نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۷، شماره۳، پاییز ۱۴۰۳، صفحه ۳۱-۵۰

بهینه‌سازي مصرف آب در سامانه هواي ورودي موتور توربین گاز به‌روش خنک‌کاري مه‌پاشي

سید جمال موسوی[۱]، رضا آقائی طوق [۲*]

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۶/۱۰

کلمات کلیدی:
توربین گاز
هوای ورودی
مه‌پاشی
بهینه‌سازی
الگوریتم ژنتیک چند موضوعی

چکیده

مقاله حاضر به بررسی بهینه‌سازی فرآیند خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور توربین گاز به روش مه‌پاشی می پردازد. مدل مطالعاتی در این کار، توربین گاز نوعGE - LM2500 بوده و نتایج حاصل نشان داد که موثرترین عوامل در خنک‌سازی هوا، دبی جرمی آب ودبی 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) وطراحی شبکه عصبی (CCD) استفاده شد. مجموعه‌ای از مدل‌های بهینه‌یافته به‌صورت 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.

[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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

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، بهینه سازی 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 بهارگاوا (۲۰۰۲) [۱] با مطالعه‌ی روند رو به افزایش ساخت نیروگاه های 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 به طور 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 باایده تزریق آب به داخل هوای ورودی کمپرسور که باعث کاهش دمای خروجی هوا از کمپرسور ومتعاقب آن کاهش کار مصرفی کمپرسور توسط ویلکاکس و تروت (۲۰۱۳) [۲] پیشنهاد شدو از دهه ۱۹۸۰ تا کنون مورد استفاده قرار گرفته است.

دوست محمدی (۲۰۱۵) [۳] با بررسی توربین های 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 می شود (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 می شود به‌طوری‌که، کار مصرفی کمپرسور افزایش یافته و کار خالص خروجی کاهش می یابد. 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 تاثیر 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.



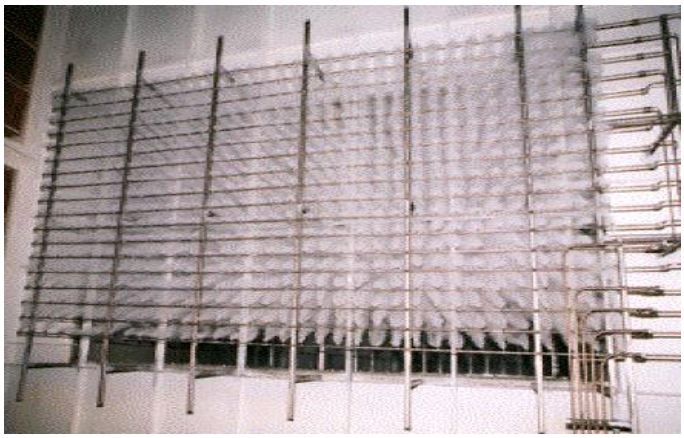
شکل ۱. سامانه ورودی هوای توربین گاز V94.2

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

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

اودیلا و ابیتو (۲۰۲۳) [۷] با بررســی‌های فنی روش‌های مختلف عملکرد توربین‌های گازی نشـــان دادند که خنک‌کاری از طریق هوای ورودی مرقون به صرفه‌ترین راه برای افزایش کارایی توربین گاز می‌باشد. هاشم سعید هاشم و همکاران (۲۰۲۳) [۸] نشان دادند که روش مه‌پاشی در سال‌های اخیر محبوب‌تر شده است. زیرا علاوه‌بر هزینه کمتر، توان خروجی را نیز افزایش می‌دهد. همچنین، بهینه‌سازی ساختار خنک کننده توربین‌های گازی اخیراً به‌عنوان راهی برای بهبود عملکرد سیستم خنک کننده محبوبیت پیدا کرده و مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. النصور و فوریجه (۲۰۲۴) [۹] با مقایسه دو نمونه خنک کننده بدون مه‌پاش و با مه‌پاش در شرایط محیطی با دمای بسیار بالا نشـان دادند که نمونه دارای مه‌پاش عملکرد و کارایی بالاتری دارد. همچنین، با افزایش نرخ جریان هوای ویژه، مصـرف سـوخت ویژه [۲] و مصرف گرمای ویژه در واحد توربین گاز نیزکاهش یافته است.

دهقانی محمد ابادی و همکاران (۱۳۹۶) [۱۲] تعداد نازل پاشش آب و قطر قطرات را در سامانه مه‌پاشی 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 بهینه‌تری 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.



شکل۲. چیدمان نازل‌ها در داخل مجرای هوای ورودی توربین گاز GE7-EA

کوفار و ژانگ (۲۰۲۰) [۱۵و۱۴] با بهره‌گیری از روش تحلیل عددی، با اسـتفاده از نرم افزار انسـیس CFX و مدل‌سـازی مجرای هوای ورودی، جریان پاشـش نازل‌ها (شـکل ۳) در سـامانه مه‌پاش در امتداد کانال مجرای ورودی هوای توربین گازی Alstom GT13E2 را مورد مطالعه قرار داند و نتایج به‌دسـت‌آمده نشـان داد که مه‌پاشـی اثرات قابل‌توجهی بر سـرعت 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل۳. 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 به‌دلیل انتقال گرمای تبخیر ناشی از هوا به قطرات آب در مجرای ورودی، اثرات قابل‌توجهی 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 می کنند.

از طرفی قرار گرفتن کشور ایران در اقلیم آب و هوایی گرم و روند رو به افزایش گرما و بحران آب در کشورو 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 به‌شدت احساس می‌شود،لذا نویسندگان را برآن 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 وبعد 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 به‌عنوان حجم کنترل بیان کننده بالانس انتقال حرارت و جرم بین آب و هوا بدون تلفات را مطابق زیر بیان نمودند:

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

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

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

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

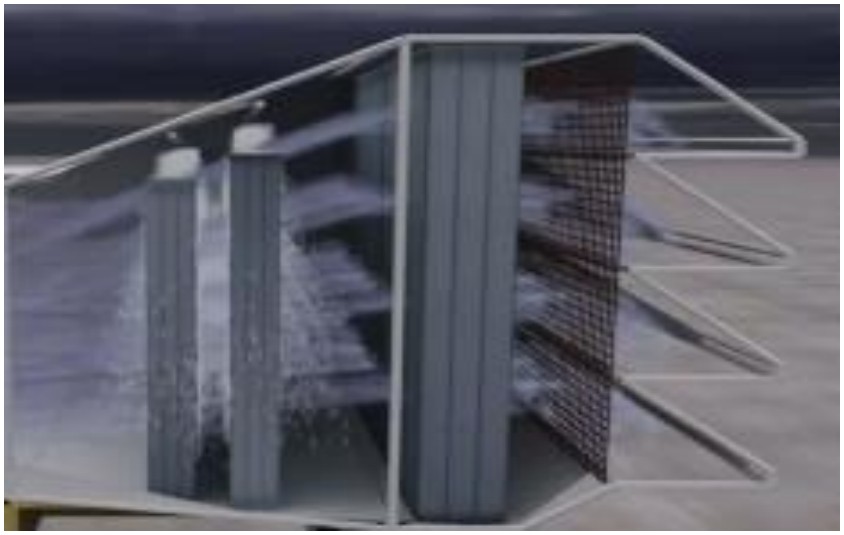
۱- دمای خشک ۱۵°c

۲- دمای‌تر °c ۷/۲

۳- رطوبت نسبی ۶۰٪

۴- فشار محیط ۱ اتمسفر

۵- عدم افت فشار در قسمتهای ایزوبار(هم‌فشار)



شکل ۴. شماتیک مه‌پاشی[۲۴]

قطرات آب به‌دلیل دمای بالا به سرعت تبخیر می شوند و گرما را از هوای اطراف یا گازهای حا صل از احتراق جذب می‌کنند. این اثر خنک کننده تبخیری به کاهش دمای هوای ورودی به توربین کمک می‌کند.

در مدل فاز گسسته، فاز ا صلی به صورت گاز یا هوا بوده و فازهای دیگر به صورت مایع یا ذرات و قطرات پراکنده میبا شند 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 وکمتر از ۱۰درصد از حجم سیال را داشته باشند ولی محدودیتی در دبی جرمی آن وجود ندارد. فازهای گسسته می تواند شامل ذرات یا قطرات یا مواد محترقه و یا ترکیبی از چند مولفه باشد.

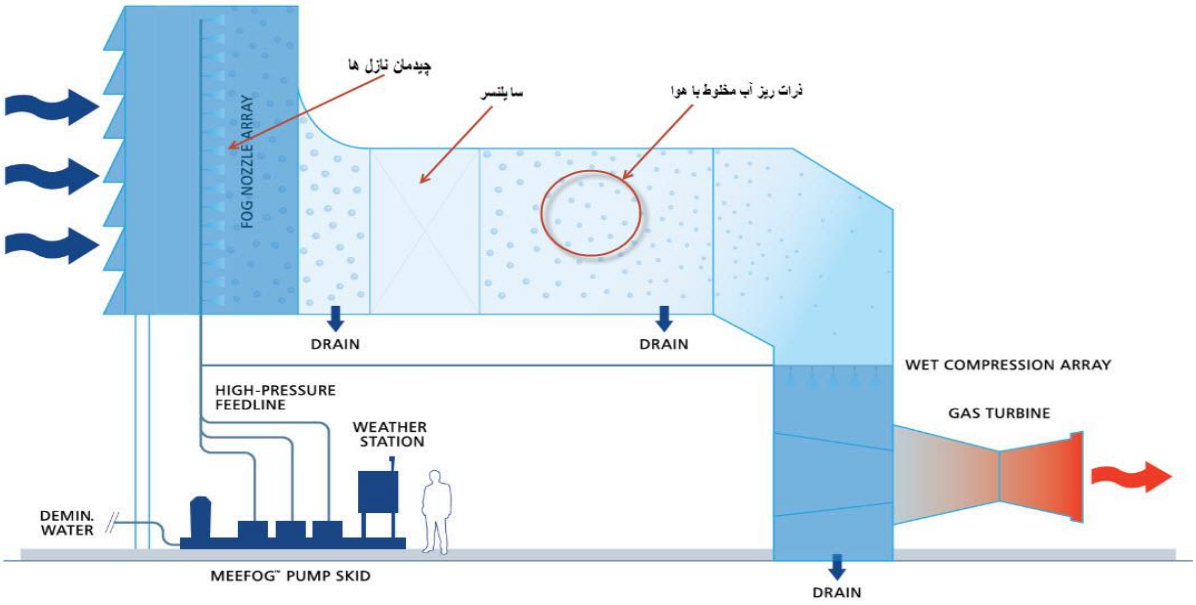
برای قطرات آب از مدل فاز گسسته (DPM) استفاده شده که حرکت قطرات را در چارچوب لاگرانژی مدل می‌کند. این مدل اثرات تبخیر، انتقال حرارت و جرم بین هوا و قطرات را در نظر می‌گیرد. این معادلات با نرم‌افزار ANSYS Fluent و روش حلگر فشارمحور (pressure-based) همراه با الگوریتم SIMPLE حل شده‌اند تا نتایج دقیقی از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

اســتفاده از خنک‌کننده مه‌پاشـــی (شـــکل ۵) در توربین‌های گاز مزایای متعددی دارد. اولا"، 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

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 نا شی 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.



شکل۵. شماتیک(طرحواره) سیستم فاگ[۲۴]

۳. هندسه موردمطالعه و تولید شبکه

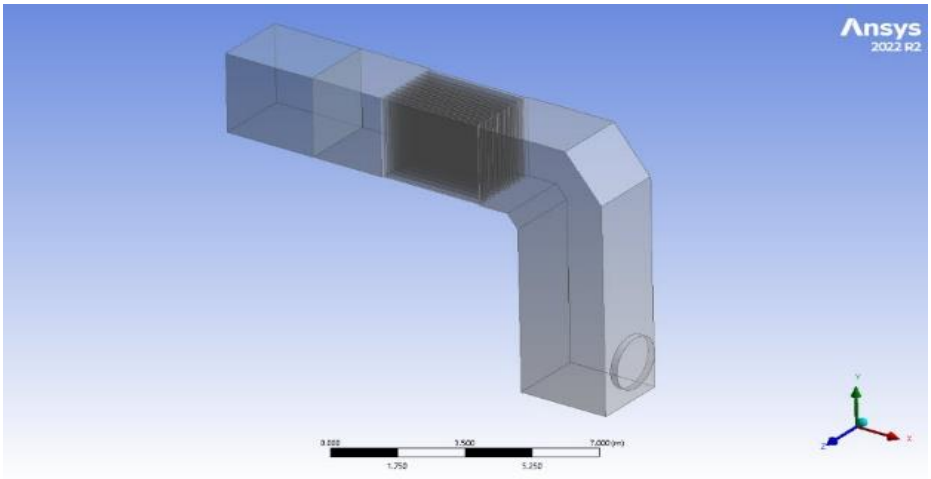
خالد نعیم و همکاران (۲۰۲۲) [۱۸] با استفاده از مدل فاز گسسته[۶] و مدل اغتشاش k-ω تاثیرات پارامترهای طول مجرای ورودی، تعداد نازل، قطر قطرات یکنواخت و زاویه نازل بر دمای هوای ورودی کمپرسور و رطوبت نسبی[۷] را در روش مه‌پاشی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. باراکات و وانگ (۲۰۲۳) [۱۹] با روش فاز گسسته DPM و مدل توربولانسی کا-اپسیلون[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 حاضرمدل 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 تلرانس 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 شکبه‌ای با کیفیت برای جلوگیری از تولید داده‌های دارای خطای

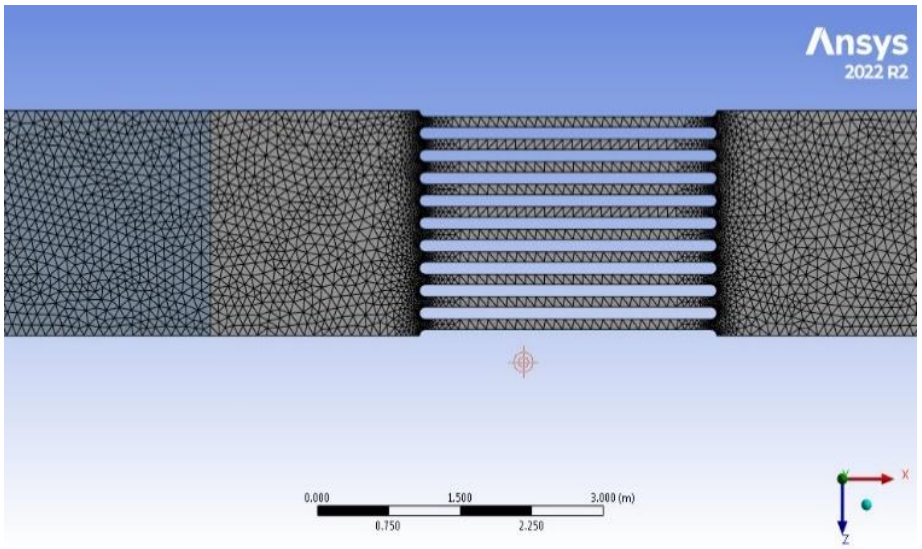
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

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 پیش‌رو جهت تولید شبکه ازروش «شبکه بی‌سازمان سه بعدی چهار وجهی سازگار [۱۲]» استفاده شده وتعداد 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 ۷و۸و۹و۱۰) و تاثیر تغییرات شبکه در جواب‌ها ثبت و مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی جریان سیال (هوا و قطرات آب) در مجرای 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.



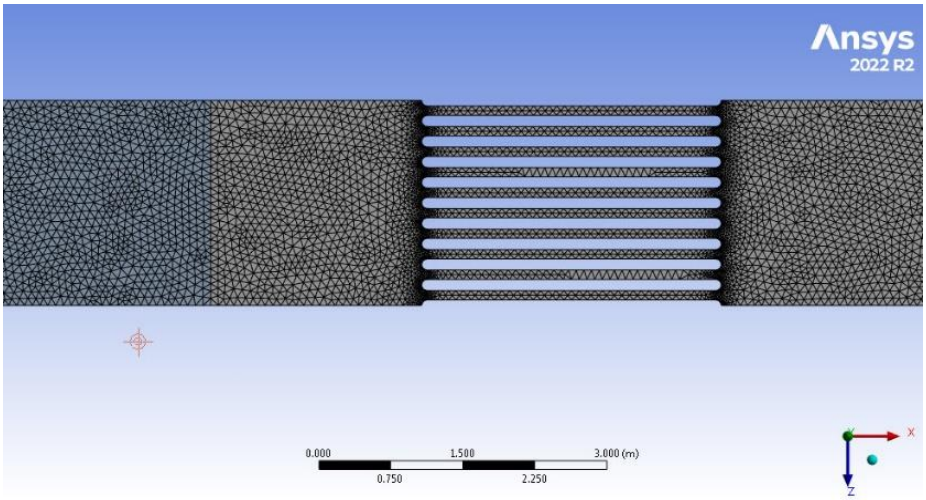
شکل ۶. مدل هندسی مجرای ورودی توربین گاز نوع LM2500

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

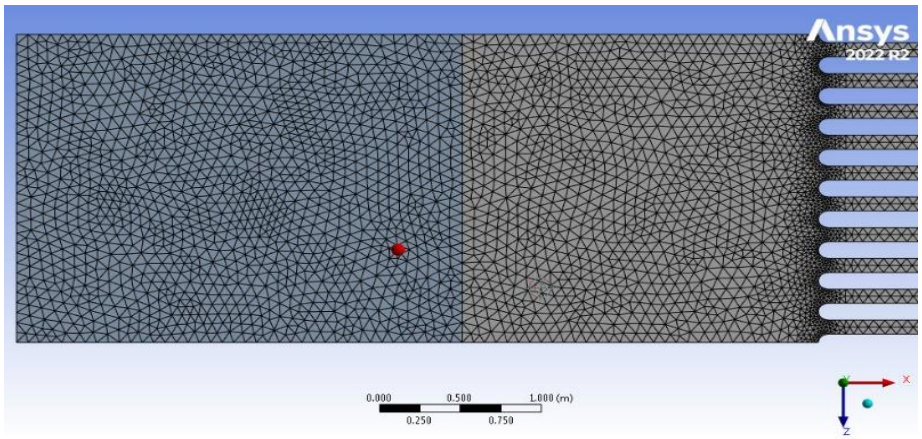


شکل ۷. شبکه درشت

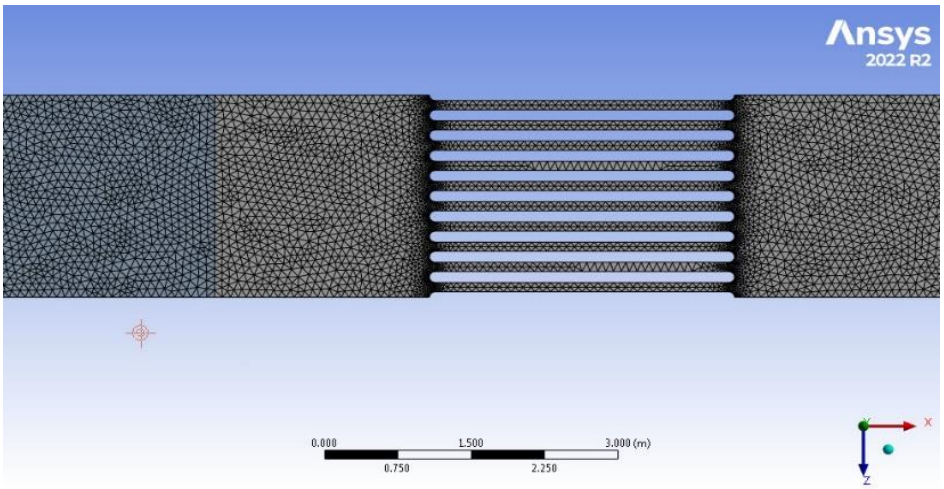
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل۸. شبکه متوسط



شکل۹. شبکه ریز



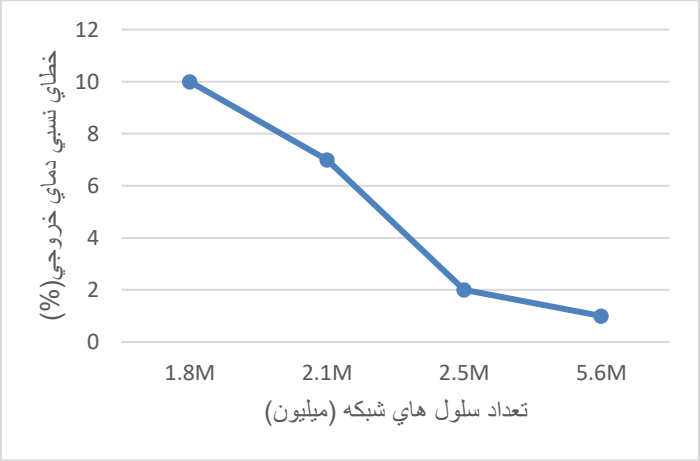
شکل ۱۰. شبکه خیلی ریز

جدول در صد میزان خطای شبکه محا سباتی و تعداد سلول ها و شبکه انتخابی و نمودار ا ستقلال از شبکه نیز در زیر ن شان داده شده است(جدول۱).

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

جدول۱. درصد میزان خطای شبکه محاسباتی

ردیف	شبکه محاسباتی	تعداد سلول	میزان خطا
۱	درشت	۱۸۷۷۸۲۸	۱۰%
۲	متوسط	۲۱۸۳۵۸۰	۷%
۳	ریز	۲٤۹۲۰۷٤	۲%
٤	خیلی ریز	٥٦٥۸۷۱۷	۱%



شکل۱۱- 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) وطراحی 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 ومدل‌سازی 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 شدکه 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

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

انتخاب بهترین راه‌حل بر اساس کمینه‌سازی 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 پارامتر های مختلف مانندکاهش مصرف آب و دمای خروجی در این مطالعه

مدیریت پیچیدگی :مناسب برای مسائل غیرخطی مانند جریان دوفازی مه‌پاشی

انعطاف‌پذیری :کارآیی بالا در مدیریت و پردازش تعداد متغیرهای زیاد (مانند دبی ، سرعت و دما)

برتری بر روش‌های تکاملی دیگر و عملکرد بهتر برای مسائل چند هدفه

سازگاری با طراحی آزمایش(DOE): ترکیب با RSM وCCD وکاهش تعداد شبیه‌سازی‌ها

۵. روش شبیه‌سازی 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 داده‌های منا سب برای تولیدنمودار سطح پا سخ RSM را دارا ست. این روش با ا ستفاده از یک ماتریس کوادروتیک نقاط طراحی را تولید می‌کند و سپس توسط نرم افزارفلوئنت شبیه سازی انجام گرفته و نقاط بدست آمده توسط الگوریتم یادگیری ماشین برای تولید کانتورهای سطح پاسخ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این شبیه‌سازی شرایط مرزی ثابت و بازه مجاز مربوط به تغییرات پارامترها به شرح جدوال زیر است (جدول۲و۳).

جدول ۲. پارامترهاو مقادیر تنظیم شده برای شرط مرزی ورودی

متغیر	واحد	مقدار/نوع
نوع شرط مرزی	-	دبي جرمي
مقدار دبی جرمی هوا	Kg/s	[۱۰ - ٤٥]
مقدار دبی جرمی آب	Kg/s	[۰ - ١٤]
جهت جریان	-	عمود بر شرط مرزي
شدت توربولانس	%	٥
دمای هوا	K	۳۰۰
دمای آب	K	[۲۷٥ - ۲۹۰]
سرعت اسپری آب	m/s	[۰ - ۲۰]

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

جدول ۳. پارامترهاو 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 ا ست که جریان سیال در هند سه ورودی یک توربین گازی شبیه سازی شده و میزان مصـــرف آب برای خنک‌کاری به کمترین میزان خود برســد؛ همچنین، دما در ورودی توربین نیز در کمترین مقدار خود باشــد. از این رو با ا ستفاده از روش نرم افزار طراحی آزمایشات [۱۵] مسئله بهینه سازی تعریف شده و با کمک الگوریتم‌های یادگیری ما شین و الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی انجام گرفته است و نقاط عملکردی مناسب استخراج شده است. جدول نتایج را برای هر نقطه طراحی ارائه می‌کند و نرخ جریان آب مصرفی پارامتر ورودی در محور سمت راست نمایش داده می‌شود. این پارامتر میزان مصرف آب در سیستم را نشان می‌دهد. در سمت چپ، محور عمودی نتایج دمای خروجی را نشـان می‌دهد که دمای سـیسـتم را در مکان‌ها یا مناطق خاص مورد نظر نشـان می‌دهد. محور افقی با نقاط طراحی مطابقت دارد و امکان مقایسه و تجزیه و تحلیل آسان پیکربندی‌های مختلف را فراهم می‌کند.

با تجزیه و تحلیل نتایج، می‌توان تأثیر پارامتر ورودی، یعنی نرخ جریان آب مصـــرفی، بر دمای خروجی را مشـــاهده کرد. با بررســـی داده‌ها می‌توان الگوها و روندها را شنا سایی کرد و اطلاعات ارز شمندی را برای بهینه سازی طراحی ارائه کرد. به عنوان مثال، ممکن ا ست آ شکار شود که نرخ‌های جریان خاص منجر به توزیع دمای مطلوب‌تر می‌شوند یا نقاط طراحی خاص عملکرد حرارتی بهتری را نشان می‌دهند.

با مطالعه رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی، مهندســـان و طراحان می‌توانند تصـــمیمات آگاهانه‌ای در مورد پارامترهای طراحی بگیرند. این فرآیند تکراری امکان اصـلاح و بهبود را فراهم می‌کند و منجر به یک سـیسـتم بهینه شـده که معیارهای عملکرد مورد نظر را برآورده می‌کند.

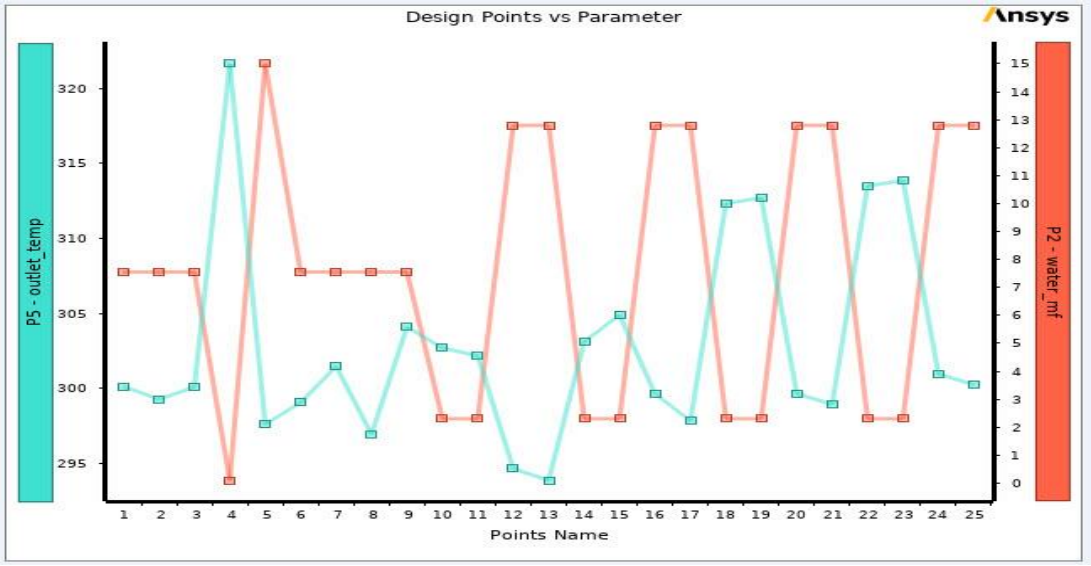
داده‌های ورودی شامل سرعت آب و دبی آب و دمای آب و دبی هوا بوده و پارامتر خروجی، دمای خروجی از داکت می‌باشد (جدول۴).

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

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 می سازد تا اثرات هر یک از پارامترها را به طورمستقل نسبت به پارامتر خروجی ارزیابی نموده و جهت بهینه‌سازی شرایط مطلوب را مدل نماید.

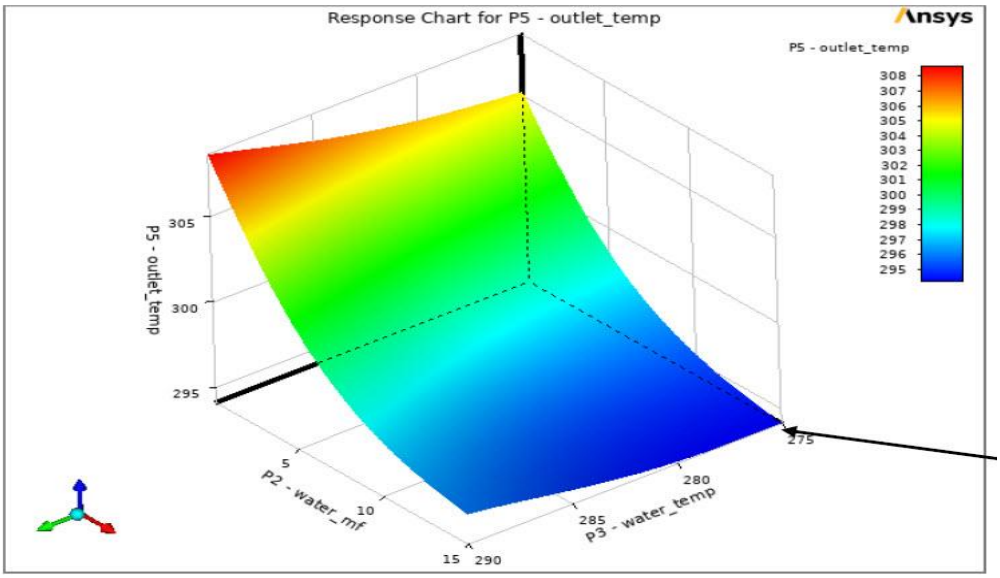


شکل۱۱. نمودار ارتباط نقاط طراحی با پارامترهای دبی آب و دمای خروجی

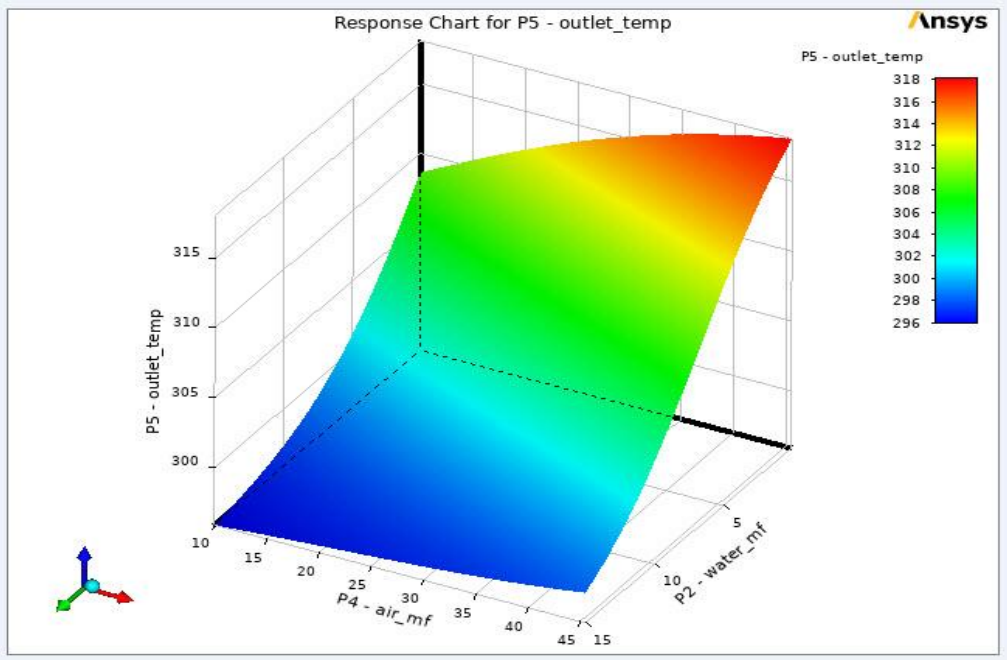
پس از استخراج داده‌های تجربی با استفاده از روش تجمع ژنتیکی، مدل‌های سطح پاسخ [۱۶] برای تحلیل و درک رابطه بین متغیرهای ورودی مختلف و دمای خروجی مجرا تولید گردید. مدل سطح پا سخ یک تکنیک مدل سازی آماری ا ست که به ایجاد مدل‌های ریا ضی برای پیش‌بینی متغیر پا سخ بر ا ساس متغیرهای ورودی اجازه می‌دهد. در این تحلیل از سطح پا سخ [۱۷] نوع شبکه عصبی [۱۸] ا ستفاده شده است.

در نمودارهای سه بعدی سطح پا سخ (شکل۱۲و۱۳و۱۴)، 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 سه‌بعدی سطح پاسخ،ترکیب سه متغیر، یک روندرا نشان میدهند که با استفاده از آن می توان تغییرات پارامتر خروجی را نسبت به پارامترهای ورودی بصورت پیوسته مشاده نمود. نقاط بدست آمده از طراحی ازمایش 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

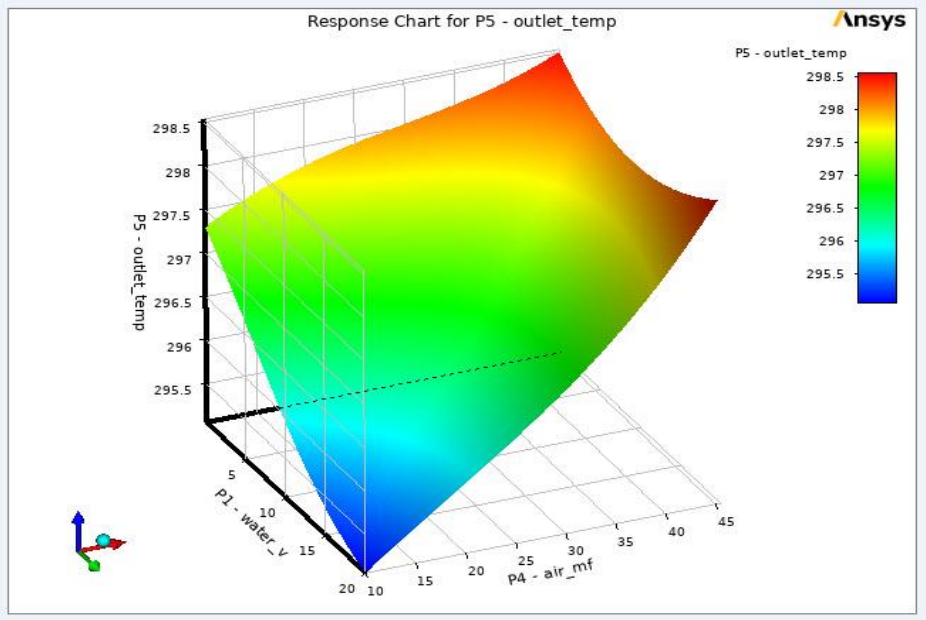


شکل۱۲. نمودار سه‌بعدی سطح پاسخ دبی و دمای آب نسبت به دمای خروجی



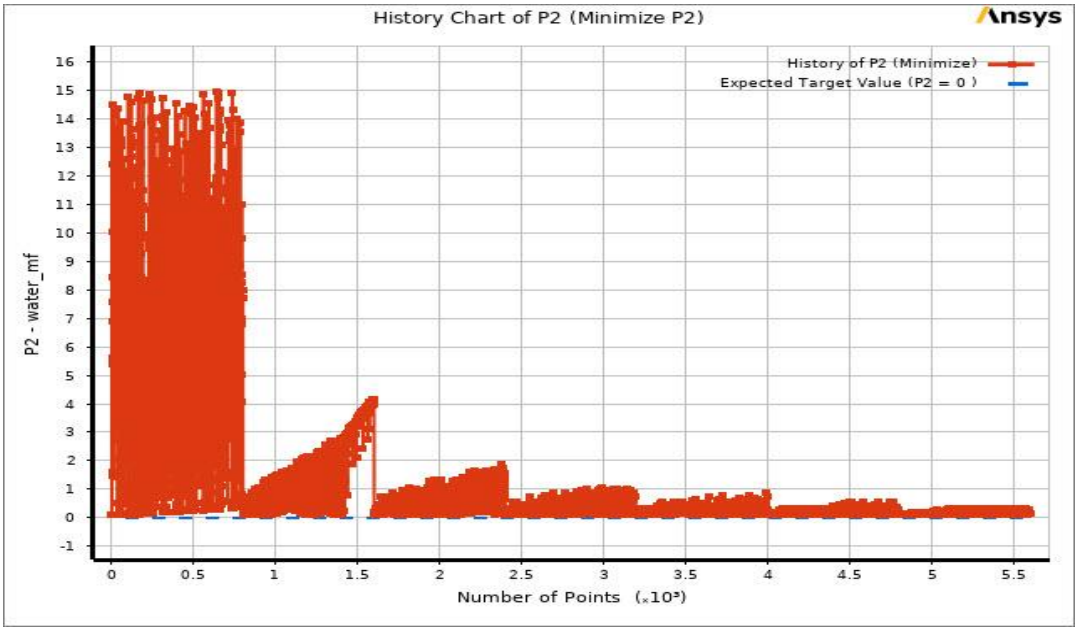
شکل۱۳. سه بعدی سطح پاسخ دبی آب ودبی هوا نسبت به دمای خروجی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل۱۴. 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 می شوند. 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 (شکل۱۵).

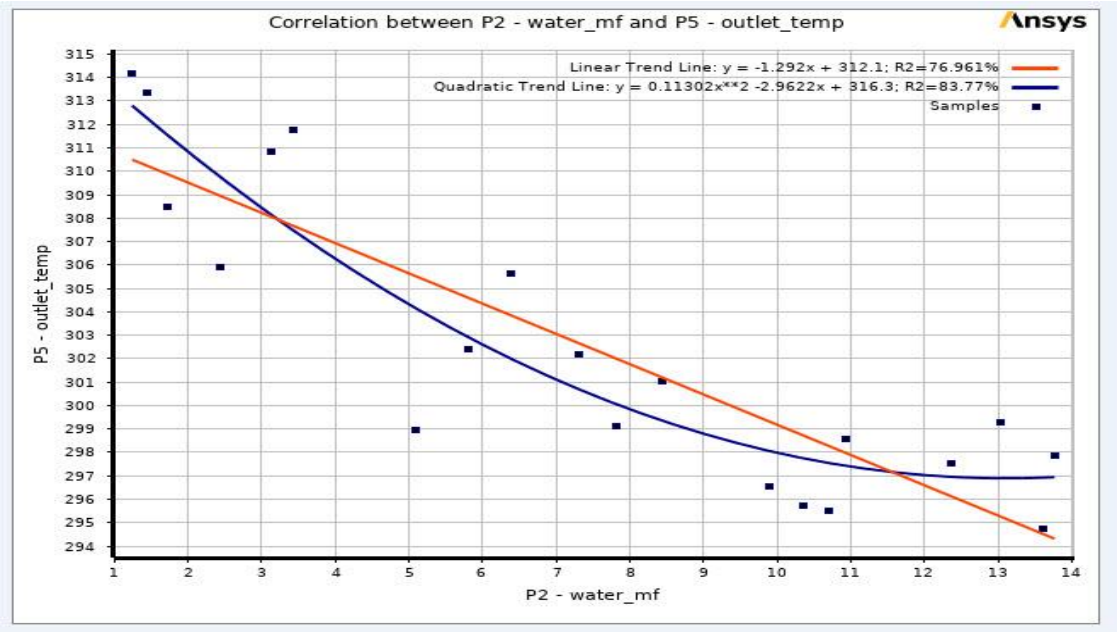


شکل ۱۵. همگرایی دبی آب

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 می شود 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.

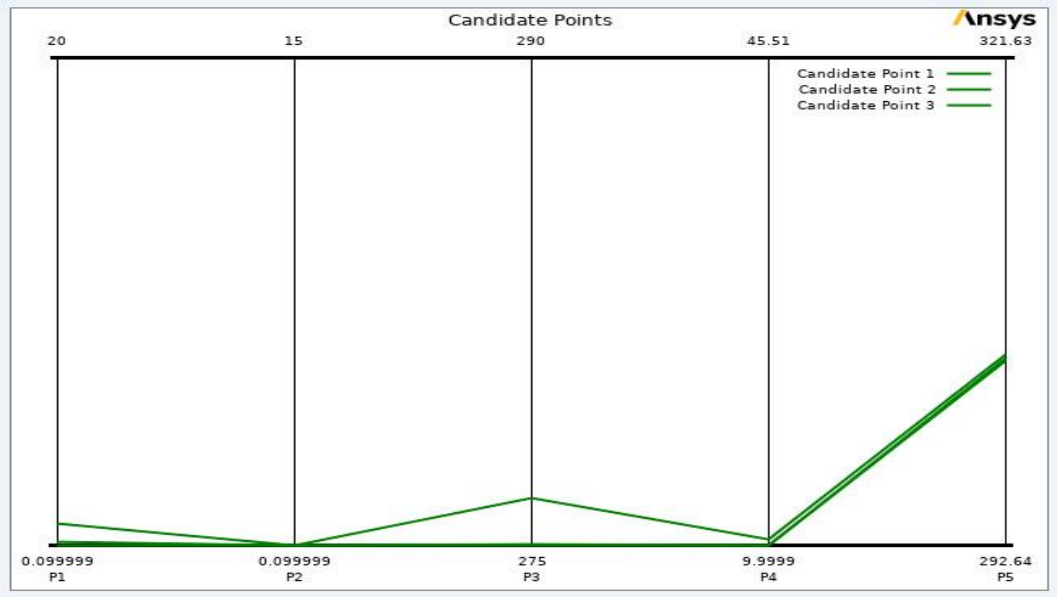
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

خطوط معادلات ریا ضی را ن شان می‌دهند که رابطه بین متغیرها را تو صیف می‌کنند و بینش ارز شمندی را در مورد فرآیند تجزیه و تحلیل داده‌ها ارائه می‌دهند.



شکل ۱۶. نمودارخطی همبستگی دبی آب نسبت به دمای خروجی

در نهایت الگوریتم ژنتیک سـه نقطه بهینه را به عنوان پارامتر کاندید (شـکل۱۷) پیشـنهاد نموده و نقطه کاندید یک انتخاب شـده و پس از شبیه‌سازی نهایی نتایج حاصل ان به شرح زیر است (جدول۵).



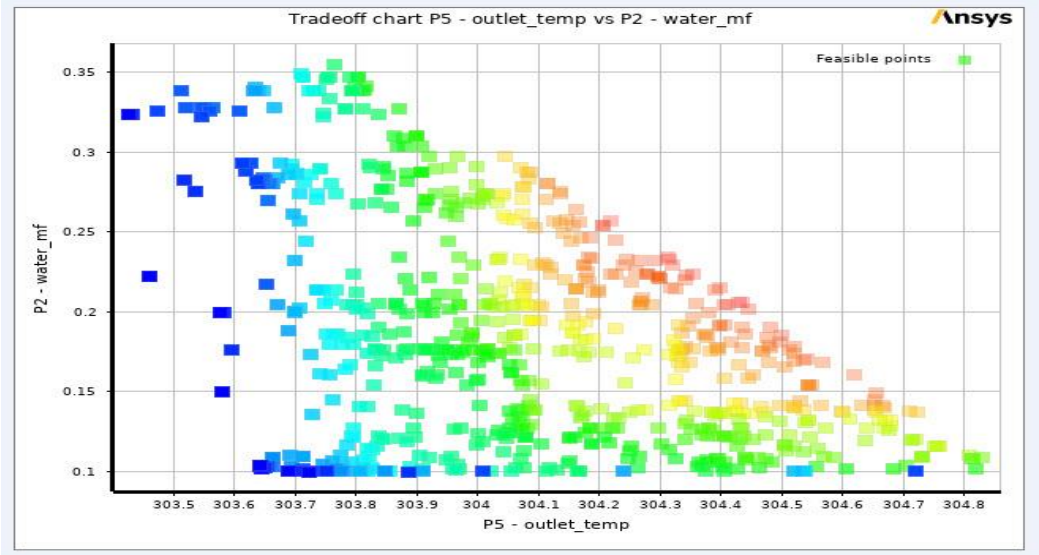
شکل۱۷. نمودار نقاط کاندید

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

جدول ۵. مشخصات نقاط پیشنهادی

پارامتر	واحد	کاندید ۱	کاندید ۲	کاندید ۳
سرعت قطرات آب	m/s	۰,۱۰۲۴۹	۱,۰۰۰٤	۰,۲۹۸٤۹
دبی جرمی آب	kg/s	۰,۲۲۲۱	۰,۱۰۱۸٦	۰,۱۰۰۳۳
دمای آب	k	۲۷۵	۳۷۵,۰٤	۲۷٦,٤۷
دبی جرمی هوا	kg/s	۱۰,۰۰٤	۱۰,۷۹	۱۰,٤٤۹
دمای خروجی	k	۳۰۳,٦۵	۳۰۳,۸۳	۳۰٤,۰۱

نقاط کاندید در نمودار مبادله‌ای [۲۱] دبی آب نسبت به دمای خروجی ترسیم و به‌همراه نقطه کاندید ۱ نشان داده شده‌اند (شکل۱۸). در این نمودار به صورت بصری رابطه بین دو تابع هدف تولید شده توسط الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است.



شکل ۱۸. نمودارمبادله‌ای دبی آب نسبت به دمای خروجی

۷. بهینه‌سازی[۲۲]

پس از بهینه‌سازی پارامترها تعیین و به صورت مقادیر در جدول زیر ثبت شدند(جدول۶). این جدول به عنوان خلاصه‌ای جامع از پارامترهای بهینه به د ست آمده از طریق الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند. این یک مقایسه وا ضح 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

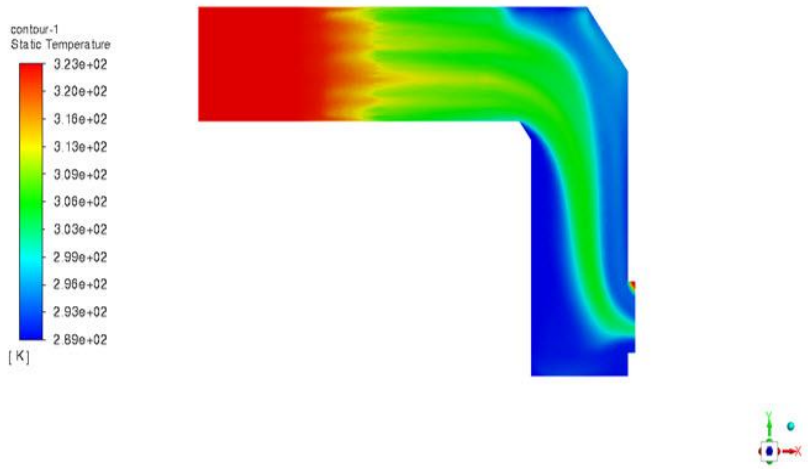
در این مدل‌سازی ، تمرکز بر بهینه‌سازی فرآیند خنک‌کاری هوا در ورودی کمپرسور با کمترین میزان مصرف آب بوده است. به دلیل محدودیت‌های مرزی شبیه‌سازی، توان خروجی توربین به‌طور مستقیم محاسبه نشده است. با این حال، بر اساس روابط تجربی بین پارامترهای دبی جرمی هوا، دمای ورودی به کمپرسور و توان خروجی توربین، نشان 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 می‌باشد.

جدول ۶ . نتایج بهینه‌یافته

پارامتر	کیس پایه	کیس بهینه شده	درصد بهبود
دبی جرمی آب (kg/s)	٤١,٤٥	٢٢,٢١	% ٤٦/٥
دمای آب (k)	٢٨٢,٥	٢٧٥	% ٢/٦٥
دبی جرمی هوا (kg/s)	٢٢,٢١	٢٢,٢١	ثابت
دمای خروجی (k)	٣٠٦,١	٣٠٣,٤٦	% ٠/٨٦
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 بهینه‌سازی مصرف آب بدون افت محسوس در عملکرد توربین است، محقق گردیده است.

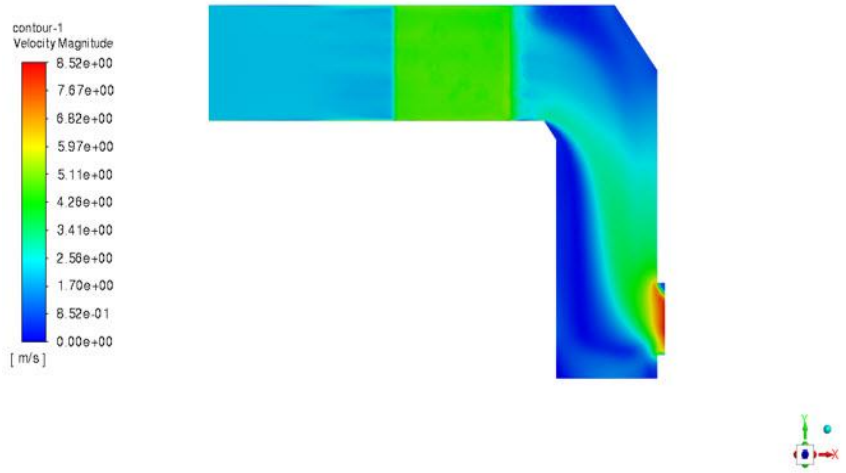
با بررسی کانتور دما (شکل۱۹)، مشخص می شود که جریان هوای گرم در تماس با جریان آب پاشیده شده توسط نازل‌ها، کاهش قابل توجهی در دما را تجربه می‌کند. این فعل و انفعال بین هوای گرم و جریان آب باعث یک اثر خنک کننده و در نتیجه کاهش دما می‌شود. کانتور دما نشان می‌دهد که جریان هوای خنک‌شده به تدریج توزیع دمایی یکنواخت‌تری به خود می‌گیرد که از طریق راهنماهای جریان حرکت می‌کند. 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 می‌باشد. کانتور دما به وضوح این فرآیند خنک سازی را نشان داده و مناطقی را که دما در آن‌ها بیشتر کاهش می‌یابد برجسته می‌کند.



شکل۱۹. کانتور دما

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

کانتور سرعت (شکل۲۰) توزیع تغییرات سرعت دردامنه 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 خنک سازی 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، برر سی جامعی از توربین‌های گازی و کاربردهای آن‌ها انجام شد. انواع مختلف توربین‌های گاز موجود در صنعت به همراه کاربردها و مزایای خاص آن‌ها مورد بررســی قرار گرفت. پس از بررســی توربین‌های گاز، تمرکز به ســمت 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 ا ستفاده از روش مه‌پا شی پرداخته ا ست. بیان م سئله به دقت مورد برر سی قرار گرفت و معادلات حاکم برای دینامیک سیالات به طور کامل بررسی و روشن شد.

برای بهینه سازی فرآیند خنک سازی، از روش بهینه سازی چند هدفه ا ستفاده شد. فرآیند بهینه سازی با هدف د ستیابی به دو هدف ا صلی انجام شد (جدول۷):

به حداقل رساندن مصرف آب و

به حداکثر رساندن سرعت خنک‌سازی

جدول ۷. شاخص پارامترهای بهینه‌یافته

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

نتایج تحقیق حاکی از آن ا ست که دبی آب بیشترین تاثیر را بر کاهش دمای خروجی دا شته 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 خنک کننده 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 خنک کننده 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 دست‌یافت.

لذا برا ساس این مطالعات، سی ستم خنک‌کاری مه‌پا شی به‌عنوان بهترین و مرقون به صرفه‌ترین روش جهت سرمایش هوای ورودی [۲۳] به کمپرسور و راه‌کار برتر افزایش راندمان توربین‌های گازی پیشنهاد می گردد.

۹. پی‌نوشت

1. Fogging
2. SFC (Specific Fuel Consumption)
3. Nozzle
4. NOx
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. meefog **سایت**

۱۰. فهرست علائم لاتین

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

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

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 ازسیستم 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] FawziSh. 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 خنک‌کاری هوای ورودی به سیکل توربین گاز به روش تبخیری با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، نخستین کنگره بین المللی چالش‌های الکترونیکی.

[11] محمود فرزانه گرد و مهدی دیمی،(۱۳۸۸) "مقایسه دو روش استاندارد خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور"، کنفرانس صنعت نیروگاه‌های حرارتی.

[12] مائده دهقانی محمدآبادی و همکاران،(۱۳۹۶) "مطالعه عددی تأثیر تعداد نازل‌های 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. Agbadede 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]