

# استفاده از روش‌های آماری و هوش مصنوعی جهت پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین یک موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی

روزبه ریاضی<sup>۱</sup>، ایمان کلینی<sup>۲</sup>، شیدوش و کیلی پور<sup>۳</sup>، بهرام تارویردی‌زاده<sup>۴</sup>، هادی ویسی<sup>۵</sup>، هادی زارع<sup>۶</sup>

۱ استادیار دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ro\_riazi@ut.ac.ir

۲ کارشناس ارشد دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

۳، ۴، ۵ و ۶ استادیار دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۷

## چکیده

در این مقاله ارتباط دمای گاز خروجی از توربین یک موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی<sup>۱</sup> نسبت به تغییرات پارامتر دور عملکردی موتور، با دو روش داده‌کاوی بررسی شده است. برای این منظور پارامتر دمای گاز خروجی از توربین<sup>۲</sup> به‌عنوان مقدار خروجی اندازه‌گیری شده از موتور و دور عملکردی موتور<sup>۳</sup> به‌عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته شده است. از شبکه عصبی پرسپترون<sup>۴</sup> یک‌لایه و دولایه و شبکه عصبی شعاعی<sup>۵</sup> به‌همراه روش رگرسیون چندجمله‌ای<sup>۶</sup> برای پیش‌بینی رابطه غیرخطی موجود بین پارامتر ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده از موتور استفاده شده است. آزمایش‌های مربوطه با به‌کارگیری یک موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی با مقادیر دور عملکردی در محدوده صفر تا ۱۰۸۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شده است. نتایج حاصل از پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین با روش‌های داده‌کاوی نشان می‌دهند که این روش‌ها توانایی قابل قبولی در دستیابی به تطابق مناسب بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده دمای گاز خروجی از توربین دارند. نتایج حاکی از آن است که روش پرسپترون دولایه در مقایسه با روش‌های پرسپترون یک‌لایه، شبکه شعاعی و رگرسیون، توانایی بیشتری در پیش‌بینی پارامتر عملکردی موتور در این مطالعه دارد.

## واژگان کلیدی

موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی، دور عملکردی، شبکه عصبی مصنوعی، دمای گاز خروجی از توربین موتور، رگرسیون چندجمله‌ای

## ۱. مقدمه

مهندسی بسیار بالایی احتیاج دارد. به‌مرور زمان و با پیشرفت فناوری، استفاده از موتورهای توربین گاز با ابعاد کوچک رشد پیدا

توربین‌های گازی همواره از مهم‌ترین اجزای صنعتی به‌شمار می‌روند که طراحی و توسعه این موتورها به بودجه و دانش

کرده است. این موتورها نسبت به موتورهای با اندازه بزرگ، ساختار ساده‌تر، تعداد اجزای کمتر و هزینه طراحی و ساخت کمتری دارند. موتورهای توربین گاز با ابعاد کوچک در زمینه‌های مختلفی چون هواپیماهای بدون سرنشین، اجسام پرنده کنترل از راه دور و اهداف خاص پروازی نظیر فرایندهای اوج گرفتن و فرود آمدن عمودی کاربرد دارند [۱]. با توجه به مزایای این موتورها نسبت به موتورهای با اندازه بزرگ و همچنین دامنه کاربرد وسیع آنها، انجام آزمایش‌های تجربی و فعالیت‌های تحقیقاتی روی این موتورها و بررسی پارامترهای عملکردی آنها نظیر دمای گاز خروجی از توربین می‌تواند مفید واقع شود.

بر اساس تحقیقات پیشین [۱۳-۳]، مطالعات متنوعی در زمینه بررسی و مدلسازی موتورهای توربین گاز و توربوجت کوچک انجام شده است. در تعدادی از این مطالعات به بررسی و مدلسازی عددی موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی الیمپوس با استارت الکتریکی<sup>۷</sup> پرداخته شده است [۶-۳]. در مطالعه حاضر نیز این موتور میکروتوربین گاز به کار رفته است. این موتور می‌تواند در کاربردهایی چون پیش‌رانش اجسام پرنده کنترل‌شونده با امواج رادیویی و نیز تحقیق و توسعه در زمینه هواپیماهای کوچک و اجسام پرنده آزمایشگاهی به کار رود [۲]. همچنین این موتورها به صورت گسترده در پروژه‌های آموزشی و تحقیقاتی تعداد زیادی از دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی در سرتاسر جهان کاربرد دارند [۲]. مجموعه‌ای از آزمایش‌ها توسط لیلک<sup>۸</sup> [۳] با استفاده از یک موتور توربین گاز کوچک انجام شد. در مطالعات او مدلسازی عملکرد و خصوصیات ترمودینامیکی موتور مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین آنالیزهایی را روی راهکارهای افزایش تراست انجام داد. رحمان و ویدبورن [۴] یک بررسی عددی در مورد هوای تخلیه شده از کمپرسور<sup>۹</sup> (به طور کلی هوای تخلیه شده از کمپرسور می‌تواند برای جلوگیری از واماندگی به کار رود) و تأثیر آن بر عملکرد موتور توربوجت تک‌محوره انجام دادند. آنها یک مدل بالادرنگ برای بررسی اثر هوای تخلیه شده از کمپرسور بر عملکرد گذرا و پایای موتور توربوجت کوچک ارائه و اثر بردار تراست بر عملکرد موتور توربوجت کوچک را بررسی کردند و نشان دادند برای اینکه نتایج مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی تطابق بیشتری داشته باشد می‌توان بازده اجزاء را با دقت بالاتری به دست آورد. همچنین به این نتیجه رسیدند که خطای موجود در نتایج در شرایط اعمال اثر هوای تخلیه شده از کمپرسور می‌تواند دو دلیل

داشته باشد: اول اینکه موقعیت مکانی تخلیه هوا در امتداد طول کمپرسور بر مقدار کار مورد نیاز کمپرسور تأثیر می‌گذارد و دوم اینکه تخلیه هوا از کمپرسور ممکن است بر عملکرد کمپرسور اثر نامطلوبی بگذارد و خصوصیات عملکردی کمپرسور را تغییر دهد. علی‌حسینی و همکاران [۵] مطالعه‌ای را درباره طراحی مفهومی تست سل برای موتور میکروجت الیمپوس با استارت الکتریکی انجام دادند. تست سلی که آنها طراحی کردند دارای مجرای می‌باشد که موتور درون آن قرار می‌گیرد. مقطع مجرای تست سل دایروی می‌باشد و اجازه می‌دهد هوا به صورت یکنواخت وارد موتور شود. آنها همچنین برای جریان درون تست سل، یک شبیه‌سازی اثرودینامیکی با استفاده از نرم‌افزار فلونت انجام دادند. دیامانتیس و آناسازیوس [۶] روی آنالیز داده‌ها و کالیبره کردن مدل عملکردی یک موتور توربوجت کوچک فعالیت‌هایی را انجام دادند. آنها یک مدل شبیه‌سازی برای بررسی عملکرد موتور توربین گاز کوچک ارائه دادند و خطاهای رندوم<sup>۱۰</sup> و سیستماتیک<sup>۱۱</sup>، که در آزمایش‌های تجربی به وجود می‌آیند، را نیز در نظر گرفتند و همچنین برای بررسی صحت درستی نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی، از یک فاکتور تصحیح در داده‌های آزمایشگاهی خود استفاده کردند. آنها نشان دادند که مدلی که با استفاده از فشارها و دماهای سکون در خروجی‌های کمپرسور و توربین به دست آمده باشد، ناقص خواهد بود. از دلایل این نقصان می‌توان به انتقال حرارت از جداره توربین و احتمال وجود خطاهای سیستماتیک در اندازه‌گیری‌ها اشاره کرد.

چونمی [۷] بر ایجاد یک مدل دینامیکی برای بررسی یک موتور میکروتوربین گاز فعالیت‌هایی انجام داد. وی یک مدل دینامیکی و شبیه‌سازی برای بررسی عملکرد موتور توربین گاز کوچک و کنترل آن ارائه داد و رفتار موتور را در شرایط عملکردی آن بررسی نمود. او اجزای دینامیکی موتور را بررسی و مدلسازی کرد و برای بررسی رفتار گذرا و پایای موتور، یک مدل غیرخطی و همچنین یک مدل خطی به دست آورد و نشان داد که استفاده از خواص خطی اجزاء، برای مدلسازی مناسب نیست و نتایج مربوط به استفاده از مدل خطی نسبت به مدل غیرخطی، دارای خطای بیشتری هستند. چاکارتگی و همکاران [۸] نیز تحقیقاتی را در زمینه شبیه‌سازی موتور توربین گاز و همچنین کنترل آن در شرایط عملکردی ناپایدار انجام دادند. آنها از معادلات بقای صفر بعدی برای محاسبات عملکردی اجزای موتور در شرایط پایدار و

سیکل را بیشینه و نیز هزینه‌های مطرح‌شده را کمینه کند. عسگری و همکاران [۲۰] سیستم شبکه‌ی عصبی مصنوعی را برای تحلیل یک توربین گاز تک محوره مورد بررسی قرار دادند. آنها یک کد کامپیوتری جامع، برای این شبکه ایجاد کردند. کد آنها شامل توابع آموزش متفاوت، تعداد مختلفی از نورون‌ها و همچنین توابع انتقال متفاوت برای لایه‌های پنهانی و خروجی شبکه بود. آنها نشان دادند که تابع آموزش trainlm در مقایسه با توابع آموزش دیگر، توانایی بالایی برای مینیمم کردن خطا<sup>۱۴</sup> دارد.

همچنین فعالیت‌هایی در زمینه به‌کارگیری روش رگرسیون برای بررسی و تحلیل موتور توربین گاز انجام شده است. مومن و همکاران [۲۱] در زمینه بهینه‌سازی پارامترهای موتور توربین گاز با استفاده از روش رگرسیون چندجمله‌ای مطالعه‌ای انجام دادند. آنها اثر پارامترهای عملکردی مهم از قبیل دمای ورودی کمپرسور، دمای ورودی توربین و نسبت فشار را بر عملکرد کلی موتور و مقدار دی‌اکسیدکربن مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور از روش رگرسیون چندجمله‌ای استفاده کردند تا ارتباط بین خصوصیات عملکردی (از قبیل توان خالص خروجی، مصرف سوخت، بازده انرژی و مقدار دی‌اکسید کربن) و پارامترهای عملکردی مذکور را به‌دست آورند و در نهایت توانستند که پارامترهای عملکردی را بهینه کنند.

نکته‌ای که باید به آن توجه شود اهمیت بررسی و تعیین دمای گاز خروجی از توربین است که در مطالعه حاضر نیز به آن پرداخته شده است. دمای گاز خروجی از توربین یکی از تعیین‌کننده‌ترین پارامترها در یک توربین گاز می‌باشد. علت این امر نیز آن است که دماهای بالاتر برای توربین منجر به کاهش عمر موتور و نیز خرابی‌های جبران‌ناپذیر در توربین گاز می‌شود [۲۲]. همچنین به‌دلیل محدودیت‌هایی که در اندازه‌گیری دما در ورودی توربین وجود دارد، بعضاً از دمای گاز خروجی از توربین برای پیش‌بینی دمای گاز در ورودی توربین استفاده می‌شود [۲۲-۲۳]. تحقیقاتی نیز در مورد تأثیر پارامترهای مختلف بر مقدار دمای گاز خروجی از توربین انجام شده است. رحمان [۲۴] نشان داد که با تخلیه هوا از کمپرسور توربین مجبور خواهد شد که با دبی جرمی کمتری عمل کند و در عین حال کار مورد نیاز کمپرسور را تأمین کند. این امر باعث ایجاد دمای بالاتر برای ورودی توربین شده و در نتیجه مقدار دمای گاز خروجی از توربین افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین نشان داده شد که دمای

نیز از خواص متوسط برای در نظر گرفتن آثار ناپایداری استفاده کردند.

در برخی از مطالعات نیز به بررسی و طراحی موتورهای میکروجت و اجزای آن پرداخته شده است [۹-۱۰]. بنینی و گیاکومتی [۹] فعالیت‌هایی را روی طراحی، ساخت و عملکرد یک موتور توربوجت کوچک انجام دادند. موتوری که آنها طراحی کردند، یک موتور توربوجت کوچک با قابلیت تولید تراست ۲۰۰ نیوتن بود. موتور طراحی‌شده شامل یک کمپرسور گریز از مرکز تک‌مرحله‌ای با نسبت فشار ۲/۶۶:۱ در دور عملکردی ۶۰۰۰۰ دور بر دقیقه، یک محفظه احتراق دایروی جریان مستقیم و یک توربین محوری تک‌مرحله‌ای با دمای ورودی ۹۵۰ درجه کلوین بود [۹]. بیاتلو [۱۰] نیز به تحلیل و طراحی اثرودینامیکی کمپرسور و توربین یک میکروجت پرداخته است. او با استفاده از شبیه‌سازی توانست مثلث‌های سرعت و هندسه سه‌بعدی پرها را استخراج کند. همچنین با حل معادلات ناویر استوکس در نرم‌افزار CFX توانست منحنی‌های مشخصه کمپرسور و توربین و نیز خط عملکردی موتور را استخراج کند.

تعداد دیگری از مطالعات، استفاده از هوش مصنوعی<sup>۱۵</sup> را در بررسی موتورهای توربین گاز نشان می‌دهند [۱۴-۲۰] که در مطالعه حاضر نیز دو نوع از این شبکه‌ها، که کاربرد زیادی در زمینه تخمین توابع دارند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در تعدادی از این مطالعات از شبکه‌های پیشرو<sup>۱۶</sup> پرسپترون چندلایه و شبکه عصبی شعاعی، برای اهداف تخمین توابع و شناسایی الگو استفاده شده است [۱۴-۱۵]. بارتولینی و همکاران [۱۸] در زمینه کاربرد شبکه‌های عصبی در میکروتوربین‌های گازی، فعالیت‌هایی را انجام دادند. آنها از روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند تا منحنی‌های عملکردی برای داده‌های آزمایشگاهی، که در دسترس نبودند را کامل کنند، تأثیر پارامترهای محیطی را بر عملکرد موتور بررسی کنند و همچنین انتشار آلاینده‌ها در خروجی موتور را تحلیل نمایند. آنها حساسیت رفتار موتور در شرایط محیطی مختلف را نیز مورد بررسی قرار دادند. شرفی [۱۹] با استفاده از الگوریتم ژنتیک مطالعاتی را در زمینه بهینه‌سازی سیکل میکروتوربین گاز انجام داده است. او با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک، سیکل میکروتوربین گازی را از لحاظ هزینه اقتصادی، مصرف انرژی و هزینه آلاینده‌های محیط زیست بهینه‌سازی کرد و با انجام این کار توانست بازده قانون اول و دوم ترمودینامیکی

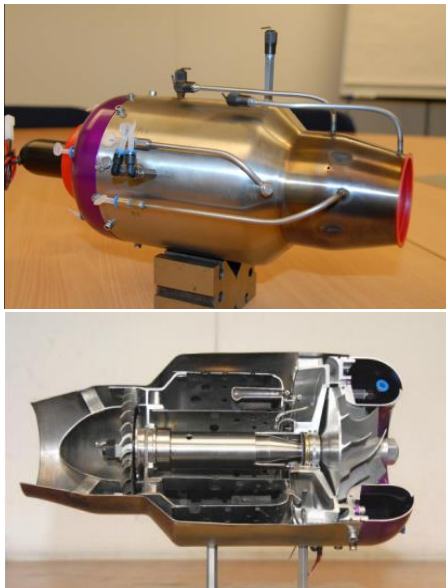
محیطی بالاتر منجر به افزایش دمای گاز خروجی از توربین می‌گردد [۲۴].

به‌طور کلی اهمیت بررسی دمای گاز خروجی از توربین و تأثیر آن بر عملکرد موتور توربین گاز به‌عنوان یک پارامتر کلیدی به وضوح مشخص است [۲۲-۲۴]. بر مبنای تحقیقات ذکر شده و با در نظر گرفتن توانایی بالای روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون جهت مطالعه و پیش‌بینی پارامترهای عملکردی موتور توربین گاز، استفاده از این روش‌های داده‌کاوی برای بررسی پارامترهای ترمودینامیکی و گاز دینامیکی موتور توربین گاز می‌تواند زمینه تحقیقاتی مناسبی باشد. هدف از این مطالعه آن است که تغییرات دمای گاز خروجی از توربین موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی آلیمپوس با استارت الکتریکی بر حسب تغییرات پارامتر دور عملکردی موتور با استفاده از روش‌های شبکه عصبی پرسپترون یک‌لایه و دولایه و همچنین شبکه عصبی شعاعی به‌همراه روش آماری رگرسیون چندجمله‌ای بررسی و نتایج حاصل از به‌کارگیری این روش‌ها با یکدیگر مقایسه شود. نوآوری این پژوهش در آن است که تاکنون روی این موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی همراه با استارت الکتریکی هیچ‌گونه مطالعه داده‌کاوی (در قالب استفاده از روش‌های آماری و هوش مصنوعی) صورت نگرفته و انجام این مطالعه روی موتور مذکور برای اولین بار انجام شده است.

## ۲. مجموعه موتور آزمایشگاهی مورد مطالعه

در بررسی حاضر از موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی آلیمپوس با استارت الکتریکی که در برخی از مطالعات گذشته نیز [۳-۶] به‌کار رفته استفاده شده است. در شکل ۱ تصاویری از موتور میکروتوربین گاز مورد استفاده در این مطالعه نمایش داده شده است. این موتور در مراکز تحقیقاتی و دانشگاه‌ها برای انجام فعالیت‌های آزمایشگاهی و تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲] و ماکزیمم تراستی معادل با ۲۳۰ نیوتن ایجاد می‌کند. موتور مذکور از یک کمپرسور تک‌مرحله‌ای شعاعی، یک محفظه احتراق دایروی با جریان مستقیم، یک توربین محوری تک‌مرحله‌ای و یک نازل برای ایجاد تراست تشکیل شده است [۲۵]. تمامی بلبرینگ‌های جلویی و عقبی موتور نیز با استفاده از سیستم سوخت‌رسانی، روانکاری و خنک‌کاری می‌شوند و بنابراین موتور به هیچ سیستم روان‌کاری مجزا و یا محفظه روغن احتیاجی ندارد.

مدت زمان مورد نیاز برای این که سرعت موتور افزایش یا کاهش پیدا کند به‌طور مستقیم به دبی جرمی هوای مکیده شده به داخل موتور بستگی دارد [۲۵]. پارامترهای مختلف موتور توسط یک واحد کنترل<sup>۱۵</sup> نظارت می‌شوند. این واحد کنترل از نوع تمام خودکار است و انرژی خود را از باتری پمپ سوخت تأمین می‌کند. واحد کنترل با استفاده از نرم‌افزارهای از قبل برنامه‌ریزی شده، عملکرد بهینه موتور را کنترل می‌کند. واحد کنترل دارای دو ورودی با نام‌های عملگر تغییر دور موتور<sup>۱۶</sup> و کانال سوئیچ<sup>۱۷</sup> می‌باشد که این دو ورودی توسط کاربر تغییر داده می‌شوند و سایر موارد نظیر پمپ سوخت و شیرهای کنترلی، توسط واحد کنترل نظارت می‌شوند [۲۵].



شکل ۱. تصاویری از موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی

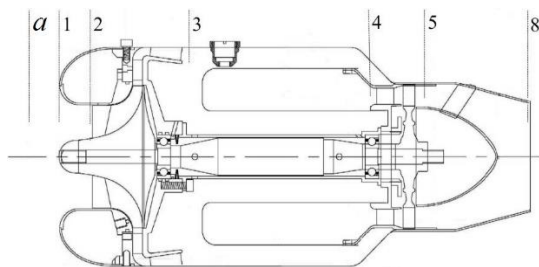
مورد استفاده در این مطالعه [۲۵]

سوخت مورد استفاده در موتور کراسین<sup>۱۸</sup> است و چون اجزای داخلی نظیر بلبرینگ‌ها باید روانکاری شوند، این سوخت قبل از استفاده با ۴/۵ درصد روغن آئروشل<sup>۱۹</sup> ۵۰۰ ترکیب می‌شود. سیستم احتراق موتور دارای یک جرقه‌زن ۱۲ ولتی است. موقعیت قرارگیری جرقه‌زن به این صورت است که از سمت نازل خروجی در ساعت ۲ قرار گرفته است [۲۵]. به‌عبارت دیگر، با در نظر گرفتن نمای دید از پشت نازل و با توجه به جهت چرخش عقربه‌های ساعت، جرقه‌زن در موقعیت ساعت ۲ قرار گرفته است (عموماً محل اتصال موتور به چهارچوب تست در ساعت ۱۲ در نظر گرفته می‌شود). این موتور همچنین دارای یک ترمینال

موتور بسته (غیرفعال) است. این دور برای هر موتور به اندازه‌ای است که تنها قدرت لازم جهت کارکرد سیستم‌های جانبی نظیر پمپ سوخت و روغن را تأمین کند و در این دور قدرت لازم جهت ایجاد حرکت (تراست منجر به حرکت) تولید نمی‌شود.

### ۳. تحلیل ترمودینامیکی موتور آزمایشگاهی

در راستای تحلیل ترمودینامیکی موتور مربوطه، نمایی شماتیک از مقطع طولی موتور در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، a مربوط به شرایط محیطی، 1 مربوط به ورودی موتور، 2 مربوط به ورودی کمپرسور، 3 مربوط به خروجی کمپرسور و ورودی به محفظه احتراق، 4 مربوط به خروجی محفظه احتراق و ورودی به توربین، 5 مربوط به خروجی از توربین و 8 مربوط به خروج از نازل است [۶].



شکل ۳. مقطع طولی موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی مورد مطالعه

لازم به ذکر است برای تحلیل ترمودینامیکی موتور موردنظر، با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام‌شده، دمای سکون ورودی توربین (دمای سکون خروجی محفظه احتراق) برابر با ۸۸۵ درجه سلسیوس (۱۱۵۸ کلوین) در نظر گرفته شده است. همچنین با در نظر گرفتن شرایط استاندارد، مقادیر زیر برای انجام محاسبات مربوطه در نظر گرفته شده‌اند:

$$T_{am} = T_a = 298.15K$$

$$P_{am} = P_a = 100KPa$$

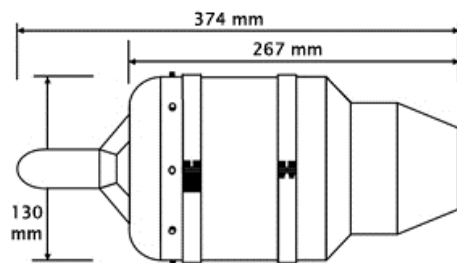
$$\gamma_a = 1.4$$

$$\rho_a = 1.27 \frac{Kg}{m^3}$$

$$R = 287.05 \frac{J}{Kg - K}$$

باید توجه شود که برای انجام محاسبات، مقادیری نظیر نسبت فشار کمپرسور، از جدول ۱ استخراج می‌شوند که این اطلاعات در دور ماکزیمم موتور ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که اندیس‌های موجود در روابط، با توجه به شکل ۳ در نظر گرفته شده‌اند.

نمایشگر<sup>۲۰</sup> برای نمایش داده‌های عملکردی موتور است. این نمایشگر برای ارائه داده‌ها به کاربر، به درگاه واحد کنترل متصل است. همچنین در شکل ۲ نمایی شماتیک از ابعاد موتور مربوطه نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۲، طول کلی موتور ۳۷۴ میلی‌متر، طول قسمت ورودی موتور تا خروجی نازل آن، ۲۶۷ میلی‌متر و قطر خارجی موتور، ۱۳۰ میلی‌متر است. باید توجه داشت که قطر خارجی ۱۳۰ میلی‌متر، شامل قلاب‌ها و اتصالات خارجی نظیر جرقه‌زن نمی‌شود. سایر مشخصات موتور در جدول ۱ ارائه شده‌اند [۲۵].



شکل ۲. نمای شماتیک و ابعاد موتور میکروتوربین

گاز آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه [۲۵]

جدول ۱. مشخصات موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی

مورد استفاده در این مطالعه در شرایط دما و فشار استاندارد [۲۵]

مقدار	پارامترهای مربوط به موتور
۲۹۰۰ گرم	وزن خالص موتور
۳۸۴۵ گرم	وزن موتور همراه با تجهیزات وابسته (باتری، واحد کنترل، پمپ، شیرهای برقی، حسگرها و فیش‌های به‌کار گرفته شده)
۲۳۰ نیوتن	تراست در دور ماکزیمم
۱۰۸۵۰۰ دور بر دقیقه	دور ماکزیمم
۳۶۰۰۰ دور بر دقیقه	دور بی‌باری
۳/۸:۱	نسبت فشار در دور ماکزیمم
۴۵۰ گرم بر ثانیه	دبی جرمی در دور ماکزیمم
۷۵۰ درجه سانتی‌گراد	ماکزیمم دمای گاز خروجی از توربین
۶۴۰ گرم بر دقیقه	مصرف سوخت در دور ماکزیمم

گفتنی است برای موتورهای یک دور ایده‌آل تعریف می‌شود که منظور از این دور، دور بی‌باری است. در این دور، عملگر تغییر دور

### ۳-۱. مدل دیفیوزر

فرض می‌شود  $\gamma_d = 1.3997$  و  $\pi_d = 0.92$  که  $\pi_d$  نسبت فشار دیفیوزر است. روابط ترمودینامیکی دیفیوزر به صورت زیر می‌باشند [۲۶]:

$$a_a = \sqrt{\gamma_a R T_a} \quad (۱)$$

$$a_a = 346.147 \frac{m}{s}$$

$$\dot{m} = \rho_a A_1 u_a \quad (۲)$$

در جدول ۱ مقدار  $A_1$  برابر با  $0.1327$  متر مربع است. با توجه به اینکه در رابطه ۲ مقدار تمامی پارامترها به غیر از  $u_a$  معلوم است، لذا:

$$u_a = 27.68 \frac{m}{s}$$

$$M_a = \frac{u_a}{a_a} \quad (۳)$$

با جایگذاری مقادیر  $u_a$  و  $a_a$ ، مقدار  $M_a = 0.077$  به دست خواهد آمد که عدد ماخ در ورودی موتور است.

$$\frac{T_{t_a}}{T_a} = \left[1 + \frac{\gamma_d - 1}{2} M_a^2\right] \quad (۴)$$

تنها مجهول این رابطه  $T_{t_a}$  است که با جایگذاری  $29.5/50.3$  کلون به دست خواهد آمد.

$$\frac{P_{t_a}}{P_a} = \left[\frac{T_{t_a}}{T_a}\right]^{\frac{\gamma_d}{\gamma_d - 1}} \quad (۵)$$

در رابطه ۵ نیز  $P_{t_a}$  مجهول است که با جایگذاری مقادیر معلوم  $P_{t_a} = 100.415 KPa$  به دست می‌آید. از طرفی، دیفیوزر آدیاباتیک در نظر گرفته می‌شود [۲۶]:

$$T_{t_2} = T_{t_a} = 298.503 K \quad (۶)$$

$$\frac{P_{t_2}}{P_a} = \frac{P_{t_2}}{P_{t_a}} \frac{P_{t_a}}{P_a} = \pi_d \times \frac{P_{t_a}}{P_a} \quad (۷)$$

با توجه به رابطه ۷ و جایگذاری مقادیر معلوم می‌توان نوشت:

$$P_{t_2} = 92.382 KPa$$

### ۳-۲. مدل کمپرسور

فرض می‌شود  $\gamma_c = 1.3805$  و  $\eta_c = 0.88$  که  $\eta_c$  بازده کمپرسور است. روابط ترمودینامیکی کمپرسور به صورت زیر می‌باشند [۲۶]:

$$P_{t_3} = \pi_c P_{t_2} \quad (۸)$$

با توجه به جدول ۱، نسبت فشار کمپرسور  $3/8$  است، لذا  $P_{t_3} = 351.052 KPa$  به دست خواهد آمد.

$$\tau'_c = \frac{T'_{t_3}}{T_{t_2}} = \pi_c^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c}} \quad (۹)$$

که در این رابطه  $T'_{t_3}$  دمای خروجی ایده‌آل کمپرسور و  $\tau'_c$  نسبت دمای ایده‌آل کمپرسور است. با جایگذاری مقادیر معلوم در این رابطه  $T'_{t_3} = 431.337 K$  به دست می‌آید.

$$\eta_c = \frac{T'_{t_3} - T_{t_2}}{T_{t_3} - T_{t_2}} \quad (۱۰)$$

در رابطه ۱۰، مقدار  $T_{t_3}$  مجهول است که با جایگذاری برابر است با:

$$T_{t_3} = 449.451 K$$

### ۳-۳. مدل محفظه احتراق

برای این منظور فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\pi_b = 0.95$$

$$c_{pb} = 1.143 \frac{KJ}{Kg - K}$$

$$\eta_b = 0.91$$

به طوری که  $\pi_b$  نسبت فشار محفظه،  $c_{pb}$  گرمای ویژه در فشار ثابت برای محفظه احتراق و  $\eta_b$  بازده محفظه احتراق است. روابط ترمودینامیکی محفظه احتراق به صورت زیر می‌باشند [۲۶]:

$$P_{t_4} = \pi_b P_{t_3} \quad (۱۱)$$

با در نظر گرفتن رابطه ۱۱، مقدار  $P_{t_4} = 333.499 KPa$  به دست خواهد آمد. همچنین مقدار  $T_{t_4}$  در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است که مقدار آن  $T_{t_4} = 1158 K$  می‌باشد.

$$\Delta H \eta_b \dot{m}_f = \dot{m}_c c_{pb} [T_{t_4} - T_{t_3}] + \dot{m}_f c_{pb} T_{t_4} \quad (۱۲)$$

در رابطه ۱۲  $\dot{m}_f$  دبی سوخت مصرفی و  $\Delta H$  ارزش حرارتی سوخت است که برای کراسین در حدود  $۱۳۵۰۰۰$  بی. تی. یو. بر گالن (معادل  $۳۷۶۲۸/۵۲$  کیلوژول بر کیلوگرم) می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار تمامی پارامترها معلوم است، لذا:

$$\dot{m}_f = 0.011071 \frac{Kg}{s} = 664.26 \frac{g}{min}$$

### ۳-۴. مدل توربین

برای این منظور فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\gamma_t = 1.3233$$

$$c_{pt} = 1.143 \frac{KJ}{Kg - K}$$

$$\eta_t = 0.85$$

$$\eta_m = 0.995$$

به طوری که  $c_{pt}$  گرمای ویژه در فشار ثابت برای توربین،

$\eta_t$  بازده توربین و  $\eta_m$  بازده مکانیکی است. روابط

ترمودینامیکی توربین به صورت زیر می‌باشند [۲۶]:

$$\dot{m} c_{pc} [T_{t_3} - T_{t_2}] = \eta_m (\dot{m} + \dot{m}_f) c_{pt} [T_{t_4} - T_{t_5}] \quad (۱۳)$$

در رابطه ۱۳،  $c_{pc}$  گرمای ویژه در فشار ثابت برای کمپرسور

است که مقدار آن برابر با ۱/۰۴۱ کیلوژول بر کیلوگرم کلونین در

نظر گرفته شده است. تنها مقدار مجهول در این رابطه،  $T_{t_5}$

می‌باشد که با جایگذاری، مقدار ۷۵۱/۹۷۵ درجه سانتی‌گراد

به دست خواهد آمد. این مقدار با دمای ارائه شده در جدول ۱ با

تقریب مناسبی مطابقت دارد. گفتنی است  $T_{t_5}$  در واقع همان

دمای گاز خروجی از توربین موتور می‌باشد.

$$\eta_t = \frac{T_{t_4} - T_{t_5}}{T_{t_4} - T_{t_5}'} \quad (۱۴)$$

با جایگذاری در رابطه ۱۴، مقدار  $T_{t_5}' = 1001.676K$

به دست خواهد آمد.

$$P_{t_5} = P_{t_4} \left[ \frac{T_{t_5}'}{T_{t_4}} \right]^{\frac{\gamma_t}{\gamma_t - 1}} \quad (۱۵)$$

با جایگذاری مقادیر معلوم در این رابطه، مقدار

$$P_{t_5} = 184.091KPa$$

به دست می‌آید.

### ۳-۵. مدل نازل

برای این منظور فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\gamma_n = 1.3368$$

$$\eta_n = 0.96$$

$$c_{pn} = 1.118 \frac{KJ}{Kg - K}$$

به طوری که  $\eta_n$  بازده نازل و  $c_{pn}$  گرمای ویژه در فشار ثابت

برای نازل است. ابتدا باید وجود یا عدم وجود شوک در نازل

بررسی شود [۲۶].

$$P_8^* = P_{t_5} \times \left[ 1 + \frac{1 + \gamma_n}{\eta_n \times (1 + \gamma_n)} \right]^{\frac{\gamma_n}{\gamma_n - 1}} \quad (۱۶)$$

با جایگذاری در رابطه ۱۶  $P_8^* = 96.5196KPa$  به دست

می‌آید. چون  $P_8^* < P_a$  است، نازل دچار شوک نشده، لذا

$$P_8 = P_a = 100KPa \text{ و } M_8 < 1.$$

$$T_8' = T_{t_5} \left[ \frac{P_8}{P_{t_5}} \right]^{\frac{\gamma_n - 1}{\gamma_n}} \quad (۱۷)$$

با جایگذاری در رابطه ۱۷،  $T_8' = 870.379K$  به دست

می‌آید.

$$\eta_n = \frac{T_{t_5} - T_8}{T_{t_5} - T_8'} \quad (۱۸)$$

از رابطه ۱۸ می‌توان نتیجه گرفت که  $T_8 = 876.568K$

می‌باشد. حال سرعت گازهای خروجی از موتور ( $u_8$ ) محاسبه

می‌شود [۲۶].

$$u_8 = \sqrt{2c_{pn}(T_{t_5} - T_8)} \quad (۱۹)$$

با توجه به رابطه بالا، سرعت گازهای خروجی از موتور برابر با

۵۷۶/۳۴۵ متر بر ثانیه به دست می‌آید. همچنین قطر نازل خروجی

برابر با ۵۰ میلی‌متر می‌باشد، لذا سطح مقطع نازل خروجی برابر با

$$A_8 = \frac{\pi}{4} (0.05)^2 = 1.96 \times 10^{-3} m^2$$

می‌باشد. در نهایت

رابطه تراست با معادله ۲۰ بیان می‌شود:

$$F = (\dot{m} + \dot{m}_f) \times u_8 - \dot{m} u_8 + A_8 (P_8 - P_a) \quad (۲۰)$$

با توجه به رابطه ۲۰، مقدار تراست برابر با ۲۵۳/۲۸ نیوتن

به دست خواهد آمد. در مجموع با توجه به مقادیر مربوط به مصرف

سوخت، دمای گاز خروجی از توربین و تراست به دست آمده از

تحلیل ترمودینامیکی و مقایسه آنها با مقادیر ارائه شده در جدول ۱

ملاحظه می‌شود که این مقادیر تفاوت چندانی با هم نداشته و لذا

تحلیل ترمودینامیکی انجام شده توانسته است موتور آزمایشگاهی

موردنظر را با دقت مناسبی مدل نماید.

### ۴. شرایط عملکردی میکروتوربین گاز آزمایشگاهی

در این مطالعه، فرایند مربوط به استارت الکتریکی، تغییر دور موتور

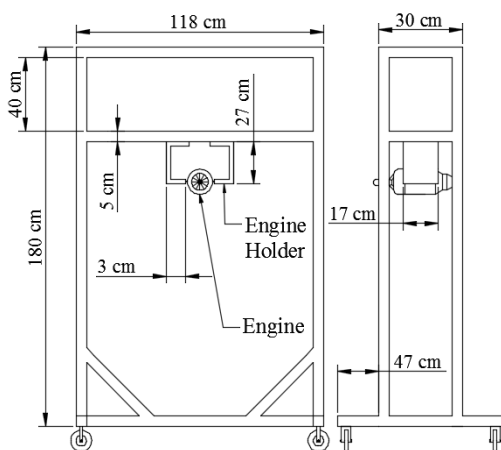
و همچنین فرایند خاموش شدن موتور، به صورت کامل در نظر

گرفته شده است. در این راستا، آزمایش‌های تجربی روی موتور

میکروتوربین گاز آزمایشگاهی الیمپوس با استارت الکتریکی و با

در نظر گرفتن دور عملکردی در محدوده صفر تا ۱۰۸۰۰۰ دور بر

با توجه به شکل ۵ ارتفاع کلی تست استند، حدود ۱۸۰ سانتی‌متر است و موتور در ارتفاعی در حدود ۱۱۳ سانتی‌متر از بستر آزمایشگاه به استند متصل می‌گردد. ارتفاع موتور از بستر آزمایشگاه به‌گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که امکان تخلیه محصولات احتراق موتور از طریق هود آزمایشگاه وجود داشته باشد. سوخت مورد استفاده در موتور، کراسین می‌باشد و چون اجزای داخلی نظیر بلبرینگ‌ها باید روانکاری شوند، این سوخت قبل از استفاده با ۴/۵ درصد روغن آروشل ۵۰۰ ترکیب می‌شود. سوخت مورد نظر، با استفاده از لوله‌ای به طول ۱۰۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۴ میلی‌متر که بین مخزن سوخت و پمپ سوخت قرار گرفته است، با استفاده از مکش پمپ سوخت، به موتور منتقل می‌شود [۲۵]. گنجایش مخزن سوخت در حدود یک گالن می‌باشد. تست استند مورد نظر، دارای یک لود سل می‌باشد که برای اندازه‌گیری تراست استفاده می‌شود. چون هدف مطالعه حاضر آن است که دمای گاز خروجی از توربین موتور اندازه‌گیری شود و با مقادیر پیش‌بینی شده توسط روش‌های شبکه عصبی و رگرسیون چندجمله‌ای مقایسه گردد، لذا در این مطالعه مقدار تراست اندازه‌گیری نشده است، اما در اولویت مطالعات آینده قرار خواهد داشت. منبع تغذیه مورد استفاده برای فراهم‌نمودن برق مورد نیاز موتور و ملحقات آن از نوع لیتیوم - پلیمر می‌باشد. در مرحله استارت موتور، حداقل ولتاژ مورد نیاز، ۱۴/۸ ولت می‌باشد.



شکل ۵. شماتیک و ابعاد چارچوب تست موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه

برای نمایش داده‌های مورد نظر به کاربر از یک ترمینال نمایشگر (EDT) استفاده می‌شود. قبل از شروع به کار موتور، باتری EDT (که یک باتری مجزا از سیستم منبع تغذیه موتور

دقیقه انجام شد. این آزمایش‌ها به‌گونه‌ای انجام گرفته‌اند که از محدوده‌های مجاز تعریف‌شده برای دور و دمای گاز خروجی (همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است)، تجاوز نکند. لازم به‌ذکر است که آزمایش‌های مربوطه، در شرایط دما و فشار استاندارد (دمای ۲۵ درجه سلسیوس و فشار ۱ اتمسفر)، انجام گرفته‌اند. داده‌های مربوط به دمای گاز خروجی از توربین موتور، با استفاده از یک ترموکوپل نوع k که در خروجی توربین قرار گرفته است، به‌دست آمده‌اند. نحوه قرارگیری این ترموکوپل به‌گونه‌ای است که سر ترموکوپل حدود ۸ میلی‌متر در دیواره نازل پشت توربین به درون جریان وارد شده است. اگر مقدار فرورفتگی ترموکوپل در دیواره کمتر از این مقدار باشد، اندازه‌گیری دماها با خطا همراه خواهد شد [۲۵]. باید گفته شود که با در نظر گرفتن نمای دید از پشت نازل، ترموکوپل در موقعیت ساعت ۹ قرار گرفته است [۲۵]. جهت حصول اطمینان از دقت داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده مربوط به دمای گاز خروجی از توربین و اطمینان از تکرارپذیری داده‌ها، آزمایش‌های مربوطه برای پنج مرتبه تکرار شد و مقدار متوسط دمای گاز خروجی اندازه‌گیری شده از توربین، مبنای مطالعات بعدی قرار گرفت. همچنین خطای اندازه‌گیری دمای گاز خروجی از توربین در مطالعه حاضر، زیر ۷ درصد می‌باشد. در شکل ۴ موتور میکروتوربین گاز به‌کار برده شده در مطالعه حاضر همراه با چارچوب تست<sup>۲۱</sup> آن نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۵ نمای شماتیک مربوط به چارچوب تست موتور، به همراه ابعاد و بخش‌های مختلف آن ترسیم شده است (البته این شکل به مقیاس واقعی ترسیم نشده است).



شکل ۴. تصاویر موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی مورد استفاده در مطالعه حاضر به همراه چارچوب تست آن



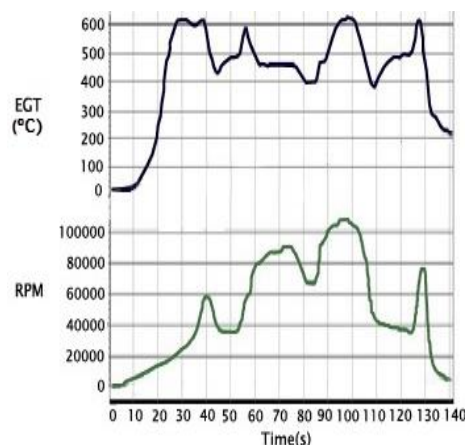
شکل ۶ تمامی مراحل مربوط به انجام تست، از زمان استارت تا خاموش شدن موتور را نمایش می‌دهد. موتور مذکور یک مرحله استارت (از زمان صفر تا حدود ۵۰ ثانیه) و یک مرحله خاموش شدن (از زمان حدود ۱۱۰ تا ۱۴۰ ثانیه) دارد که این دو مرحله به وسیله استارتر الکتریکی موتور و به صورت خودکار انجام می‌گیرند. بقیه مراحل انجام تست (افزایش و کاهش دور)، توسط کاربر انجام شده و همان گونه که قبلاً گفته شد برای اطمینان از تکرارپذیری داده‌های اندازه‌گیری شده، آزمایش‌ها برای پنج مرتبه تکرار شده‌اند. در مورد برنامه انجام تست (از زمان حدود ۵۰ تا حدود ۱۱۰ ثانیه) باید گفته شود که در طول این بازه زمانی دو مرحله افزایش دور ناگهانی به موتور داده شده است. مطابق شکل ۶ در مرحله اول دور موتور تا ۹۰۰۰۰ دور بر دقیقه بالا برده شد و سپس تا ۶۵۰۰۰ دور بر دقیقه کاهش یافت. سپس در مرحله دوم مجدداً دور موتور تا ۱۰۸۰۰۰ دور بر دقیقه افزایش پیدا کرد و بعد از آن عملکرد تغییر دور موتور بسته شد که منجر به عملکرد موتور در شرایط بی‌باری می‌شود. در نهایت نیز موتور، فرایند خاموش شدن را طی نمود. در واقع هدف از این مطالعه، بررسی تغییرات دمای گاز خروجی از توربین موتور در حین افزایش یا کاهش دور نیز بوده است. به عبارت دیگر، در مطالعه حاضر، پیش‌بینی دینامیک دمای گاز خروجی از توربین با در نظر گرفتن رفتار دائمی و گذرای موتور مد نظر بوده است.

قبل از استارت موتور، منبع تغذیه (که یک باتری لیتیوم - پلیمر است) باید به صورت کامل شارژ شده باشد تا حداکثر انرژی ممکن برای راه‌اندازی استارتر الکتریکی و جرقه‌زن برای یک استارت مطمئن مهیا شود. برای استارت موتور، ابتدا واحد کنترل، فرمان استارت را به استارتر الکتریکی ارسال کرده و استارتر نیز دور موتور را به ۳۰۰۰ دور بر دقیقه می‌رساند (که با توجه به شکل ۶ این فرایند تا حدود ۵۰ ثانیه طول می‌کشد). در این هنگام پمپ سوخت که با محور موتور کوپل می‌باشد، شروع به کار کرده و شیر سلونوئیدی سوخت ارسالی به سیستم جرقه‌زن نیز فعال می‌شود. زمانی که دمای گاز خروجی از توربین موتور به اندازه ۵ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرد، شیر اصلی سوخت باز شده و استارتر الکتریکی، دور موتور را به حداکثر مقدار خود در شروع (حدود ۵۵۰۰۰ دور بر دقیقه) می‌رساند [۲۵]. سپس واحد کنترل به صورت خودکار دور موتور را به ۳۶۰۰۰ دور بر دقیقه (که دور بی‌باری موتور می‌باشد) کاهش می‌دهد. سرانجام موتور، آماده اجرای

است) باید به صورت کامل شارژ شود که مدت زمان مورد نیاز برای این کار ۱۵ ساعت می‌باشد. برای حفظ ایمنی کاربر در هنگام تست، حداقل فاصله کاربر از جلو و پشت موتور، به ترتیب ۱ متر و ۱۲ متر می‌باشد [۲۵]. با رعایت فواصل مذکور کاربر می‌تواند با استفاده از اهرم تغییر دور، دور موتور را افزایش یا کاهش داده و تست‌های مورد نظر را انجام دهد. برای نصب موتور بر روی چهارچوب، از یک نگهدارنده<sup>۲۲</sup> استفاده می‌شود که ابعاد آن در شکل ۵ نشان داده شده است. این نگهدارنده با استفاده از اتصالات پیچ و مهره به چهارچوب تست وصل می‌شود. همچنین مواردی نظیر واحد کنترل (ECU)، کابل‌های ارتباطی و سایر ملحقات موتور (نظیر شیرهای سلونوئیدی<sup>۲۳</sup> در مسیر ارسال سوخت به موتور)، به تست استند متصل می‌شوند.

## ۵. نتایج و بحث

در شکل ۶ تغییرات دمای گاز خروجی از توربین و دور عملکردی موتور نمایش داده شده است. علت نمایش دمای گاز خروجی و دور موتور به صورت جداگانه برحسب زمان این است که سیستم اخذ اطلاعات موتور، پارامترهای عملکردی موتور را برحسب زمان اندازه‌گیری می‌کند. در واقع به دلیل کاهش دور موتور در طول برنامه انجام تست در مطالعه حاضر (از زمان حدود ۵۰ تا حدود ۱۱۰ ثانیه) و کاهش دمای گاز خروجی از توربین همراه با کاهش دور، ترسیم نمودار دمای گاز خروجی از توربین موتور برحسب دور عملکردی آن ممکن است درک مناسبی از رفتار موتور را ایجاد نکند. لذا در این مطالعه، ترسیم نمودار دمای گاز خروجی و دور عملکردی موتور برحسب زمان، انجام شده است.



شکل ۶. تغییرات دمای گاز خروجی از توربین و دور عملکردی موتور

برحسب زمان

هرگونه فرایند تست مورد نظر کاربر خواهد شد [۲۵]. در این مرحله می‌توان با استفاده از عملگر تغییر دور موتور، دبی سوخت ارسالی به موتور را تغییر داد و متعاقباً آزمایش‌های موردنظر را اجرا نمود. پس از اتمام فرایند تست مورد نظر کاربر (برنامه انجام تست)، فرایند خاموش‌شدن موتور به شکل زیر خواهد بود. برای خاموش‌نمودن موتور، واحد کنترل، دور موتور را به حدود ۴۰۰۰۰ دور بر دقیقه می‌رساند. سپس واحد کنترل، همزمان با قطع مسیر سوخت ارسالی به موتور (ارسال فرمان بسته شدن شیر اصلی سوخت)، به‌وسیله استارتر الکتریکی چندین بار دور محور موتور را (بدون سوخت) افزایش و کاهش می‌دهد. در این شرایط به‌دلیل عدم وقوع احتراق در موتور، هوای ورودی به کمپرسور، محفظه احتراق و توربین سبب می‌شود که دمای گاز خروجی از توربین موتور، در نهایت به زیر ۸۸ درجه سانتی‌گراد برسد. سپس واحد کنترل، از نظر الکتریکی نیز فرمان خاموش‌شدن موتور را صادر می‌کند و عملاً استارتر الکتریکی و سایر ملحقات الکتریکی موتور، غیرفعال می‌شوند [۲۵]. علت افزایش و کاهش دور محور موتور به‌وسیله استارتر الکتریکی بعد از قطع مسیر سوخت در فرایند خاموش‌شدن این است که موتور بتواند با مکش هوای محیط، فرایند خنک‌کاری توربین و محفظه احتراق را سریع‌تر طی کند و از ایجاد شوک دمایی بر روی پره‌های توربین، جلوگیری شود.

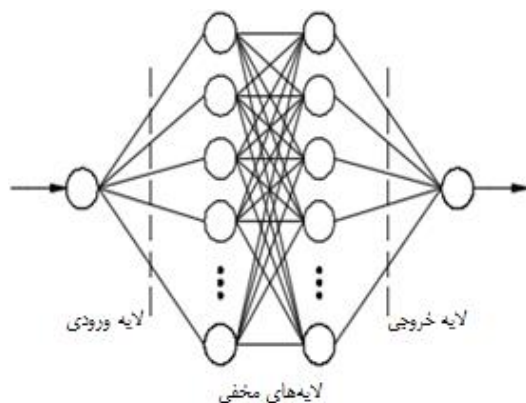
در مطالعه حاضر، ارتباط بین مقادیر دمای گاز خروجی از توربین موتور به‌عنوان مقدار خروجی اندازه‌گیری شده از موتور که وابسته به متغیر دور عملکردی به عنوان کمیت ورودی موتور می‌باشد، با دو رویکرد داده‌کاوی متفاوت (شبکه عصبی و رگرسیون چندجمله‌ای) مورد بررسی قرار گرفته است. برای نیل به این هدف، از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و شبکه عصبی شعاعی به‌همراه روش آماری رگرسیون چندجمله‌ای برای محاسبه و ارزیابی رابطه غیرخطی مابین کمیت ورودی و خروجی موتور و پیش‌بینی مقادیری از دمای گاز خروجی که داده‌های مرتبط با آن در فرایندهای آموزش به‌کار گرفته نشده بودند، استفاده گردید. از روش k-Fold [۲۷] برای انتخاب تصادفی زیرمجموعه‌ای از داده‌های مورد نیاز جهت پی‌ریزی و ارزیابی شبکه‌های عصبی و رگرسیون استفاده شد. رویکرد ارزیابی خطا برای روش‌های داده‌کاوی مذکور بر مبنای محاسبه و گزارش خطای جذر میانگین مربعات <sup>۲۴</sup> و ضریب تعیین <sup>۲۵</sup>  $(R^2)$  [۲۷] بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده دمای گاز خروجی از توربین شکل‌گرفته

است. بر مبنای این دو پارامتر ارزیابی، در مرحله استفاده از شبکه عصبی، کیفیت عملکرد انواع شبکه‌های عصبی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. چون روش رگرسیون و به‌خصوص روش شبکه عصبی از دقت خوبی برای پیش‌بینی رابطه غیرخطی بین پارامترهای مختلف برخوردار می‌باشند، از اینرو در این مطالعه از این دو روش استفاده شده است.

### ۵-۱. استفاده از شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی از عناصر عملیاتی ساده‌ای ساخته می‌شوند که به‌صورت موازی در کنار هم عمل می‌کنند. این عناصر از سیستم‌های عصبی زیستی الهام گرفته‌اند. در طبیعت، عملکرد شبکه‌های عصبی از طریق نحوه اتصال بین اجزاء تعیین می‌شود. بنابراین می‌توان یک ساختار مصنوعی به پیروی از شبکه‌های طبیعی به‌وجود آورد و با تنظیم مقادیر هر اتصال، تحت عنوان وزن اتصال، نحوه ارتباط بین اجزای آن را تعیین نمود [۳۱-۲۸]. ساختار کلی یک شبکه عصبی مصنوعی شامل موارد زیر است (این ساختار در شکل ۷ نمایش داده شده است):

۱. لایه ورودی: نورون‌های تشکیل‌دهنده این لایه به پارامترهای ورودی مسئله متصل می‌باشند و پردازش را روی داده‌های ورودی انجام می‌دهند.
۲. لایه‌های پنهان میانی: این لایه‌ها وظیفه اتصال بین پارامترهای لایه خروجی و پارامترهای لایه ورودی را برعهده دارند. با توجه به نوع پیچیدگی مسئله، تعداد آن می‌تواند از یک تا چند زیرلایه مخفی تغییر کند.
۳. لایه خروجی: نورون‌های موجود در این لایه، به پارامترهای خروجی (که پیش‌بینی آنها موردنظر است) متصل می‌شوند [۳۱-۲۸].



شکل ۷. ساختار کلی لایه‌های شبکه عصبی به کار رفته در مطالعه حاضر

خروجی آن می‌باشد. تعداد ۱ نورون برای لایه ورودی و ۱ نورون برای لایه خروجی آن در نظر گرفته شده است.

گفتنی است مقادیر مربوط به تعداد نورون‌ها در لایه‌های مخفی و همچنین نوع توابع به کار گرفته شده به عنوان توابع آموزش در لایه‌های مختلف شبکه‌های عصبی، به صورت سعی و خطا به دست آمده‌اند. به این صورت که برای به دست آوردن تعداد نورون‌های بهینه برای شبکه عصبی پرسپترون یک لایه و دو لایه، تعداد نورون‌ها از ۴ تا ۱۶ در نظر گرفته شدند و برای هر مورد، مقدار خطای جذر میانگین مربعات محاسبه گردید. در نهایت با مقایسه مقادیر خطای جذر میانگین مربعات، برای تعداد نورون‌های مختلف، تعداد ۱۰ نورون برای شبکه عصبی پرسپترون یک لایه و دو لایه، به عنوان تعداد نورون‌های بهینه در لایه‌های مخفی آن به دست آمد. مشابه با همین کار، برای شبکه عصبی شعاعی انجام گرفت و تعداد ۵۰ نورون به عنوان تعداد نورون بهینه در لایه مخفی آن به دست آمد. بر روی توابع آموزش نیز روندی مشابه با آنچه توضیح داده شد انجام گرفت و در نهایت توابع آموزش بهینه در لایه‌های مخفی شبکه پرسپترون و شبکه شعاعی، به ترتیب تابع سیگموید و تابع newrb به دست آمد. برای لایه خروجی شبکه‌های عصبی نیز در نهایت این نتیجه به دست آمد که تابع بهینه تابعی خطی می‌باشد. برای اعتبارسنجی نتایج شبکه عصبی از روش k-Fold استفاده شده است. این روش، یک روش توسعه یافته برای تحلیل صحت پیش‌بینی است. در این روش اعتبارسنجی، مجموعه داده‌ها به k بخش مجزا تقسیم می‌شوند. فرایند مدلسازی برای k مرتبه تکرار می‌شود و در هر مرتبه، از k-1 بخش از داده‌ها برای فرایند آموزش استفاده می‌شود و همچنین یک بخش از داده‌ها که در فرایند آموزش شرکت داده نشده‌اند، برای فرایند تست و اعتبارسنجی مدل پیش‌بینی کننده (که در این مطالعه چند روش شبکه عصبی به همراه روش رگرسیون می‌باشند)، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۷]. در انتها از خطای پیش‌بینی محاسبه شده در هر یک از k مرحله، متوسط‌گیری می‌شود. معیار ارزیابی عملکرد شبکه‌های عصبی بر مبنای محاسبه خطای جذر میانگین مربعات و ضریب تعیین در نظر گرفته شده است [۲۷]. تلاش صورت گرفته جهت معرفی مدل واجد شرایط برای توصیف ارتباط بین پارامترهای عملکردی این موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی بر این استوار است که مدل مذکور بتواند خطای پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین را کمینه

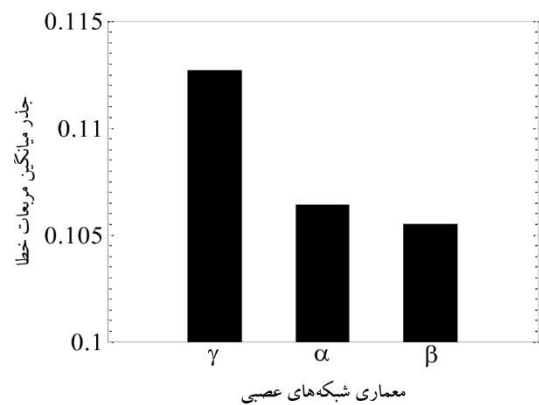
در واقع می‌توان گفت نورون عنصر اصلی یک شبکه عصبی به حساب می‌آید. خروجی نورون در شبکه عصبی ( $S_i$ )، با استفاده از تابعی از ورودی‌های شبکه ( $S_j$ ) به دست می‌آید که معادله آن به صورت ۲۱ است:

$$S_i = f(\sum w_{ij} S_j + b_i) \quad (21)$$

در این معادله  $f$  تابع انتقال نورون‌ها می‌باشد؛  $w_{ij}$  و  $b_i$  نیز به ترتیب، وزن و بایاس نورون می‌باشند. از توابع تبدیل مورد استفاده در ساختار شبکه‌های عصبی، می‌توان به توابع خطی<sup>۲۶</sup>، سیگموید<sup>۲۷</sup> و شعاعی<sup>۲۸</sup> اشاره نمود. توابع تبدیل مورد استفاده در نورون‌های شبکه عصبی با توجه به شرایط مسئله تعیین می‌شوند. اگر مسئله مورد بررسی یک مسئله خطی باشد می‌توان از توابع خطی استفاده کرد. در مواردی که مسئله مورد بررسی از نوع غیرخطی باشد باید از توابع غیرخطی استفاده شود تا دقت پیش‌بینی، افزایش یابد. پس از آموزش شبکه عصبی، اعمال یک ورودی خاص به آن منجر به دریافت پاسخی معین می‌شود. شبکه بر مبنای تطابق و هم‌سنجی بین ورودی و هدف سازگار می‌شود تا اینکه خروجی شبکه و خروجی مورد نظر (مقادیر هدف) بر هم منطبق گردند [۲۸-۳۱].

در این مطالعه، برای ایجاد یک شبکه عصبی مناسب جهت پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین، از سه ساختار متفاوت برای شبکه عصبی استفاده شده است. ساختار اول با نام شبکه آلفا ( $\alpha$ )، یک شبکه عصبی پرسپترون با یک زیرلایه مخفی به تعداد ۱۰ نورون و با اختصاص تابع تبدیل سیگموید برای نورون‌های زیرلایه مخفی آن و تابع تبدیل خطی برای لایه خروجی آن در نظر گرفته شده است. همچنین در این شبکه تعداد ۱ نورون بر اساس تعداد متغیر ورودی مسئله برای لایه ورودی و ۱ نورون بر مبنای متغیر خروجی موتور توربین گاز در لایه خروجی در نظر گرفته شده است. ساختار دوم با نام شبکه بتا ( $\beta$ )، یک شبکه عصبی پرسپترون با دو زیرلایه مخفی به تعداد ۱۰ نورون در هر زیرلایه و با اختصاص تابع تبدیل سیگموید برای نورون‌های زیرلایه‌های مخفی آن و تابع تبدیل خطی برای لایه خروجی آن می‌باشد. تعداد ۱ نورون برای لایه ورودی و ۱ نورون برای لایه خروجی آن در نظر گرفته شده است. ساختار سوم با نام شبکه گاما ( $\gamma$ )، یک شبکه عصبی شعاعی با یک زیرلایه مخفی، ماکزیمم تعداد ۵۰ نورون در آن زیرلایه و با اختصاص تابع تبدیل newrb برای نورون‌های زیرلایه مخفی آن و تابع تبدیل خطی برای لایه

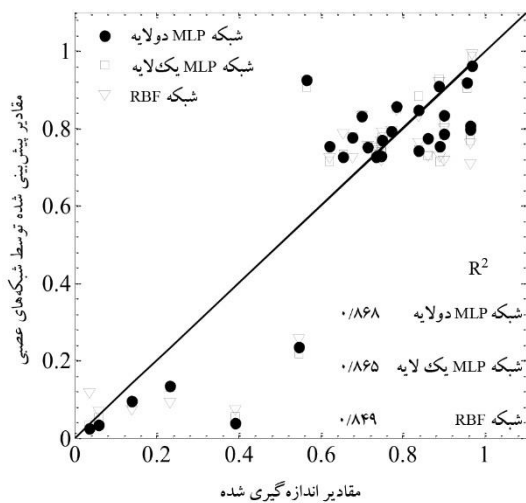
نماید. شکل ۸ چگونگی تغییرات خطای پیش‌بینی برای دمای گاز خروجی از توربین را در سه ساختار مختلف از شبکه‌های عصبی نوع آلفا و بتا و گاما به نمایش می‌گذارد. همان‌طور که از شکل ۸ قابل استنباط است، استفاده از شبکه عصبی نوع بتا، سبب افزایش عملکرد شبکه و کاهش قابل‌توجهی در خطای پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین شده است. در واقع شبکه عصبی نوع  $\beta$  با دارا بودن تعداد واحدهای پردازنده بیشتر (تعداد نورون‌ها و زیرلایه‌های مخفی بیشتر) و همچنین ترکیب اتصالات بین لایه‌ای پیچیده‌تر (شبکه آلفا با ۳۰ اتصال، شبکه بتا با ۱۳۰ اتصال بین‌لایه‌ای و شبکه گاما با ۱۱۰ اتصال) نسبت به شبکه‌های با ساختار آلفا و گاما، توانایی بالاتری جهت مدل‌سازی پارامترهای عملکردی موتور و تقریب ارتباط بین آنها به نمایش می‌گذارد.



شکل ۸ خطای محاسبه شده برای پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین موتور به وسیله سه معماری مختلف شبکه عصبی  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\gamma$

نمودار شکل ۹، کیفیت نتایج پیش‌بینی به وسیله شبکه‌های آلفا، بتا و گاما را برای دمای گاز خروجی از توربین نمایش می‌دهد. فاصله نقاط مختلف از خط قطری ترسیم‌شده در این شکل، بیانگر میزان خطای پیش‌بینی است. به عبارت دیگر، هرچه نقاط مرتبط با یک پارامتر معین از خط قطری ترسیم‌شده دورتر باشند، می‌توان گفت که خطای پیش‌بینی آن پارامتر بیشتر بوده و مقدار پیش‌بینی شده اختلاف بیشتری با مقدار اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی داشته است. درعین حال می‌توان گفت برای نقاطی که به خط قطری نزدیک‌ترند، دقت پیش‌بینی بالا بوده است. نتایج نشان می‌دهند که هر سه نوع شبکه عصبی در تمامی محدوده عملکردی موتور عملکرد خوبی داشته‌اند، اما با دقت در شکل ۹ و نیز با توجه به نمودار مربوط به مقادیر خطا (شکل ۸) می‌توان نتیجه گرفت که شبکه بتا نسبت به دو شبکه دیگر عملکرد بهتری در خصوص

پیش‌بینی پارامتر دمای گاز خروجی از توربین، ارائه نموده است. مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی بتا برای دمای گاز خروجی از توربین ۰/۸۶۸ می‌باشد که نشان می‌دهد شبکه عصبی نوع بتا دقت بالایی برای پیش‌بینی پارامتر عملکردی موتور دارد. با توجه به اینکه در مطالعه حاضر تمامی فرایندهای دینامیکی موتور، از مرحله استارت تا خاموش شدن مورد ارزیابی قرار گرفته است، ضریب تعیین ۰/۸۶۸ مقدار قابل قبولی برای پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین موتور با استفاده از شبکه عصبی می‌باشد. در مورد نحوه محاسبه مقدار ۰/۸۶۸ برای ضریب تعیین باید گفت که پس از اجرای شبکه عصبی، مقدار ضریب همبستگی  $R^2$  برابر با ۰/۹۳۱ به دست آمد و چون ضریب تعیین برابر با توان دوم  $R$  می‌باشد، در نتیجه مقدار آن ۰/۸۶۸ حاصل می‌شود. جهت مطالعه جزئیات بیشتر در این خصوص به مرجع [۲۷] ارجاع می‌شود.



شکل ۹. مقادیر پیش‌بینی شده دمای گاز خروجی از توربین موتور توسط شبکه‌های عصبی پرسپترون یک‌لایه، دو لایه و شعاعی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی

در جدول ۲ مقادیر خطای محاسبه‌شده مرتبط با پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین با استفاده از شبکه‌های عصبی آلفا، بتا و گاما ارائه شده است که مطابق با نتایج شکل ۸ می‌باشد. در دید کلی، شبکه عصبی نوع بتا توانسته است پارامتر دمای گاز خروجی از توربین موتور را با خطایی برابر با ۰/۱۰۵۵ پیش‌بینی نماید که نسبت به دو شبکه دیگر دقت بالاتری دارد و بنابراین شبکه بهینه برای پیش‌بینی این پارامتر شبکه بتا می‌باشد.

## ۲-۵. استفاده از روش رگرسیون چندجمله‌ای

آنالیز رگرسیون روشی آماری است که از ارتباط بین دو یا تعداد بیشتری از متغیرهای کمی استفاده می‌کند تا متغیر پاسخ را پیش‌بینی کند. این روش به صورت گسترده در زمینه‌های مختلف مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۲].

جدول ۲. مقادیر خطای محاسبه شده مرتبط با پیش‌بینی پارامتر دمای گاز خروجی از توربین موتور توسط شبکه‌های عصبی  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\gamma$

مقدار خطا	معماری شبکه عصبی
۰/۱۰۶۴	$\alpha$
۰/۱۰۵۵	$\beta$
۰/۱۱۲۷	$\gamma$

در حالت کلی برای حالتی با  $p-1$  متغیر ورودی، مدل رگرسیون چندجمله‌ای به صورت زیر می‌باشد [۳۲]:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_{p-1} X_{i,p-1} + \varepsilon_i \quad (22)$$

که در آن  $Y_i$  مقدار متغیر پاسخ در  $i$ امین مشاهده،  $X_i$  مقدار متغیر ورودی در  $i$ امین مشاهده و  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{p-1}$  ضرایب رگرسیونی می‌باشند.  $\varepsilon_i$  نیز بیانگر میزان خطای مدل‌سازی می‌باشد. اگر  $X_{i0} \equiv 1$  آنگاه:

$$Y_i = \sum_{k=0}^{p-1} \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i \quad (23)$$

فرم ماتریسی معادلات بالا را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\mathbf{Y}_{n \times 1} = \mathbf{X}_{n \times p} \boldsymbol{\beta}_{p \times 1} + \boldsymbol{\varepsilon}_{n \times 1} \quad (24)$$

که پارامترهای این معادله به صورت زیر می‌باشند:

$$\mathbf{Y}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\mathbf{X}_{n \times p} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1,p-1} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2,p-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{n,p-1} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\boldsymbol{\beta}_{p \times 1} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_{p-1} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (28)$$

در رابطه ۲۴،  $\mathbf{Y}$  ماتریس پاسخ‌ها،  $\mathbf{X}$  ماتریس ورودی،  $\boldsymbol{\beta}$  ماتریس ضرایب رگرسیون و  $\boldsymbol{\varepsilon}$  ماتریس خطاها است [۳۲]. برای به دست آوردن بهترین تخمین برای ضرایب رگرسیونی، از معیار حداقل مربعات استفاده می‌شود.

$$Q = \min \sum_{i=1}^n (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_{i1} - \dots - \beta_{p-1} X_{i,p-1})^2 \quad (29)$$

اگر بردار  $\mathbf{b}$  به عنوان تخمین‌های به دست آمده برای ضرایب رگرسیونی در نظر گرفته شود، آنگاه می‌توان این بردار را بر اساس معادلات مشهور به معادلات نرمال به دست آورد.

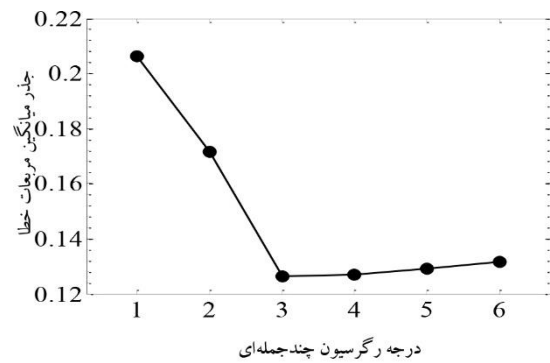
$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{b} = \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (30)$$

با استفاده از معادله ۳۰، تخمین‌کننده‌های حداقل مربعات به صورت ۳۱ به دست خواهند آمد:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (31)$$

که در آن  $\mathbf{X}^T$  ترانزپوز ماتریس  $\mathbf{X}$  می‌باشد [۳۲]. کاربرد روش رگرسیون در پیش‌بینی و ارزیابی پارامترهای توربین‌های گازی، در برخی از مطالعات گذشته گزارش شده است [۲۱]. در مطالعه حاضر از روش رگرسیون چندجمله‌ای برای تخمین روابط غیرخطی بین پارامترهای دور عملکردی و دمای گاز خروجی از توربین موتور توربین گاز آزمایشگاهی الیمپوس استفاده شد. برای نیل به این هدف، همان‌طور که در بخش قبل نیز توضیح داده شد، پارامتر دور عملکردی موتور به عنوان متغیر ورودی به سیستم در نظر گرفته شده است. پارامتر دمای گاز خروجی نیز به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شده است. در این مطالعه برای به دست آوردن روابط غیرخطی بین پارامتر ورودی و خروجی موتور، درجات مختلفی از رگرسیون چندجمله‌ای (از درجه اول تا درجه ششم) به کار گرفته شده‌اند. همچنین برای پی‌ریزی مدل‌های مورد نظر و اعتبارسنجی عملکرد آنها از روش k-Fold استفاده شده است [۲۷]. همچنین برای مدل‌های مختلف

رگرسیون چندجمله‌ای، سازگاری بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده پارامتر دمای گاز خروجی از توربین، با محاسبه خطای جذر میانگین مربعات بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ارزیابی شده است. در شکل ۱۰ چگونگی تغییرات خطای پیش‌بینی برای دمای گاز خروجی از توربین، با استفاده از درجات مختلف رگرسیون چندجمله‌ای نمایش داده شده است.

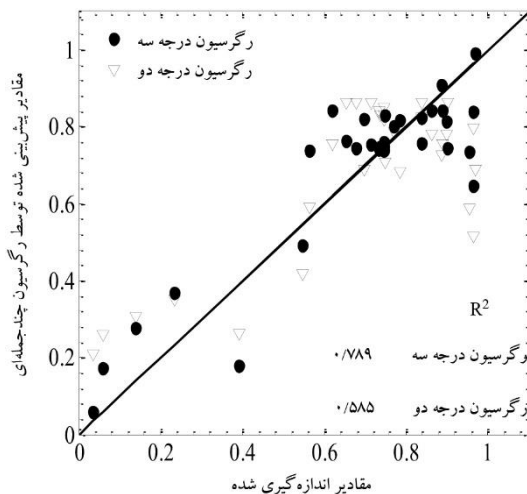


شکل ۱۰. خطای محاسبه شده برای پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین موتور با استفاده از مدل‌های رگرسیون چندجمله‌ای با درجات مختلف

همان‌طور که از شکل ۱۰ قابل درک است، خطای پیش‌بینی از مدل درجه یک تا سه سیر نزولی دارد و پس از آن تا مدل درجه شش افزایش می‌یابد. کمینه خطای مرتبط با پیش‌بینی دمای گاز خروجی، در مدل رگرسیون چندجمله‌ای با درجه سه رخ می‌دهد. علت این است که با افزایش درجه رگرسیون، مدل مورد نظر دچار بیش‌برازش<sup>۳۰</sup> شده و در فرایند اعتبارسنجی، کارایی مناسبی از خود نشان نمی‌دهد. به عبارت دیگر با افزایش درجه رگرسیون چندجمله‌ای، مدل حاصل، داده‌های انتخاب شده برای فرایند آموزش را با دقت بالایی می‌تواند پیش‌بینی کند. حال آنکه در مرحله اعتبارسنجی، در خصوص پیش‌بینی داده‌هایی که در فرایند آموزش مورد استفاده قرار نگرفته‌اند، خطای پیش‌بینی افزایش می‌یابد. مدل رگرسیون چندجمله‌ای با درجه سه با ایجاد مصالحه مناسب بین داشتن دقت پیش‌بینی قابل قبول و در عین حال عدم رخداد بیش‌برازش، به عنوان مدل مناسب جهت توصیف ارتباط بین پارامترهای موتور توربین گاز، در مطالعه حاضر برگزیده شده است. در نمودار شکل ۱۱ به عنوان نمونه، کیفیت نتایج پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین موتور توسط دو مدل رگرسیونی درجه دو و سه با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین مقادیر محاسبه شده ضریب تعیین ( $R^2$ ) مربوط به پیش‌بینی این پارامتر نیز در این شکل ارائه شده است. همانند بحثی که در قبل مطرح شد، در این

نمودار نیز فاصله نقاط مختلف از خط قطری ترسیم شده در این شکل بیانگر میزان خطای پیش‌بینی می‌باشد.

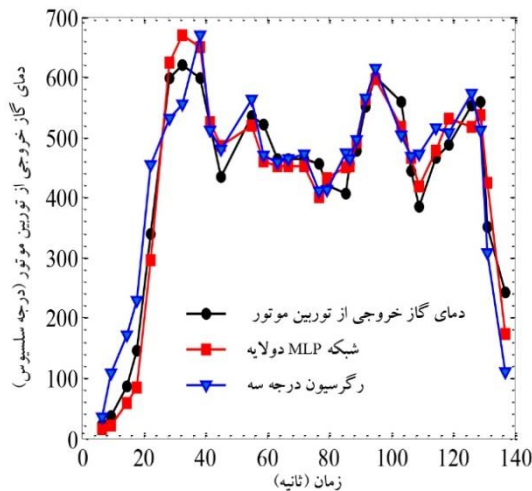
با دقت در شکل ۱۱ و با توجه به پراکندگی نقاط در اطراف خط قطری و نیز با در نظر گرفتن مقادیر ضریب تعیین می‌توان نتیجه گرفت که روش رگرسیون درجه سه در مقایسه با رگرسیون درجه دو از دقت بالاتری در خصوص پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین برخوردار می‌باشد. مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای نتایج پیش‌بینی شده با استفاده از روش رگرسیون درجه سه برای دمای گاز خروجی از توربین ۰/۷۸۹ می‌باشد که با توجه به اینکه در مطالعه حاضر، تمامی فرایندهای دینامیکی موتور، از مرحله استارت تا خاموش شدن مورد ارزیابی قرار گرفته است، ضریب تعیین ۰/۷۸۹ مقدار قابل قبولی برای پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین با استفاده از روش رگرسیون درجه سه می‌باشد. در جدول ۳ مقادیر خطای محاسبه شده مرتبط با پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین موتور، با استفاده از درجات مختلف رگرسیون چندجمله‌ای (از درجه اول تا ششم)، ارائه شده است که مطابق با نتایج شکل ۱۰ می‌باشد.



شکل ۱۱. مقادیر پیش‌بینی شده دمای گاز خروجی از توربین موتور توسط مدل‌های رگرسیون درجه دو و سه در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی

در دید کلی، مدل رگرسیون چندجمله‌ای درجه سه توانسته است پارامتر دمای گاز خروجی از توربین را با خطایی برابر با ۰/۱۲۶۲ پیش‌بینی نماید که نسبت به مدل‌های دیگر دقت بالاتری دارد و بنابراین مدل بهینه برای پیش‌بینی این پارامتر مدل رگرسیون درجه سه می‌باشد. در نهایت برای مقایسه توانایی

گرفته شده در این مطالعه نیز از توانایی بالاتری نسبت به مدل‌های مختلف رگرسیون چندجمله‌ای در تخمین دمای گاز خروجی از توربین برخوردار می‌باشند.



شکل ۱۲. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده دمای گاز خروجی از توربین موتور توسط روش‌های شبکه عصبی پرسپترون دولایه و رگرسیون درجه سه با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی

این مسئله می‌تواند به این علت باشد که روش رگرسیون، اساساً یک روش خطی است در حالی که در شبکه‌های عصبی به‌کار رفته در مطالعه حاضر، از توابع تبدیل غیرخطی (توابع سیگموئید و newrb) استفاده شده است. همچنین روش پرسپترون دولایه با دارا بودن تعداد واحدهای پردازنده بیشتر و همچنین ترکیب اتصالات بین لایه‌های پیچیده‌تر، توانایی بالاتری نسبت به روش‌های پرسپترون یک‌لایه و شبکه شعاعی، جهت مدلسازی پارامتر دمای گاز خروجی از توربین دارد. در نتیجه می‌توان گفت که روش شبکه عصبی پرسپترون دولایه، توانایی بیشتری در پیش‌بینی ارتباط غیرخطی بین دو پارامتر عملکردی موتور در مطالعه حاضر داشته است.

## ۶. جمع‌بندی

در مطالعه حاضر با به‌کارگیری دو رویکرد داده‌کاوی مختلف، ارتباط بین مقادیر دمای گاز خروجی از توربین یک موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی با تغییرات پارامتر دور عملکردی این موتور بررسی شد. برای دستیابی به این هدف از الگوریتم شبکه عصبی پرسپترون و شبکه شعاعی، که زیرمجموعه‌ای از روش‌های هوش مصنوعی می‌باشند، و روش

روش‌های شبکه عصبی و رگرسیون در پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین موتور، نتایج پیش‌بینی شده توسط روش‌های پرسپترون دولایه و رگرسیون چندجمله‌ای درجه سه، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.

جدول ۳. مقادیر خطای محاسبه شده مرتبط با پیش‌بینی پارامتر دمای گاز خروجی از توربین موتور با استفاده از درجات مختلف رگرسیون چندجمله‌ای

مقدار خطا	درجه رگرسیون چندجمله‌ای
۰/۲۰۶۱	۱
۰/۱۷۱۷	۲
۰/۱۲۶۲	۳
۰/۱۲۷۱	۴
۰/۱۲۹۱	۵
۰/۱۳۱۶	۶

این مقایسه در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. بدین منظور در مدت زمان عملکردی موتور، ۳۰ نقطه جهت مقایسه نتایج پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده دمای گاز خروجی از توربین موتور، در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به شکل ۱۲ می‌توان دریافت که نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی پرسپترون دولایه در مقایسه با رگرسیون درجه سه، تطابق مناسب‌تری با مقادیر اندازه‌گیری شده دمای گاز خروجی از توربین موتور دارد که البته این نتیجه‌گیری، با در نظر گرفتن جذر میانگین مربعات خطای محاسبه شده برای مقادیر دمای پیش‌بینی شده نیز قابل حصول است. به‌عبارت دیگر می‌توان گفت که روش شبکه عصبی پرسپترون دولایه، از دقت بالاتری نسبت به روش رگرسیون درجه سه در خصوص پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین موتور، برخوردار می‌باشد.

در مجموع با مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری روش شبکه عصبی پرسپترون یک‌لایه و دولایه، شبکه عصبی شعاعی و روش رگرسیون چندجمله‌ای درجه سه (همان‌گونه که در مقایسه شکل‌های ۸ تا ۱۲ دیده می‌شود) و با در نظر گرفتن نتایج جدول‌های ۲ و ۳ می‌توان نتیجه گرفت که روش پرسپترون با دو زیرلایه مخفی نسبت به سایر روش‌های ذکر شده در این مطالعه، توانایی بیشتری در تخمین دمای گاز خروجی از توربین از خود نشان می‌دهد. از سوی دیگر، هر سه نوع شبکه عصبی به‌کار

مخفی آن، از توانایی بالاتری در پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین برخوردار می‌باشد. این بدان علت است که شبکه عصبی پرسپترون با ساختار دو زیرلایه مخفی، به دلیل دارا بودن تعداد واحدهای پردازنده بیشتر (تعداد نورون‌ها و لایه‌های بیشتر) و همچنین ترکیب اتصالات بین لایه‌های پیچیده‌تر نسبت به شبکه عصبی پرسپترون با ساختار تک‌لایه و شبکه عصبی شعاعی، توانایی بیشتری (از نقطه نظر کمتر بودن خطای پیش‌بینی) در مدل‌سازی پارامتر دمای گاز خروجی از توربین دارد. از سوی دیگر با مقایسه نتایج حاصل از اعمال روش شبکه عصبی و روش رگرسیون چندجمله‌ای می‌توان گفت که روش شبکه عصبی، دقت بالاتری در پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین دارد. این مسئله می‌تواند بدان علت باشد که روش رگرسیون چندجمله‌ای به کار رفته در مطالعه حاضر، در اصل یک روش خطی است. حال آنکه در شبکه‌های عصبی به کار رفته، از توابع غیرخطی (توابع سیگموئید و newrb) به عنوان توابع تبدیل شبکه استفاده شده است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که دقت روش شبکه عصبی پرسپترون دولایه در پیش‌بینی ارتباطات غیرخطی بین پارامترهای دور عملکردی و دمای گاز خروجی از توربین موتور (که به دلیل رفتار پیچیده دائمی و گذرای موتور در شرایط عملکردی مختلف ایجاد می‌شود)، بالاتر بوده و این روش توانایی بالاتری را در پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین از خود نشان می‌دهد.

رگرسیون چندجمله‌ای، که یک روش تجزیه و تحلیل آماری می‌باشد، استفاده شد. در این راستا پارامتر دمای گاز خروجی، به عنوان متغیر خروجی اندازه‌گیری شده از موتور و پارامتر دور عملکردی موتور، به عنوان متغیر ورودی موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی در نظر گرفته شده‌اند. در بررسی حاضر داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی، با انجام تست‌هایی روی موتور میکروتوربین گاز آزمایشگاهی الیمپوس با استارت الکتریکی به دست آمده‌اند. محدوده عملکردی که برای دور موتور در نظر گرفته شده است در بازه صفر تا ۱۰۸۰۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد. جهت ارزیابی خطای پیش‌بینی در روش‌های داده‌کاوی مذکور (شبکه عصبی و رگرسیون)، مقدار خطای جذر میانگین مربعات و ضریب تعیین مربوط به مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده محاسبه شده‌اند. براساس همین مقادیر محاسبه شده خطا، توانایی دو روش داده‌کاوی شبکه عصبی و رگرسیون چندجمله‌ای جهت پیش‌بینی دمای گاز خروجی از توربین با یکدیگر مقایسه گردید. در روند بررسی‌ها، از دو شبکه عصبی پرسپترون با معماری‌های متفاوت و یک شبکه عصبی شعاعی استفاده شد. نتایج نشان داد که شبکه عصبی پرسپترون با ساختار دو زیرلایه مخفی و ۱۰ نورون در هر زیرلایه، در مقایسه با شبکه عصبی پرسپترون با ساختار تک‌لایه و تعداد ۱۰ نورون در لایه مخفی و همچنین شبکه عصبی شعاعی با ماکزیمم تعداد ۵۰ نورون در لایه

## ۷. مأخذ

- [1] Thiagarajan, M. "A Design Study of Single-Rotor Turbomachinery Cycles." MSc Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
- [2] Olympus HP Gas Turbine AMT Netherlands, <http://www.amtjets.com/index.php> (accessed March 1 2016).
- [3] Leylek, Z. "An Investigation into performance modelling of a Small Gas Turbine Engine." *Turbine Technical conference and Exposition*, 2013.
- [4] Rahman, N. U., J. F. Whidborne. "A Numerical Investigation into the Effect of Engine Bleed on Performance of a Single-Spool Turbojet Engine." *Journal of Aerospace Engineering* 222(7), 2008, pp. 939-949.
- [5] علی‌حسینی، ع.، ا. مسگرپور طوسی، م. برومند، آ. حرفی. "طراحی مفهومی تست سل بسته موتور میکروجت." *دهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران*، ۱۳۸۹.
- [6] Diamantis, P. B., G. S. Anastassios. "Data Analysis and Performance Model Calibration of a Small Turbojet Engine." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2011, pp. 1523-1533.
- [7] Chunmei, L. "Dynamical System Modeling of a Micro Gas Turbine Engine." MSc Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [8] Chacartegui, R., D. Sánchez, A. Muñoz, T. Sánchez. "Real Time Simulation of Medium Size Gas Turbines." *Journal of Energy Conversion and Management* 52, 2011, pp. 713-724.



- [9] Benini, E., S. Giacometti. "Design, Manufacturing and Operation of a Small Turbojet-Engine for Research Purposes." *Journal of Applied Energy* 84, 2007, pp. 1102-1116.
- [۱۰] بیاتلو، ر. "طراحی آیرودینامیکی یک موتور میکروجت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۸.
- [11] Czarnecki, M. "Mass Model of Micro Gas Turbine Single Spool Turbojet Engine." *Journal of KONES Powertrain and Transport* 20(1), 2013.
- [12] Markunas, A. L. "Modeling, Simulation and Control of Gas Turbines." MSC Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1972.
- [13] Badami, M., P. Nuccio, A. Signoretto. "Experimental and Numerical Analysis of a Small-Scale Turbojet Engine." *Journal of Energy Conversion and Management* 76, 2013, pp. 225-233.
- [14] Nikpey, H., M. Assadi, P. Breuhaus. "Development of an Optimized Artificial Neural Network Model for Combined Heat and Power Micro Gas Turbines." *Journal of Applied Energy* 108, 2013, pp. 137-148.
- [15] Fast, M., M. Assadi, S. De. "Development and Multi-Utility of an ANN Model for an Industrial Gas Turbine." i 86, 2009, pp. 9-17.
- [16] Torella, G., F. Gamma, G. Palmesano. "Neural Networks for the Study of Gas Turbine Engines Air System." *Proceedings of the International Gas Turbine Congress*, 2003.
- [17] Muthukumar, K. "Condition Based Management of Gas Turbine Engine Using Neural Networks." MSC Dissertation, Nanyang Technological University, 2005.
- [18] Bartolini, C. M., F. Caresana, G. Comodi, L. Pelagalli, M. Renzi, S. Vagni. "Application of Artificial Neural Networks to Micro Gas Turbines." *Journal Energy Conversion and Management* 52, 2011, pp. 781-788.
- [۱۹] شرفی، م، م. بروشکی، ع. قلی زاده. "بهینه سازی سیکل میکروتوربین گازی با کمک الگوریتم زنتیک." هیجدهمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران، ۱۳۸۹.
- [20] Asgari, H., X. Chen, M. B. Menhaj, R. Sainudiin. "Artificial Neural Network Based System Identification for a Single-Shaft Gas Turbine." 2013.
- [21] Memon, A. G., R. A. Memon, K. Harijan, M. A. Uqaili. "Thermo-environmental Analysis of an Open Cycle Gas Turbine Power Plant with Regression Modeling and Optimization." *Journal of Energy Institute* 87, 2014, pp. 81-88.
- [22] Giampaolo, T., "Gas Turbine Handbook: Principles and Practice." *United States of America: Fairmont Press*, 2009.
- [23] Flesland, S. M. "Gas Turbine Optimum Operation." MSc Dissertation, Norwegian University of Science & Thechnology, 2010.
- [24] Rahman, N. U. "Propulsion and Flight Controls Integration for the Blended Wing Body Aircraft." PhD Dissertation, Cranfield University, 2009.
- [25] Olympus HP Gas Turbine AMT Netherlands, Manual and Engine Log (V30C), <http://www.amtjets.com/pdf>, Numbers 13 & 14, (accessed March 1, 2016).
- [26] Flack, R. D., "Fundamentals of Jet Propulsion with Applications." New York: Cambridge University Press, 2005.
- [27] Hastie, T., R. Tibshirani, J. Friedman. "The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction." New York: Springer, 2009.
- [28] Hagan, M., H. Demuth, M. Beale. "Neural Network Design." Boston: PWS Publishing, 1996.
- [29] Fast, M. "Artificial Neural Networks for Gas Turbine Monitoring." PhD Dissertation, Lund University, 2010.
- [30] Hurt, J. L. "Automating Construction and Selection of a Neural Network Using Stochastic Optimization." MSC Dissertation, University of Nevada, 2011.
- [31] Muga, J. N. "Investigation of Artificial Neural Networks for Modeling, Identification and Control of Nonlinear Plant." MSC Dissertation, Cape Peninsula University of Technology, 2009.
- [32] Kutner, M. H., C. J. Nachtsheim, J. Neter, L. William. "Applied Linear Statistical Model." New York: McGraw-Hill/Irwin, 2005.

- 
1. microgas turbine
  2. exhaust gas temperature
  3. engine rotational speed
  4. multi-layer perceptron
  5. radial basis function
  6. multiple-polynomial regression
  7. AMT Olympus HP E-Start
  8. Leylek
  9. bleed air
  10. random errors
  11. systematic errors
  12. artificial intelligence
  13. feedforward networks
  14. mean squared error
  15. electronic control unit
  16. throttle
  17. switch channel
  18. kerosene
  19. Aeroshell 500
  20. engine data terminal
  21. micro gas turbine test stand
  22. engine holder
  23. solenoid valve
  24. root mean square of error
  25. coefficient of determination
  26. purelin transfer function
  27. sigmoid transfer function
  28. radial transfer Function
  29. correlation coefficient
  30. over-fitting