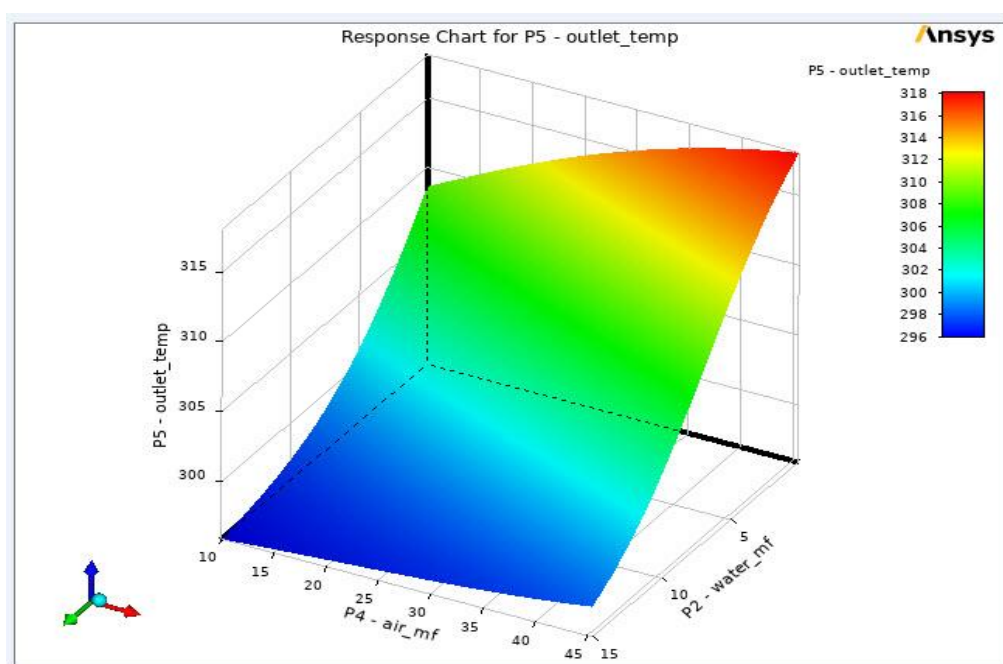
شکل ۱۱. نمودار ارتباط نقاط طراحی با پارامترهای دبی آب و دمای خروجی

پس از استخراج داده‌های تجربی با استفاده از روش تجمع ژنتیکی، مدل‌های سطح پاسخ^{۱۶} برای تحلیل و درک رابطه بین متغیرهای ورودی مختلف و دمای خروجی مجرا تولید گردید. مدل سطح پاسخ یک تکنیک مدل سازی آماری است که به ایجاد مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی متغیر پاسخ بر اساس متغیرهای ورودی اجازه می‌دهد. در این تحلیل از سطح پاسخ^{۱۷} نوع شبکه عصبی^{۱۸} استفاده شده است.

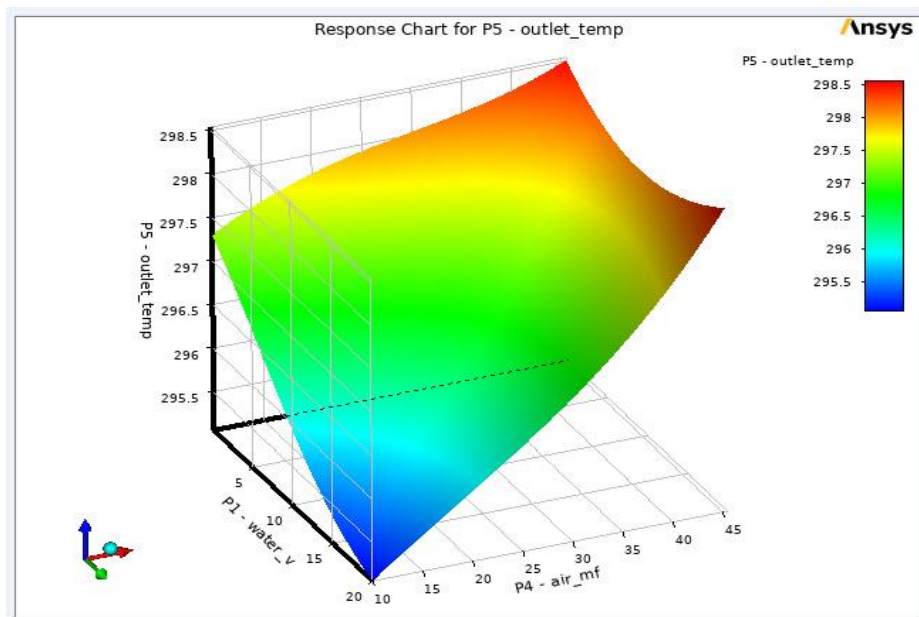
در نمودارهای سه بعدی سطح پاسخ (شکل ۱۲ و ۱۳)، پارامترهای دبی و دما و سرعت آب و دبی هوا نسبت به پارامتر دمای خروجی، نشان داده شده‌اند. نقطه بهینه^{۱۹} طراحی نیز با علامت فلش در نمودار زیر نشان داده شده است. در متدولوژی نمودارهای سه بعدی سطح پاسخ، ترکیب سه متغیر، یک روند را نشان می‌دهند که با استفاده از آن می‌توان تغییرات پارامتر خروجی را نسبت به پارامترهای ورودی بصورت پیوسته مشاهده نمود. نقاط بدست آمده از طراحی آزمایش در این نمودارها با هدف بهینه سازی و رسیدن به کمترین دمای خروجی مشاهده می‌شود که در کمترین دمای آب ورودی و بیشترین دبی آب ورودی، دمای خروجی به حداقل می‌رسد.



شکل ۱۲. نمودار سه‌بعدی سطح پاسخ دبی و دمای آب نسبت به دمای خروجی

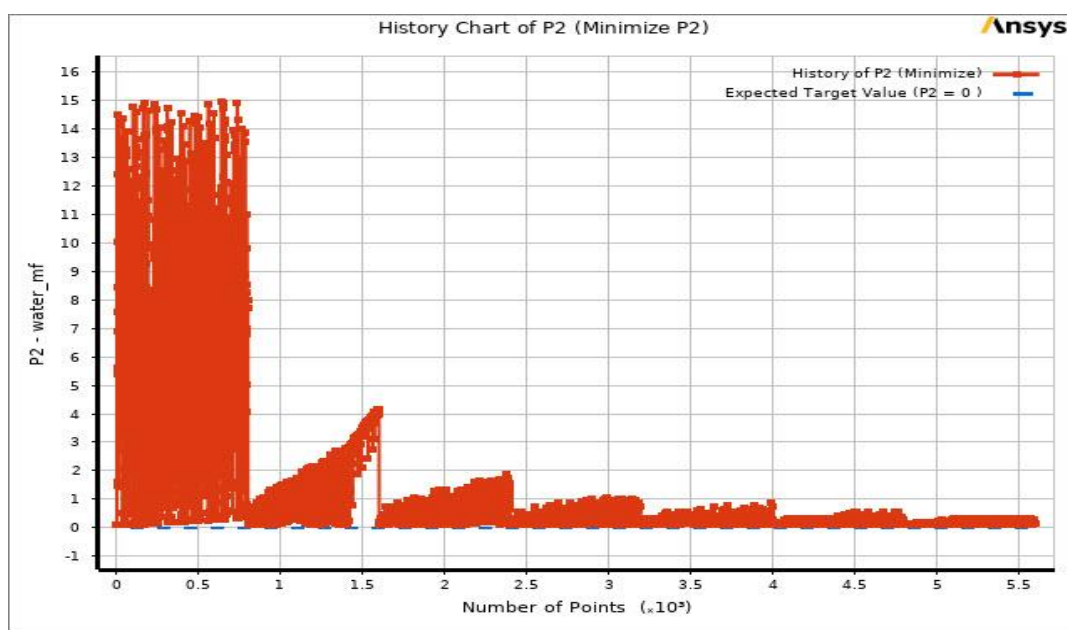


شکل ۱۳. سه بعدی سطح پاسخ دبی آب و دبی هوا نسبت به دمای خروجی



شکل ۱۴. سه بعدی سطح پاسخ سرعت آب و دبی هوانسبت به دمای خروجی

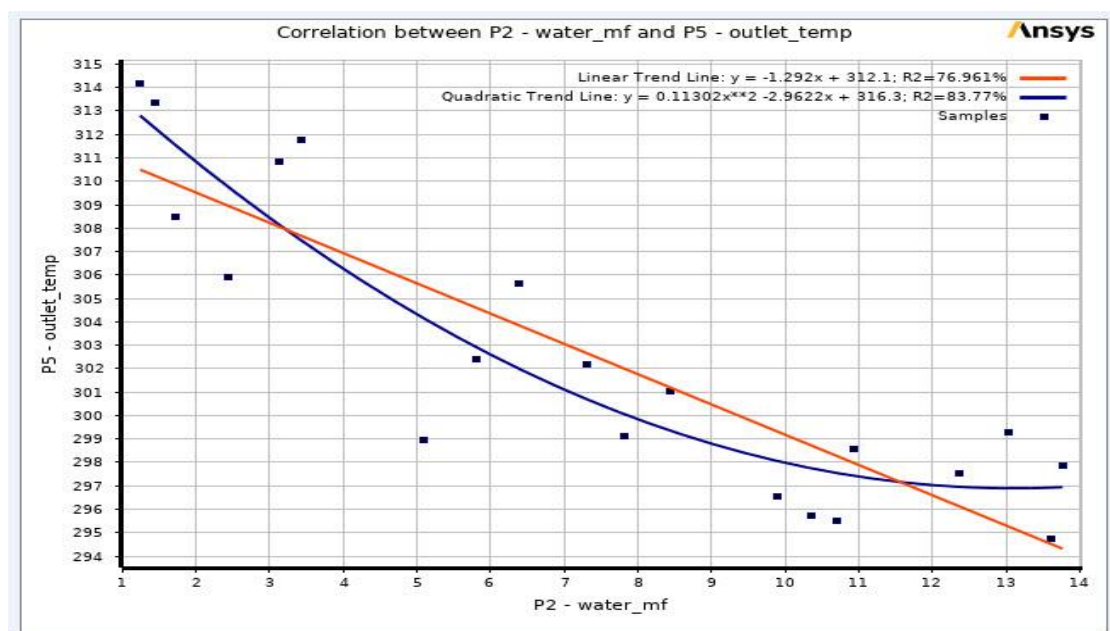
فرآیند همگرایی در الگوریتم‌های ژنتیک برای دستیابی به نتایج بهینه ضروری است. نمودار به صورت بصری نشان می‌دهد که چگونه این عوامل در چندین تکرار همگرا می‌شوند. تعداد تکرارها ۲۰ نشان دهنده تعداد چرخه‌ها یا نسل‌هایی است که الگوریتم ژنتیک برای رسیدن به همگرایی متحمل می‌شود. فرآیند همگرایی نشان می‌دهد که چگونه پارامترهای کاهش دبی آب و دمای خروجی در الگوریتم ژنتیک با هم همگرا شده‌اند (شکل ۱۵).



شکل ۱۵. همگرایی دبی آب

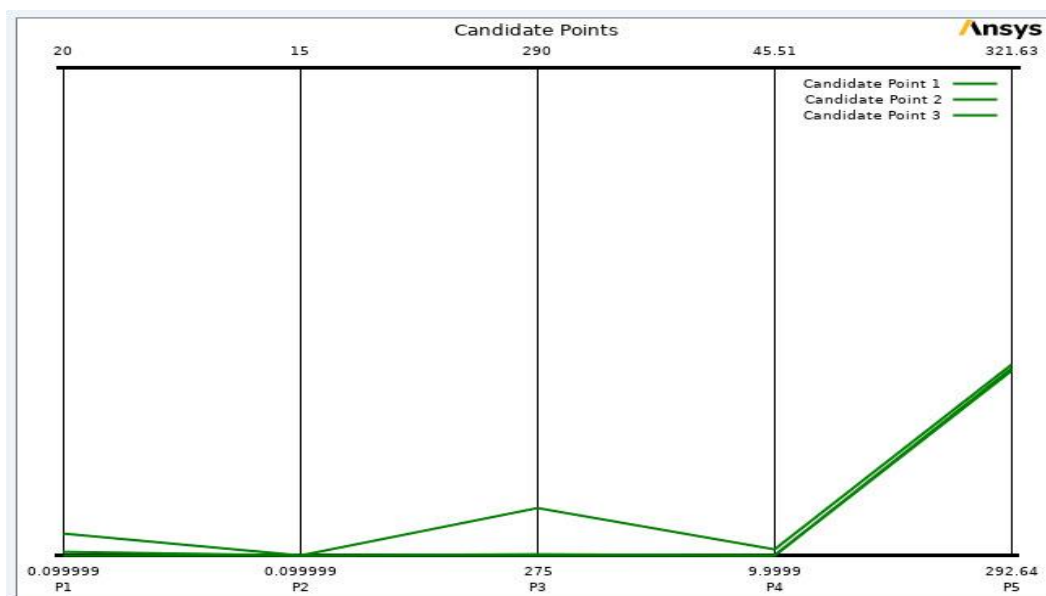
در نمودار زیر (شکل ۱۶)، نقاط داده نمونه‌برداری شده به همراه خطوط مربوطه نشان دهنده مدل‌های رگرسیون خطی و مرتبه دوم رسم شده است. این خطوط برای نشان دادن رابطه بین متغیرها در مجموعه داده ترسیم شده‌اند. با بررسی نمودار، آشکار می‌شود که معادلات خطی برای هر دو رگرسیون خطی و مرتبه دوم قابل مشاهده هستند و می‌توان از آن‌ها برای درک الگوها و روندها در داده‌ها استفاده کرد.

خطوط معادلات ریاضی را نشان می‌دهند که رابطه بین متغیرها را توصیف می‌کنند و بیش از شش مورد فرآیند تجزیه و تحلیل داده‌ها ارائه می‌دهند.



شکل ۱۶. نمودار خطی همبستگی دبی آب نسبت به دمای خروجی

در نهایت الگوریتم ژنتیک سه نقطه بهینه را به عنوان پارامتر کاندید (شکل ۱۷) پیشنهاد نموده و نقطه کاندید یک انتخاب شده و پس از شبیه‌سازی نهایی نتایج حاصل آن به شرح زیر است (جدول ۵).

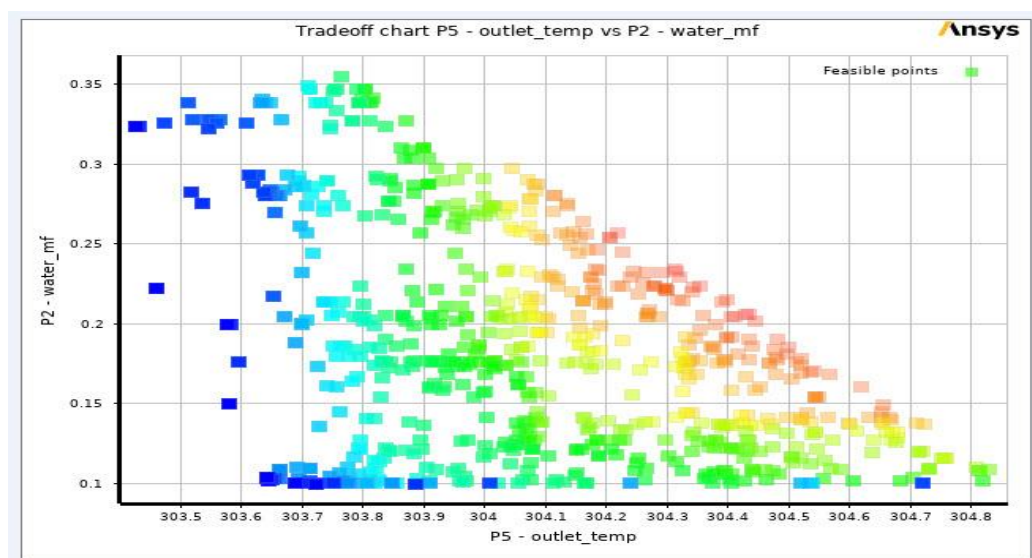


شکل ۱۷. نمودار نقاط کاندید

جدول ۵. مشخصات نقاط پیشنهادی

پارامتر	واحد	کاندید ۱	کاندید ۲	کاندید ۳
سرعت قطرات آب	m/s	۰,۱۰۲۴۹	۱,۰۰۰۴	۰,۲۹۸۴۹
دبی جرمی آب	kg/s	۰,۲۲۲۱	۰,۱۰۱۸۶	۰,۱۰۰۳۳
دمای آب	k	۲۷۵	۳۷۵,۰۴	۲۷۶,۴۷
دبی جرمی هوا	kg/s	۱۰,۰۰۴	۱۰,۷۹	۱۰,۴۴۹
دمای خروجی	k	۳۰۳,۶۵	۳۰۳,۸۳	۳۰۴,۰۱

نقاط کاندید در نمودار مبادله‌ای^{۲۱} دبی آب نسبت به دمای خروجی ترسیم و به همراه نقطه کاندید ۱ نشان داده شده‌اند (شکل ۱۸). در این نمودار به صورت بصری رابطه بین دو تابع هدف تولید شده توسط الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است.



شکل ۱۸. نمودار مبادله‌ای دبی آب نسبت به دمای خروجی

۷. بهینه‌سازی^{۲۲}

پس از بهینه‌سازی پارامترها تعیین و به صورت مقادیر در جدول زیر ثبت شدند (جدول ۶). این جدول به عنوان خلاصه‌ای جامع از پارامترهای بهینه به دست آمده از طریق الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند. این یک مقایسه واضح بین حالت اولیه و نتایج بهینه شده ارائه می‌دهد و نرخ بهبود به دست آمده برای توابع هدف را برجسته می‌کند.

جدول مقادیر بهینه شده برای هر پارامتر را نشان می‌دهد که منعکس کننده تنظیمات اصلاح شده و دقیق تعیین شده از طریق فرآیند الگوریتم ژنتیک است. این پارامترهای بهینه شده، نتیجه جستجوی تکراری الگوریتم و ارزیابی راه‌حل‌های بالقوه، با هدف به حداکثر رساندن توابع هدف هستند. جدول علاوه بر مقادیر پارامترهای بهینه شده، نرخ بهبود هر تابع هدف را نیز در بر می‌گیرد. این نرخ بهبود میزان پیشرفت به دست آمده در توابع هدف پس از فرآیند بهینه‌سازی را کمیت می‌کند. با مقایسه مقادیر توابع هدف بین حالت اولیه و نتایج بهینه محاسبه می‌شود.

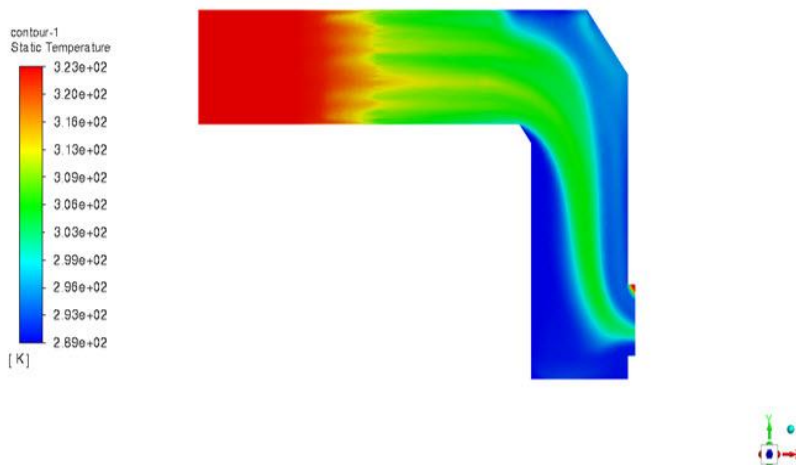
در این مدل سازی، تمرکز بر بهینه سازی فرآیند خنک کاری هوا در ورودی کمپرسور با کمترین میزان مصرف آب بوده است. به دلیل محدودیت های مرزی شبیه سازی، توان خروجی توربین به طور مستقیم محاسبه نشده است. با این حال، بر اساس روابط تجربی بین پارامترهای دبی جرمی هوا، دمای ورودی به کمپرسور و توان خروجی توربین، نشان داده است که این شرایط بهینه، به کاهش واقعی توان خروجی توربین منجر نشده است بلکه تا حدودی نیز بهبود میابد. پارامترهای بدست آمده پس از بهینه سازی و مقایسه مقادیر بهینه شده نسبت به حالت اولیه و نرخ بهبود، برای هر تابع هدف در زیر قابل مشاهده می باشد.

جدول ۶. نتایج بهینه یافته

پارامتر	کیس پایه	کیس بهینه شده	درصد بهبود
دبی جرمی آب (kg/s)	۴۱،۴۵	۲۲،۲۱	۴۶/۵ %
دمای آب (k)	۲۸۲،۵	۲۷۵	۲/۶۵ %
دبی جرمی هوا (kg/s)	۲۲،۲۱	۲۲،۲۱	ثابت
دمای خروجی (k)	۳۰۶،۱	۳۰۳،۴۶	۰/۸۶ %
توان خروجی توربین (MW)*	-----	-----	بدون افت محسوس/بهبود جزئی

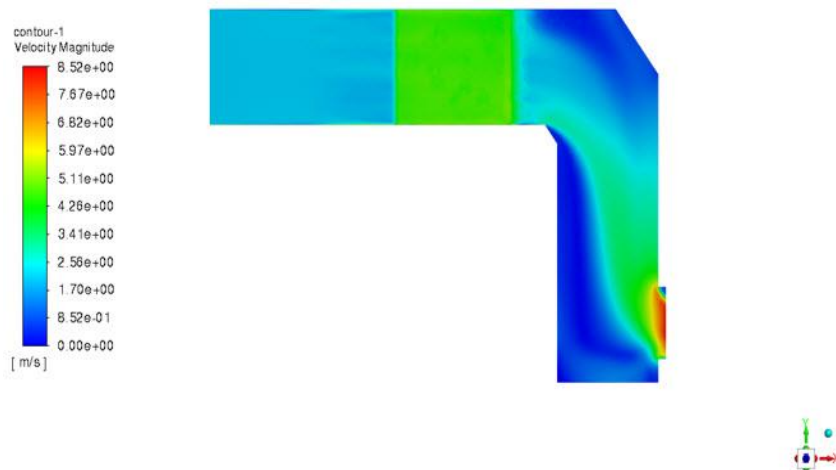
* توان خروجی بر اساس روابط تجربی بین دبی جرمی هوا و دمای ورودی به کمپرسور تخمین زده شده است. نتایج نشان میدهد که به دلیل ثابت بودن دبی هوا و کاهش دمای ورودی، افت توان خروجی مشاهده نشده و حتی بهبود نیز حاصل گردیده است. بنابر این، هدف اصلی پژوهش که بهینه سازی مصرف آب بدون افت محسوس در عملکرد توربین است، محقق گردیده است.

با بررسی کانتور دما (شکل ۱۹)، مشخص می شود که جریان هوای گرم در تماس با جریان آب پاشیده شده توسط نازل ها، کاهش قابل توجهی در دما را تجربه می کند. این فعل و انفعال بین هوای گرم و جریان آب باعث یک اثر خنک کننده و در نتیجه کاهش دما می شود. کانتور دما نشان می دهد که جریان هوای خنک شده به تدریج توزیع دمایی یکنواخت تری به خود می گیرد که از طریق راهنماهای جریان حرکت می کند. این توزیع یکنواخت دما برای حفظ ثبات و کارایی در سیستم ضروری است. نمودار دما نشان دهنده کاهش دما در دامنه و پس از تزریق آب در داکت می باشد. کانتور دما به وضوح این فرآیند خنک سازی را نشان داده و مناطقی را که دما در آن ها بیشتر کاهش می یابد برجسته می کند.



شکل ۱۹. کانتور دما

کانتور سرعت (شکل ۲۰) توزیع تغییرات سرعت در دامنه پس از گذشتن از قسمت‌های مختلف داکت را نشان می‌دهد. کانتور سرعت نشان می‌دهد که جریان هوای خنک شده با استفاده از مکش منفی به سمت خروجی هدایت می‌شود. مکانیسم مکش منفی به ایجاد جریان مداوم هوای خنک کمک می‌کند و از عملکرد موثر و کارآمد سیستم اطمینان حاصل می‌نماید. کانتور سرعت به وضوح این فرآیند خنک‌سازی را نشان می‌دهد و مناطقی را که سرعت خنک‌کاری بر کاهش دما تاثیر بیشتری می‌گذارد را برجسته می‌کند.



شکل ۲۰. کانتور سرعت

۸. نتیجه گیری و پیشنهادات

در این تحقیق، بررسی جامعی از توربین‌های گازی و کاربردهای آن‌ها انجام شد. انواع مختلف توربین‌های گاز موجود در صنعت به همراه کاربردها و مزایای خاص آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. پس از بررسی توربین‌های گاز، تمرکز به سمت کاوش روش‌های خنک‌کننده مختلف به کار رفته در سیستم‌های توربین گاز معطوف گردید.

از بین روش‌های خنک‌سازی مورد مطالعه، روش مه‌پاشی به عنوان رویکرد اولیه برای بررسی بیشتر انتخاب شد. در ادامه به تجزیه و تحلیل دقیق مطالعات انجام شده با استفاده از روش مه‌پاشی پرداخته است. بیان مسئله به دقت مورد بررسی قرار گرفت و معادلات حاکم برای دینامیک سیالات به طور کامل بررسی و روشن شد.

برای بهینه‌سازی فرآیند خنک‌سازی، از روش بهینه‌سازی چند هدفه استفاده شد. فرآیند بهینه‌سازی با هدف دستیابی به دو هدف اصلی انجام شد (جدول ۷):

- به حداقل رساندن مصرف آب و
- به حداکثر رساندن سرعت خنک‌سازی

جدول ۷. شاخص پارامترهای بهینه‌یافته

نوع بهینه‌سازی	پارامتر	شاخص
به حداقل رساندن	دمای خروجی	P5(outlet_temp)
به حداقل رساندن	دبی آب	P2(water_mf)

نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳، صفحه ۳۱-۵۰

نتایج تحقیق حاکی از آن است که دبی آب بیشترین تأثیر را بر کاهش دمای خروجی داشته و علاوه بر این، نرخ جریان ورودی هوا بر افزایش دما تأثیر می‌گذارد. ارتباط بین این پارامترها با استفاده از مدل‌های ریاضی رگرسیون خطی و مرتبه دوم برقرار شد. این مدل‌ها درک روشنی از اینکه چگونه تغییرات در نرخ جریان آب و هوا بر عملکرد کلی خنک‌کننده تأثیر می‌گذارد، ارائه می‌کنند.

برای دستیابی به پارامترهای خنک‌کننده بهینه، از یک الگوریتم ژنتیک استفاده شد. این الگوریتم به طور موثر مصرف آب را به حداقل رساند و در عین حال سرعت خنک‌سازی را به حداکثر رساند. الگوریتم ژنتیک با همگرایی مکرر به سمت راه حل بهینه، مناسب‌ترین مجموعه پارامترها را برای سیستم خنک‌کننده ارائه کرد. حالت بهینه شده به کاهش چشمگیر ۴۶٫۵ درصدی در مصرف آب دست یافت، در حالی که هوا نرخ جریان جرمی ثابت ۲۲٫۲۱ کیلو گرم بر ثانیه را حفظ نموده و همچنین دمای هوای خروجی نیز به کاهش حدود ۱ درصد و دمای ۳۰۳٫۵ کلوین دست یافت.

لذا براساس این مطالعات، سیستم خنک‌کاری مه‌پاشی به‌عنوان بهترین و مرقون به صرفه‌ترین روش جهت سرمایش هوای ورودی^{۲۳} به کمپرسور و راه‌کار برتر افزایش راندمان توربین‌های گازی پیشنهاد می‌گردد.

۹. پی‌نوشت

1. Fogging
2. SFC (Specific Fuel Consumption)
3. Nozzle
4. NO_x
5. GasTurb 10
6. DPM (Discrete Phase Model)
7. RH
8. k-epsilon
9. pressure-based
10. Power Output
11. Design Modeler
12. Patch conforming Tetrahedron
13. MOGA (multi-objective genetic algorithm)
14. CCD (Central Composite Design)
15. DOE (Design of Experiments)
16. RSM (Response Surface Methodology)
17. RS(Response Surface)
18. Neural Network
19. Optimum
20. Iterations
21. TradeOff
22. Optimization
23. Air Intake
24. سایت meefog

۱۰. فهرست علائم لاتین

علامت	فارسی
$\dot{w}_c$	کار کمپرسور
$\dot{m}_{air}$	دبی جرمی هوا
h_1 و h_2	انرژی قبل و بعد از کمپرسور
$\dot{Q}_{in}$	نرخ گرمای تولیدی

کار تولیدی توربین	$\dot{w}_t$
مقدار آب تبخیری	$\dot{m}_{Evap.}$
نسبت جرمی آب به هوا	ω
نرخ انتقال حرارت	Q

۱۱. منابع

- [1] R. Bhargava, (2002) C. B. Meher-Homji, "PARAMETRIC ANALYSIS OF EXISTING GAS TURBINES WITH INLET EVAPORATIVE AND OVERSPRAY FOGGING", ASME TURBO EXPO.
- [2] E. C. Wilcox and A. M. Trout, (2013) "Analysis of thrust augmentation of turbojet engines by water injection at compressor inlet including charts for calculating compression processes with water injection", National Advisory Committee for Aeronautics.
- [3] احمد دوست محمدی، (۲۰۱۵) "بررسی استفاده از سیستم مه پاشی جهت افزایش راندمان نیروگاههای گازی"، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات بروجرد.
- [4] Mohamed Mostafa, et al., (2018) "A Comprehensive Study of Simple and Recuperative Gas Turbine Cycle with Inlet Fogging and Overspray", Alexandria University, Egypt.
- [6] Aniekan Essienubong Ikpe, Ijeoma Camelita Iluobe, Desmond Iria-evbo Imonitie, (2020) "Modelling and simulation of high pressure fogging air intake cooling unit of Omotosho phase II gas turbine power plant", Department of Mechanical Engineering, University of Benin, Benin City, Nigeria.
- [7] Odila C. C. E, Saturday E. G and Ebieto C. E, (2023) "A review of gas turbine inlet cooling technologies", International Journal of Frontiers in Engineering and Technology Research.
- [8] Hisham Saeed Hashim, Muna Sabah Kassim, Raid Abd Alwan, (2023) "Review on a Cooling Method for the Gas Turbine Power Plant", Department of Mechanical Engineering, Engineering College, Mustansiriyah University, Baghdad, Iraq.
- [9] Fawzi Sh. Alnasur, Mushtaq A. AL-Furaiji, (2024) "Estimation the Performance of Gas Turbine Power", College of Science, Al-Qadisiyah University, Al-Qadisiyah, Iraq.
- [10] ابراهیم حیاتی و محمدرضا علیگودرز، (۱۳۹۵) "بهینه سازی خنک کاری هوای ورودی به سیکل توربین گاز به روش تبخیری با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، نخستین کنگره بین المللی چالش های الکترونیکی.
- [11] محمود فرزانه گرد و مهدی دیمی، (۱۳۸۸) "مقایسه دو روش استاندارد خنک کاری هوای ورودی به کمپرسور"، کنفرانس صنعت نیروگاه های حرارتی.
- [12] مائده دهقانی محمدآبادی و همکاران، (۱۳۹۶) "مطالعه عددی تأثیر تعداد نازل های تزریق در خنک کاری هوای ورودی به واحد توربین گاز به روش مه پاشی پایین دستی"، ششمین همایش توربین گاز.
- [14] Kofar-ba, (2020) "Numerical evaluation of the motion of fogging flow along the inlet duct of gas turbine engine", 1st International Conference on Science, Engineering and Technology (ICSET).
- [15] Kofar-bai, Hai Zhang, (2020) "Numerical Simulation of Fog Flow along the Inlet Duct of Gas Turbine", International Journal of Advanced Research in Engineering Innovation.
- [16] R. Agbade and B. Kainga, (2021) "Performance and Techno-Economic Analysis of Inlet Fogging System Implementation in Heavy Duty Industrial Gas Turbines", International Journal of Thermodynamics (IJOT).
- [17] Hisham Saeed Hashim, et al., (2023) "Review on a Cooling Method for the Gas Turbine Power Plant", Anbar Journal of Engineering Science (AJES).
- [18] Khaled A. Naeim, et al., (2022) "Inlet air fogging strategy using natural gas fuel cooling potential for gas turbine power plants", ELSEVIER-Case Studies in Thermal Engineering no. 37.
- [19] Elsayed Barakat, Tai Jin, Gaofeng Wang, (2023) "Performance analysis of selective exhaust gas recirculation integrated with fogging cooling system for gas turbine power plants", ELSEVIER-Energy Journal no. 263.
- [20] Ibrahim Elbadawy, (2021) "Performance Improvement of a 43 MW Class Gas Turbine Engine with Inlet Air Cooling", International Journal of Emerging Trends in Engineering Research.