



نحوه استناد به این مقاله: فتح الهی، سعید؛ سیدشمس طالقانی، سیدآرش (۱۳۹۰). اثر تغییر مشخصات ترمودینامیکی هوای ورودی به کمپرسور موتور توربوفن TF30 با استفاده از تحلیل اکسرژی. تبدیل انرژی، ۲ (۱ و ۲)، ۱-۱۰

اثر تغییر مشخصات ترمودینامیکی هوای ورودی به کمپرسور موتور توربوفن TF30 با استفاده از تحلیل اکسرژی

سعید فتح‌الهی^{۱*}، سید آرش سیدشمس طالقانی^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
^۲استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

دریافت: اسفند ۹۵، بازنگری: اردیبهشت ۹۶، پذیرش: خرداد ۹۶

چکیده

در تحلیل اکسرژی، هدف اساسی تعیین محل و مقدار تولید بازگشت‌ناپذیری‌ها در طی فرآیندهای مختلف ترمودینامیکی و عوامل موثر بر تولید این بازگشت‌ناپذیری‌ها می‌باشد. هدف این پژوهش تحلیل بازده، نرخ اتلافات اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی کمپرسور موتور توربوفن TF30 می‌باشد. لذا موازنه جرم و انرژی بر روی کمپرسور موتور توربوفن انجام گردید. با استفاده از روابط ترمودینامیکی، نرخ اکسرژی فیزیکی ورودی و خروجی محاسبه گردید. با استفاده از محاسبات به دست آمده و محاسبه نرخ کار کمپرسور، بازده و نرخ اتلاف اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی کمپرسور موتور توربوفن محاسبه گردید. برای تحلیل اکسرژی کمپرسور، تغییراتی در دما و سرعت هوای ورودی انجام شد. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار فرترن مشاهده شد هر چه مقدار سرعت و دمای ورودی کمپرسور بیشتر می‌شود نرخ اتلاف اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی افزایش می‌یابد. در انتها نمودارهای مقایسه‌ای برای نتایج به دست آمده ارائه گردید.

*عهده‌دار مکاتبات: saeedfathollahi@gmail.com

کلمات کلیدی: اکسرژی، موتور توربوفن، کمپرسور.

۱- مقدمه

با مفهوم اکسرژی می‌توان به صورت همزمان آنتروپی و انرژی را مدنظر قرار داد [۱].

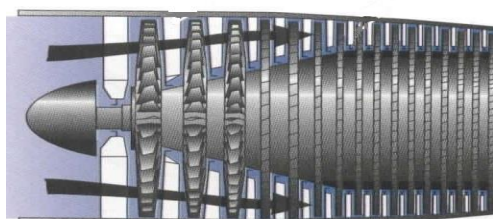
در تحلیل اکسرژی، هدف اساسی تعیین محل و مقدار بازگشت‌ناپذیری‌ها در طی فرآیندهای مختلف سیکل ترمودینامیکی و عوامل موثر بر تولید این بازگشت‌ناپذیری‌ها می‌باشد [۲].

احیایی و همکاران [۳] به تجزیه و تحلیل اکسرژی یک نوع موتور توربوجت پرداختند و نشان دادند در ارتفاع ۱۱۰۰۰ متری و با سرعت هوای ورودی ۲۰۰ متر بر ثانیه، راندمان اکسرژی کمپرسور ۹۶.۷٪ است که بیشترین بازده را بین دیگر اجزای موتور دارا می‌باشد. نرخ آنتروپی تولیدی کمپرسور در این حالت ۰.۲۱ کیلووات بر کلون محاسبه شده است.

توران [۴] طی تحقیقی اثرات اکسرژتیک برخی پارامترهای طراحی در موتور توربوجت هواپیمای بدون سرنشین را مورد بررسی قرار گرفت. که بر این اساس هرگونه افزایش نسبت فشار کمپرسور، با افزایش عدد ماخ پروازی همراه می‌شود، که همین امر باعث افزایش راندمان اکسرژی موتور می‌شود. با توجه به

امروزه صنعت هواپیمایی یکی از بزرگترین و مهمترین صنایع از لحاظ اقتصادی و سیاسی تلقی می‌شود. از این رو کشورها برای پیشرفت در این صنعت به دنبال طراحی هواپیمایی هستند که با توجه به ماموریت خاصشان، بهترین عملکرد و راندمان را داشته باشد. یکی از مهمترین اجزای هواپیمای موتورهای پیشران آن می‌باشند. می‌توان با طراحی و جلوگیری از هدررفت انرژی و راندمان بهتر، مصرف سوخت کمتر و نیز برای محافظت از محیط زیست، به این صنعت کمک کرد. بنابراین استفاده بهینه از انرژی و جلوگیری از اتلاف آن در فرآیندهای ترمودینامیکی، همواره مورد توجه طراحان و مهندسان قرار گرفته است. قانون دوم ترمودینامیک ابزاری مناسب برای بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده ترمودینامیکی است. کیفیت با مفهوم آنتروپی بیان می‌شود. آنتروپی بالا، کیفیت پایین انرژی است. طبق قانون دوم، تبدیل را تنها هنگامی عملی می‌داند که آنتروپی کلی افزایش یابد.

افزایش نسبت فشار (از ۲ به ۷) بازده اکسرژتیک نیز افزایش می‌یابد.



شکل (۱): کمپرسور موتور توربوفن [۷]

تحلیل اکسرژی تا کنون در این سطح در موتور توربوفن مورد پژوهش صورت نگرفته است، لذا این پژوهش جدید برای آن موتور TF30 می‌باشد. در ادامه نتایج به دست آمده از این پژوهش با تحقیق احیایی و همکاران [۳] مورد اعتبارسنجی قرار خواهد گرفت.

۲- اهداف پژوهش

در این پژوهش، تحلیل اکسرژی موتور توربوفن ۳۰ که به اختصار TF30 نام دارد مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل اکسرژی موتور و محاسبه بازده اکسرژی موتور و تحلیل اثرات تغییر خواص ترمودینامیکی بر عملکرد آن انجام می‌گیرد. در آخر با استفاده از نتایج به دست آمده می‌توان نقاطی که اتلاف اکسرژی بیشتری دارند را تعیین نمود.

بنا به تعریف، اکسرژی حداکثر کار مفیدی است که از مقدار مشخصی از انرژی موجود یا از جریانی از مواد حاصل می‌شود. در تحلیل اکسرژی، هدف اساسی تعیین محل و مقدار تولید بازگشت‌ناپذیری‌ها در طی فرآیندهای مختلف ترمودینامیکی و عوامل موثر بر تولید این بازگشت‌ناپذیری‌ها می‌باشد [۵].

۳- موتور توربوفن

موتورهای توربوفن همانند موتورهای توربوجت نیروهای پیش‌رانش خود را مستقیماً از نیروهای عکس‌العملی تولید شده توسط گازهای داغ خروجی از موتور فراهم می‌کنند. موتور توربوفن دارای اجزای اصلی مانند فن، کمپرسور، محفظه احتراق، توربین و نازل می‌باشد. هوا توسط فن وارد کمپرسور می‌شود و متراکم می‌شود. بعد از متراکم شدن، هوا وارد محفظه احتراق شده و با سوخت مخلوط می‌گردد و اشتعال صورت می‌پذیرد. گازهای داغ خروجی با سرعت و حرارت زیاد به پره‌های توربین برخورد می‌کنند و توربین شروع به چرخش می‌کند. گازهای داغ در نهایت از نازل خارج شده و باعث تولید نیروی پیش‌رانش می‌گردند [۶].

۳-۱- کمپرسور موتور توربوفن

در شکل (۱) کمپرسور موتور توربوفن نشان داده شده است. کمپرسور وظیفه افزایش فشار هوا را به عهده دارد و به دو نوع شعاعی و محوری تقسیم بندی می‌شوند. کمپرسور محوری از چند طبقه یا ردیف تشکیل شده است و فشار هوا را چند مرحله افزایش می‌دهد. کمپرسور، فشار هوا را تا چند برابر افزایش می‌دهد و نقش مهمی در عملکرد توربومشین دارد.

یکی از عوامل مهم در بازده توربومشین‌ها، فشار هوای ورودی به محفظه احتراق است.

توربوفن‌ها به وسیله فرآیند احتراق سوخت، انرژی سیال را افزایش داده و جریان سیال با مومنتوم یافته، از نازل خارج شده و از این طریق نیروی رانش تامین می‌شود. نکته در همین احتراق سیال است، برای این که احتراق به بهترین نحو صورت بگیرد باید فشار در واکنش احتراق در حد بالایی باشد. این حد بالا گاهی تا ۴۰ برابر فشار اتمسفر می‌رسد.

کمپرسورهای محوری شامل چند یا چندین ردیف یا مرحله هستند و هر مرحله شامل دو ردیف پره است که پره‌های چرخان و پره‌های ثابت می‌باشند. جریان سیال با عبور از هر مرحله افزایش فشار می‌یابد. دلیل این افزایش فشار، شکل واگرایی (دیفیوزری) پره‌ها می‌باشد. یعنی پره‌ها به شکل واگرا قرار گرفته‌اند و گذرگاه جریان بین دو پره متوالی افزایش می‌یابد (برعکس پره‌های توربین). پره‌های چرخان روی دیسک‌های دوران که به شفت مرکزی متصل هستند، می‌چرخند و پره‌های ثابت به دیواره کمپرسور متصل هستند و حرکتی نمی‌کنند.

در کمپرسورهای جریان محوری، هوا موازی با محور چرخان کمپرسور وارد آن شده و هم جهت با آن ادامه مسیر داده و از آن خارج می‌شود [۶].

۳-۲- معادلات حاکم بر کمپرسور موتور توربوفن TF30

اساس کار موتورهای توربوفن هواپیما برسیکل ایده‌آل برایتون بنا نهاده شده است. در این سیکل فرآیند فشرده‌سازی، در شرایط آیزنتروپیک می‌باشد. دما و فشار خروجی از کمپرسور از طریق روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه است [۸ و ۹].

$$T_2 = T_1 \left[1 + \left(\frac{r_c^{\left(\frac{K-1}{K} \right)} - 1}{\eta_{comp}} \right) \right] \quad (1)$$

$$P_2 = r_c P_1 \quad (2)$$

$$W_{comp} = \dot{m} \frac{KR}{K-1} T_1 \left[\frac{r_c^{\left(\frac{K-1}{K} \right)} - 1}{\eta_{comp}} \right] \quad (3)$$

در رابطه (۱)، $T_1(K)$ دمای هوای ورودی به کمپرسور، $T_2(K)$ دمای هوای خروجی از کمپرسور می‌باشند. در رابطه (۲)،

تحلیل اکسرژی شامل دو مرحله اساسی می‌باشد. مرحله اول، شناسایی و بررسی فرآیندهای نامطلوب ترمودینامیکی سیستم بر پایه تعیین اتلاف اکسرژی می‌باشد، که اتلافات اکسرژی با نوشتن موازنه اکسرژی در قسمت‌های مختلف سیستم به دست می‌آید. مرحله دوم، تعیین بیشترین اصلاحات ممکن در سیستم بر پایه مفاهیم اتلاف اکسرژی اجتناب‌پذیر و اتلافات اکسرژی اجتناب‌ناپذیر است. کمترین میزان اکسرژی در سیستم، طی فرآیندی که نمی‌توان با تکنیک‌های موجود و ملاحظات اقتصادی مانع نابودی آن شد را اتلاف اکسرژی اجتناب‌ناپذیر می‌نامند. با این تعریف، اتلاف اکسرژی قابل اجتناب، بیشترین پتانسیل بهینه شدن فرآیند را مشخص می‌سازد [۱۲].

$$\dot{E}x_{dead} = \dot{E}x_{total.in} - \dot{E}x_{total.out} \quad (8)$$

در سمت چپ رابطه (۸) آهنگ اتلافات اکسرژی کمپرسور و در سمت راست معادله، تفاضل آهنگ کل اکسرژی‌های ورودی و خروجی کمپرسور می‌باشد.

۳-۵- بازده اکسرژی کمپرسور موتور

بازده اکسرژی کمپرسور نیز از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد.

$$\eta_{Ex.comp} = \frac{\dot{E}x_{total.out} - \dot{E}x_{total.in}}{W_{comp}} \quad (9)$$

که در این رابطه (۹)، $\eta_{Ex.comp}$ بازده اکسرژی کمپرسور می‌باشد [۱۱].

۳-۶- نرخ آنتروپی تولید شده کمپرسور

برگشت‌پذیری با اتلاف اکسرژی برابر است و این مستقیماً متناسب با شدت خالص افزایش آنتروپی است. نرخ آنتروپی تولید شده در کمپرسور از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\dot{S}_{gen.comp} = \frac{1}{T_0} (\dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} - W_{comp}) \quad (10)$$

در رابط (۱۰)، $\dot{S}_{gen.comp}$ نرخ آنتروپی تولید شده می‌باشد [۱۴ و ۱۳].

۳-۷- مدل سازی

کمپرسور این موتور از نوع دو محوری است. شش ردیف (مرحله) فشار پایین و هفت ردیف فشار بالا دارد. ضریب تراکم ۱۹:۱ می‌باشد و داری نسبت فشار کمپرسور ۱۹،۸:۱ است. در این پژوهش با استفاده از برنامه فرترن، تحلیل اکسرژی کمپرسور موتور توربوفن TF30 انجام شده است. مشخصات ترمودینامیکی ورودی و خروجی کمپرسور در اثر تغییرات دما و سرعت هوای ورودی محاسبه می‌شوند. تحلیل اکسرژی کمپرسور با توجه به فرضیات زیر انجام گرفته است.

P_1 (kpa) فشار هوای ورودی به کمپرسور و P_2 (kpa) فشار هوای خروجی از کمپرسور و r_c نسبت تراکم کمپرسور می‌باشند. در رابطه (۳)، ضریب K نسبت گرمای ویژه در فشار ثابت به گرمای ویژه در حجم ثابت و η_{comp} راندمان کمپرسور و W_{comp} ($\frac{kJ}{s}$) نرخ کار کمپرسور می‌باشند.

توضیح اینکه واحد دما و فشار در تمامی معادلات به ترتیب کلویین و کیلو پاسکال می‌باشند. واحد نرخ کار و نرخ اکسرژی کیلو ژول بر ثانیه می‌باشد که معادل آن کیلو وات درج گردیده است.

۳-۳- معادلات اکسرژی حاکم بر کمپرسور موتور توربوفن TF30

اکسرژی نیز مانند انرژی، دارای مولفه‌های مختلفی است. در غیاب اثرات میدان‌های هسته‌ای، مغناطیسی، الکتریکی، کششی سطحی، می‌توان رابطه (۴) را برای کل اکسرژی نوشت [۱۰]:

$$\dot{E}x = \dot{E}x_k + \dot{E}x_p + \dot{E}x_{ph} + \dot{E}x_{di} + \dot{E}x_{ch} + \dot{E}x_o \quad (4)$$

در رابطه (۴) $\dot{E}x_k$ نرخ اکسرژی جنبشی، $\dot{E}x_p$ نرخ اکسرژی پتانسیل، $\dot{E}x_{ph}$ نرخ اکسرژی فیزیکی، $\dot{E}x_{di}$ نرخ اکسرژی دیفیوژری، $\dot{E}x_{ch}$ نرخ اکسرژی شیمیایی، $\dot{E}x_o$ نرخ اکسرژی حرارتی می‌باشند و واحد آنها کیلو ژول بر ثانیه (کیلو وات) می‌باشند.

اکسرژی جنبشی، از آن دست انرژی‌های سامان یافته می‌باشد. یعنی در تبدیل انرژی می‌تواند به صورت کامل به کار (اکسرژی) تبدیل شود. نرخ اکسرژی جنبشی ماده‌ای به جرم m (kg) و سرعت v (m/s) از رابطه (۵) به دست می‌آید [۹].

$$\dot{E}x_k = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 \quad (5)$$

اکسرژی پتانسیل نیز مانند اکسرژی جنبشی قسمتی از انرژی‌های سامان یافته می‌باشد. نرخ اکسرژی پتانسیل ماده‌ای به جرم m (kg) که نسبت به یک حالت مرجع، در ارتفاع z (m) قرار دارد به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود [۱۱] و [۱۰].

$$\dot{E}x_p = \dot{m}gz \quad (6)$$

اکسرژی فیزیکی، بیشترین کار قابل دست‌یابی از ماده‌ای است که از حالت اولیه خود ضمن یک فرآیند کاملاً برگشت‌پذیر که فقط تبادل حرارتی با محیط دارد، به حالت مرده محدود برسد. مقدار نرخ اکسرژی فیزیکی از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد [۱۰].

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m}C_p \left[T - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] + RT_0 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (7)$$

که در رابطه (۷): C_p (kJ/kg.k) گرمای ویژه در فشار ثابت به حجم ثابت، m (kg) جرم هوای عبوری به کمپرسور، T (k) دمای هوای عبوری از کمپرسور، R (kJ/kg.k) ثابت هوا، T_0 (k) دمای مرجع و P_0 (kpa) فشار مرجع می‌باشند.

۳-۴- اتلاف اکسرژی کمپرسور موتور

جدول ۳: بازده اکسرژی کمپرسور موتور توربوفن در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)	بازده اکسرژی %
۲۰۰	۹۴
۳۰۰	۹۵
۴۰۰	۹۶
۵۰۰	۹۷
۶۰۰	۹۸

جدول (۴) نرخ اتلاف اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی برای کمپرسور موتور توربوفن در سطح دریا در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای سرعت‌های متفاوت می‌باشد.

جدول ۴: نرخ اتلاف اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی کمپرسور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)	نرخ اتلاف اکسرژی (کیلو وات)	نرخ تولید آنتروپی (کیلو وات بر کلونین)
۲۰۰	۳۱۷۸,۶	۱۰,۶۶
۳۰۰	۴۴۱۹,۶	۱۴,۸
۴۰۰	۵۱۷۹,۶	۱۷,۴
۵۰۰	۴۶۹۳,۲	۱۵,۷۴
۶۰۰	۵۳۶۹,۹	۱۸,۰۱

جدول ۵: نرخ اکسرژی فیزیکی ورودی و خروجی کمپرسور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)	نرخ اکسرژی فیزیکی ورودی (کیلووات)	نرخ اکسرژی فیزیکی خروجی (کیلووات)
۲۰۰	۹۹۷۷,۹	۴۹۱۵۰,۹
۳۰۰	۱۹۳۶۱,۷	۸۳۴۵۵,۷
۴۰۰	۳۴۱۵۲,۶	۱۲۸۵۵۶,۱
۵۰۰	۵۶۳۶۸,۷	۱۸۹۴۲۷,۱
۶۰۰	۸۸۲۱۷,۳	۲۶۸۳۵۷,۳

۱. موتور در حالت پایدار کار می‌کند.
۲. تغییرات در انرژی پتانسیل ناچیز فرض می‌گردد.
۳. هوا و گازهای خروجی گاز ایده آل فرض می‌گردند.
۴. از کار مصرفی متعلقات فرعی موتور در مقابل کار کمپرسور صرف‌نظر شده است.

۴- نتایج و بحث

جدول‌های (۱)، (۲) و (۳) مشخصات ترمودینامیکی محاسبه شده برای کمپرسور موتور توربوفن در سطح دریا در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای سرعت‌های ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ متر بر ثانیه می‌باشند.

جدول ۱: نرخ اکسرژی فیزیکی ورودی و خروجی کمپرسور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

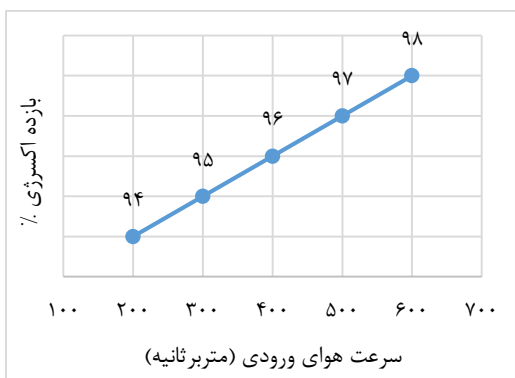
سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)	نرخ اکسرژی فیزیکی ورودی (کیلووات)	نرخ اکسرژی فیزیکی خروجی (کیلووات)
۲۰۰	۱۰۰۵۲,۶	۴۹۲۳۳,۲
۳۰۰	۱۹۶۱۹,۳	۸۳۵۹۷,۸
۴۰۰	۳۴۷۷۱,۹	۱۲۹۷۹۳,۲
۵۰۰	۵۷۵۹۳,۹	۱۹۲۴۷۶,۴
۶۰۰	۹۰۳۶۴,۹	۲۷۳۲۴۰,۹

جدول ۲: نرخ کل اکسرژی فیزیکی ورودی و کار کمپرسور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)	نرخ کار کمپرسور (کیلو وات)	نرخ کل اکسرژی فیزیکی ورودی (کیلو وات)
۲۰۰	۴۲۳۵۹,۱	۵۲۴۱۱,۸
۳۰۰	۶۸۳۹۸,۰۱	۸۸۰۱۷,۵
۴۰۰	۱۰۰۲۰۰,۹	۱۳۴۹۷۲,۹
۵۰۰	۱۳۹۵۷۵,۷	۱۹۷۱۶۹,۶
۶۰۰	۱۸۸۲۴۵,۹	۲۷۸۶۱۰,۸

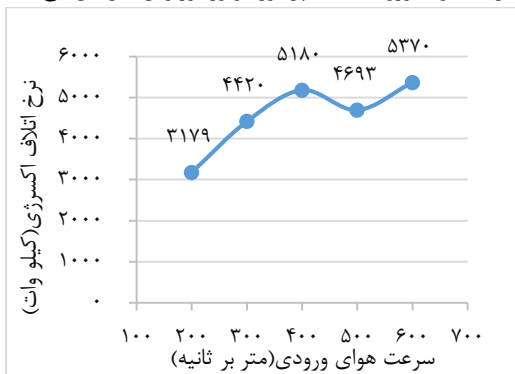
جدول ۸: نرخ اتلاف اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی کمپرسور در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)	نرخ اتلاف اکسرژی (کیلو وات)	نرخ تولید آنتروپی (کیلو وات بر کلوین)
۲۰۰	۳۰۷۳٫۸	۹٫۹۷
۳۰۰	۳۹۶۶٫۵	۱۲٫۸۷
۴۰۰	۵۰۳۲٫۹	۱۶٫۳۰
۵۰۰	۵۰۶۲٫۱	۱۶٫۴۳
۶۰۰	۵۳۶۹٫۴	۱۸٫۳۰



شکل ۲: بازده اکسرژی کمپرسور موتور توربوفن در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

بر اساس شکل (۲) بازده اکسرژی موتور توربوفن با افزایش سرعت هوای ورودی به کمپرسور موتور توربوفن، افزایش می‌یابد.



شکل ۳: نرخ اتلاف اکسرژی کمپرسور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

با توجه به شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) با افزایش سرعت هوای ورودی بازده، اتلاف اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی کمپرسور

جدول‌های (۵) و (۶) آهنگ اکسرژی فیزیکی ورودی و آهنگ اکسرژی فیزیکی خروجی کمپرسور موتور توربوفن TF30 و در نهایت نرخ کل اکسرژی‌های ورودی و خروجی کمپرسور و نرخ کار کمپرسور را برای دمای هوای ورودی ۳۵ درجه سانتی‌گراد و فشار در سطح دریا نشان داده‌اند.

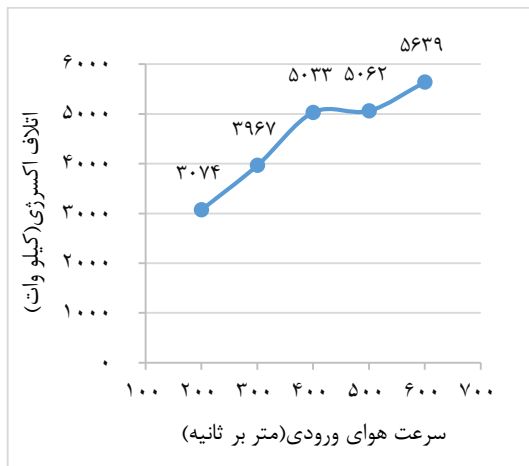
جدول ۶: نرخ کل اکسرژی فیزیکی ورودی کمپرسور و کار کمپرسور در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)	نرخ کار کمپرسور (کیلو وات)	نرخ اکسرژی ورودی (کیلو وات)
۲۰۰	۴۲۲۴۶٫۹	۵۲۲۲۴٫۸
۳۰۰	۶۸۰۶۰٫۵۱	۸۷۴۲۲٫۱۶
۴۰۰	۹۹۴۳۶٫۴	۱۳۳۵۸۹٫۰۶
۵۰۰	۱۳۸۱۲۰٫۴	۱۹۴۴۸۹٫۱
۶۰۰	۱۸۵۷۷۹٫۴	۲۷۳۹۹۶٫۱

جدول (۷) بازده اکسرژی کمپرسور موتور توربوفن در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی را نشان می‌دهد. جدول (۸) نرخ اتلاف اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی کمپرسور در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی می‌باشد. در جداول (۷) و (۸) مشاهده می‌شود با افزایش سرعت هوای ورودی، بازده اکسرژی، نرخ اتلافات و نرخ تولید آنتروپی افزایش می‌یابد. با توجه به جداول به دست آمده، برای تحلیل بهتر، این داده‌ها را در قالب شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است.

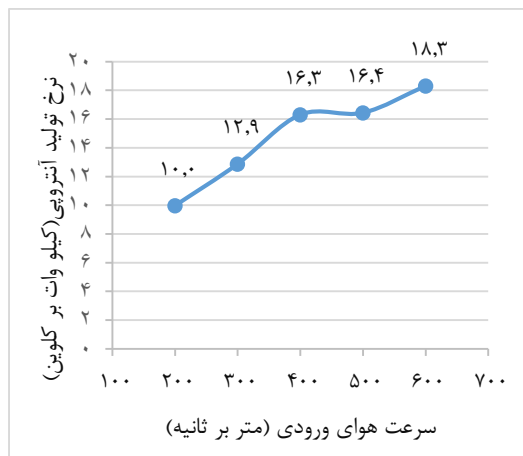
جدول ۷: بازده اکسرژی کمپرسور موتور توربوفن در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)	بازده اکسرژی (%)
۲۰۰	۹۴
۳۰۰	۹۵
۴۰۰	۹۶
۵۰۰	۹۷
۶۰۰	۹۸



شکل ۶: اتلاف اکسرژی کمپرسور در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

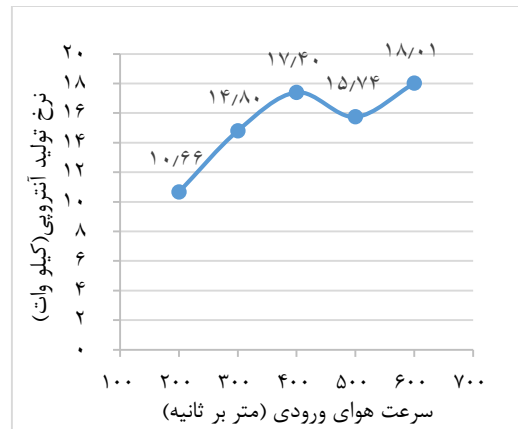
بر اساس شکل‌های (۳) و (۶) با توجه به افزایش دمای هوای ورودی به کمپرسور، مشاهده می‌شود اتلافات اکسرژی در کمپرسور نیز در سرعت‌های یکسان افزایش داشته‌اند. در سرعت هوای ورودی ۶۰۰ متر بر ثانیه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد اتلاف اکسرژی ۵۲۷۰ کیلووات می‌باشد در حالی که در همین سرعت در دمای هوای ورودی ۳۵ درجه سانتی‌گراد این مقدار به ۵۶۳۹ کیلووات رسیده است. شکل (۷) نرخ آنتروپی تولید شده در دمای ۳۵ سانتی‌گراد در فشار سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت را نشان داده است.



شکل ۷: نرخ تولید آنتروپی کمپرسور در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

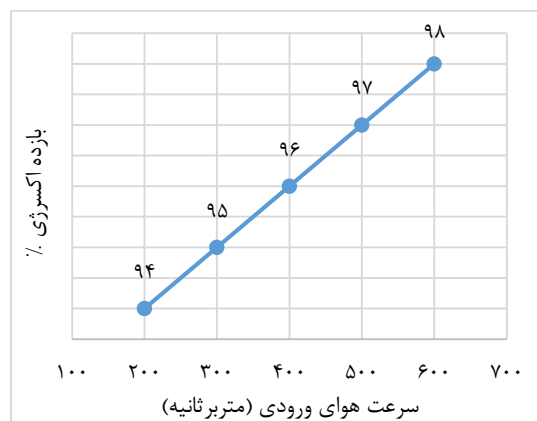
با مقایسه شکل‌های (۴) و (۷) مشاهده شد با افزایش دمای هوای ورودی به کمپرسور نرخ تولید آنتروپی نیز افزایش می‌یابد.

افزایش یافته‌اند. با توجه به شکل (۳) با افزایش سرعت هوای ورودی به کمپرسور اتلاف اکسرژی افزایش یافته است. سرعت ۶۰۰ متر بر ثانیه با اتلاف اکسرژی ۵۲۷۰ کیلووات، بیشترین اتلاف اکسرژی در بین سرعت‌های دیگر را دارد. هر مقدار اتلاف اکسرژی افزایش بیابد نرخ تولید آنتروپی افزایش می‌یابد. در شکل (۴) با افزایش سرعت هوای ورودی و اتلاف اکسرژی، افزایش تولید آنتروپی را نشان داده است.



شکل ۴: نرخ تولید آنتروپی کمپرسور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) نیز بازده اکسرژی، نرخ اتلاف اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی کمپرسور را در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اساس تغییرات سرعت هوای ورودی به کمپرسور را نشان داده‌اند.



شکل ۵: بازده اکسرژی کمپرسور موتور توربوفن در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

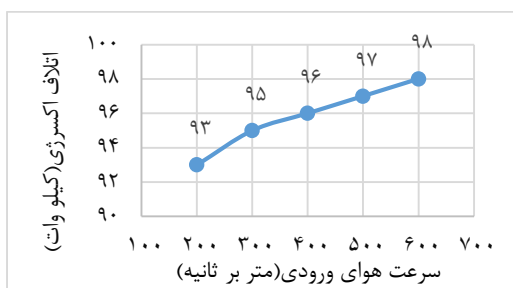
جدول ۱۱: بازده اکسرژی کمپرسور موتور توربو فن در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)	بازده اکسرژی %
۲۰۰	۹۳
۳۰۰	۹۵
۴۰۰	۹۶
۵۰۰	۹۷
۶۰۰	۹۸

در جدول (۱۱) بازده اکسرژی کمپرسور در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی محاسبه شده است. در جدول (۱۲) نرخ اتلاف اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی کمپرسور در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی به دست آمده است. مشاهده می‌شود با افزایش سرعت هوای ورودی به کمپرسور مقدار نرخ اتلافات اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی افزایش می‌یابد.

جدول ۱۲: اتلاف اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی کمپرسور در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)	نرخ اتلاف اکسرژی (کیلو وات)	نرخ تولید آنتروپی (کیلو وات بر کلوین)
۲۰۰	۳۳۹۶,۳	۱۱,۸
۳۰۰	۴۴۷۵,۴	۱۵,۵
۴۰۰	۴۹۵۹,۴	۱۷,۲
۵۰۰	۴۷۹۴,۰	۱۶,۶
۶۰۰	۳۳۹۶,۳	۱۱,۸



شکل ۸: بازده اکسرژی کمپرسور موتور توربو فن در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

جدول ۹: نرخ اکسرژی فیزیکی ورودی و خروجی کمپرسور در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)	نرخ اکسرژی فیزیکی ورودی (کیلووات)	نرخ اکسرژی فیزیکی خروجی (کیلووات)
۲۰۰	۱۰۱۳۲,۹	۴۹۲۱۲,۴
۳۰۰	۱۹۸۹۵,۵	۸۴۱۷۴,۴
۴۰۰	۳۵۴۳۵,۵	۱۳۱۴۸۷,۹
۵۰۰	۵۸۹۰۶,۴	۱۹۵۲۳۶,۲
۶۰۰	۹۲۶۶۴,۱	۲۷۸۷۵۴,۲

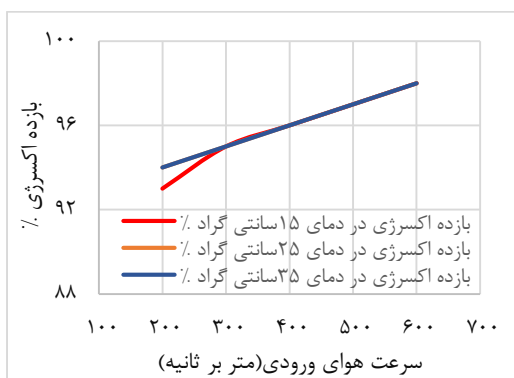
با توجه به جدول (۹) نرخ اکسرژی فیزیکی ورودی و خروجی کمپرسور در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی با افزایش بیشتری نسبت به دماهای ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد مواجه شده است.

جدول ۱۰: کل اکسرژی فیزیکی ورودی و کار کمپرسور در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)	نرخ کار کمپرسور (کیلو وات)	نرخ اکسرژی ورودی (کیلو وات)
۲۰۰	۴۲۴۷۵,۹	۵۲۶۰۸,۸
۳۰۰	۶۸۷۵۴,۳	۲۸۳۵۳۹,۲
۴۰۰	۱۰۱۰۱۱,۸	۱۳۴۴۴۷,۳
۵۰۰	۱۴۱۱۲۳,۸	۲۰۰۳۰,۲
۶۰۰	۱۹۰۸۷۵,۲	۱۹۰۸۷۵,۲

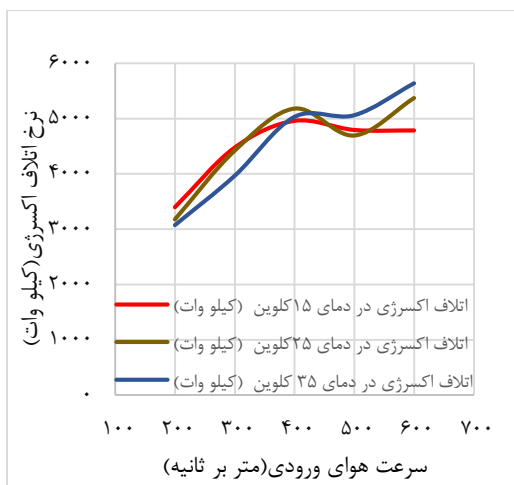
جدول های (۹) و (۱۰) نرخ کل اکسرژی ورودی و خروجی ، نرخ اتلاف اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد در اثر تغییرات سرعت هوای ورودی به کمپرسور موتور توربو فن را نشان می‌دهند. با توجه به جداول (۹) و (۱۰) بازده اکسرژی، نرخ اتلاف اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی در جداول زیر نشان داده شده‌اند.

با توجه به جداول مربوط به محاسبات اکسرژی در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد، مقادیر بازده اکسرژی، اتلاف اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی در شکل های (۸)، (۹) و (۱۰) نشان داده شده اند.



شکل ۱۱: مقایسه بازده اکسرژی کمپرسور موتور توربو فن در اثر تغییرات دما و سرعت هوای ورودی

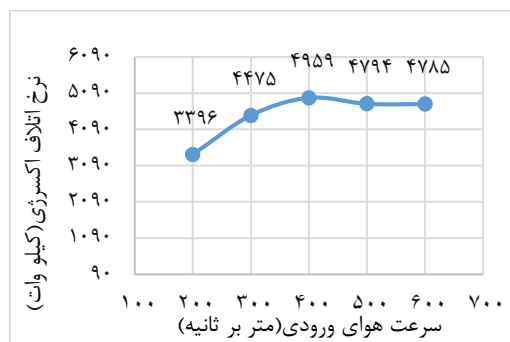
با توجه به شکل (۱۱) تغییرات دما و سرعت هوای ورودی بالا، با بازده اکسرژی نسبتاً یکسانی برخوردارند. فقط در سرعت‌های پایین به دلیل کاهش نرخ جرم ورودی به کمپرسور و در دمای پایین مقداری بازده اکسرژی کاهش یافته است چون که دمای خروجی کمپرسور نیز با کاهش مواجه است.



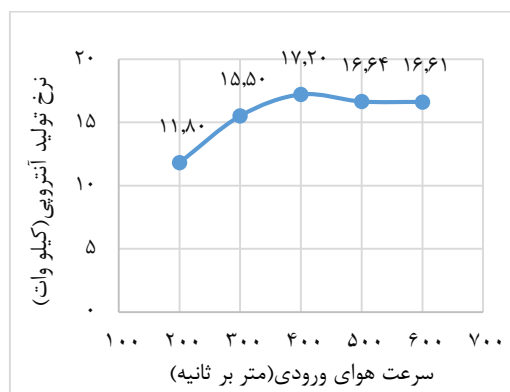
شکل ۱۲: مقایسه نرخ اتلاف اکسرژی کمپرسور موتور توربو فن در اثر تغییرات دما و سرعت هوای ورودی

بر اساس شکل (۱۲) هر چقدر سرعت و دمای هوای ورودی به کمپرسور افزایش یابد اتلافات اکسرژی افزایش پیدا کرده ولی در دمای هوای ورودی ۱۵ درجه سانتی گراد هر چقدر سرعت از یک نقطه بیشتر شود افزایش اتلافات اکسرژی با شیب ملایمی همراه خواهد بود.

با توجه به شکل‌های (۹) و (۱۰)، با کاهش دمای هوای ورودی اتلافات اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی کاهش می‌یابند.



شکل ۹: نرخ اتلاف اکسرژی کمپرسور در دمای ۱۵ درجه سانتی گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی



شکل ۱۰: نرخ تولید آنتروپی کمپرسور در دمای ۱۵ درجه سانتی گراد در سطح دریا بر اثر تغییرات سرعت هوای ورودی

در شکل (۱۰) با ورود دمای هوای ۱۵ درجه سانتی گراد نرخ تولید آنتروپی در سرعت هوای ورودی ۴۰۰ متر بر ثانیه، ۱۷،۲۰ کیلو وات محاسبه شده است در صورتی که در همین سرعت ولی با دمای هوای ورودی ۲۵ درجه سانتی گراد در شکل (۴) این مقدار برابر با ۱۷،۴۰ کیلو وات می‌باشد که نشان از کاهش نرخ تولید آنتروپی دارد.

برای مقایسه نتایج به دست آمده، شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) مقایسه بازده اکسرژی، اتلاف اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی در تغییرات سرعت هوای ورودی و تغییرات دمایی محاسبات انجام شده آورده شده‌اند.

۲. تغییرات فشار هوای ورودی با استفاده تحلیل اکسرژی بررسی شود.
۳. اتلافات اکسرژی در کمپرسور متاثر از عواملی همچون اصطکاک هوای عبوری بین پره‌های ثابت و متحرک کمپرسور می‌باشد. پیشنهاد می‌شود این عوامل با تحلیل انرژی بررسی گردد.
۴. پیشنهاد می‌شود عوامل نرخ آنتروپی تولید شده در کمپرسور مورد پژوهش قرار گیرد.
۵. پیشنهاد می‌شود راهکارهای مقابله با افزایش نرخ آنتروپی تولید شده در کمپرسور مورد بررسی قرار گیرد.

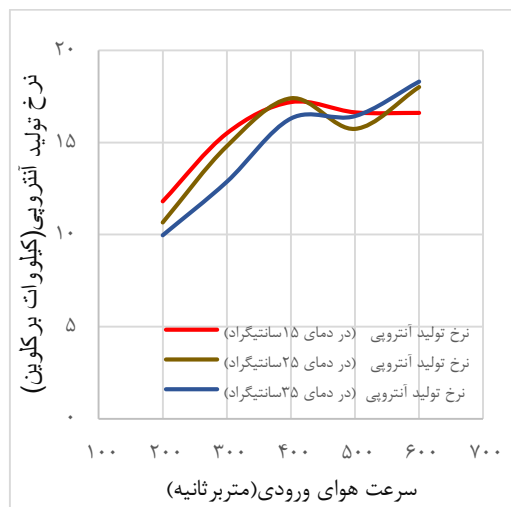
فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی

C_p	گرمای ویژه در حجم ثابت، kj/kg.K
$\dot{E}x_x$	اکسرژی، kw
$\dot{E}x_{ch}$	اکسرژی شیمیایی kw
$\dot{E}x_{dead}$	اتلاف اکسرژی kw
$\dot{E}x_{di}$	اکسرژی دیفیوژری kw
$\dot{E}x_k$	اکسرژی جنبشی kw
$\dot{E}x_p$	اکسرژی پتانسیل kw
$\dot{E}x_{ph}$	اکسرژی فیزیکی kw
g	شتاب گرانشی m/s ²
k	نسبت گرمای ویژه بدون بعد
m	جرم، kg
p	فشار، kpa
r_c	نسبت کمپرسور بدون بعد
\dot{S}_{gen}	نرخ تولید آنتروپی kw/K
T	دما، K
V	سرعت، m/s
\dot{W}	کار کمپرسور kw
Z	ارتفاع، m

علائم یونانی

η	بازده، بدون بعد
--------	-----------------



شکل ۱۳: مقایسه نرخ تولید آنتروپی کمپرسور موتور توربوفن در اثر تغییرات دما و سرعت هوای ورودی

در شکل (۱۳) نیز نشان داده شده است که هر چقدر دما و سرعت هوای ورودی به کمپرسور افزایش یابد نرخ تولید آنتروپی افزایش یافته و در سرعت‌های بالاتر و در دمای پایین تر هوای ورودی این مقدار با شیب کمتری افزایش می‌یابد. اعتبارسنجی این پژوهش در تحقیقی که بر روی موتور توربوجت انجام گرفت [۱]، می‌باشد. طبق این تحقیق [۱]، در سرعت هوای ورودی ۱۰۰ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۱۰۰۰ متری از سطح دریا و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، مقدار نرخ تولید آنتروپی ۴،۶۶ کیلووات که با افزایش سرعت به ۲۰۰ متر بر ثانیه این مقدار به ۸،۲۴ کیلووات افزایش یافته است.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش مشاهده شد تلفات اکسرژی و نرخ تولید آنتروپی در کمپرسور موتور توربوفن TF30 با افزایش سرعت دمای هوای ورودی، افزایش می‌یابد. با ارایه نمودارهای مقایسه‌ای مشاهده شد با کاهش دمای هوای ورودی و افزایش سرعت از یک نقطه به بعد با کاهش اتلافات و تولید نرخ آنتروپی همراه خواهد شد. از این پژوهش می‌توان به این نتیجه رسید که بهترین مکان برای به پرواز درآمدن هواپیمایی با این مدل موتور جایی است که دمای محیطی پایینی داشته باشد. با کاهش دمای هوای ورودی به کمپرسور، سیستم انرژی کمتری برای خنک کردن و متراکم کردن هوا مصرف خواهد کرد که همین امر باعث کاهش نرخ تولید آنتروپی می‌گردد.

در راستای ادامه پژوهش پیشنهادهای زیر توصیه می‌گردد:

۱. پیشنهاد می‌شود که تحلیل اکسرژی پره‌های کمپرسور

بررسی شود

مراجع

- [۸] سنجل، یونس؛ بولز، میخائیل؛ ترمودینامیک با نگرش مهندسی ۱۳۳۲، ترجمه: بهرام پوستی، انتشارات متفکران.
- [9] A. Bejan, *Advanced Engineering Thermodynamics*, John Wiley and Sons, New York, USA.
- [10] E. T. Turgut, Exergy Analysis of a Turbofan Aircraft Engine, *International Journal of Exergy*, 6 2 (2009) 181-199.
- [11] A. Bejan, *Entropy generation through heat and fluid flow*, Wiley, New York (1982).
- [12] E. T. Turgut, T. H. Karakoc, A. Hepbasli, Exergetic analysis of an aircraft turbofan engine, *International Journal of Energy Research*, 31 (2007) 1383-1397.
- [13] I. Dincer, Y. A. Cengel, Energy entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering, *Entropy*, 3 (2001) 116-149.
- [14] A. Bejan, Entropy generation minimization, exergy analysis, and the constructal law, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38 (2) (2013) 329-340.
- [1] A. Bejan, D. L. Siems, The Need for Exergy Analysis and Thermodynamic Optimization and Aircraft Development, *International Journal of Exergy*, 1 (2001) 14-24.
- [2] A. Bejan, *Advanced engineering thermodynamics*, Wiley, New York (2006).
- [3] M. A. Ehyaei, A. Anjiridezfuli, M. A. Rosen, Exergy analysis of an aircraft turbojet engine with an afterburner, *International Journal of Engineering Thermophysics*, 17(4) (2013) 1181-1194.
- [4] O. Turan, Exergetic effects of some design parameters on the small turbojet engine for unmanned air vehicle applications, *International Journal of Engineering Thermophysics*, 46 (2012) 51-61.
- [۵] وال. گوران؛ ترجمه: مجید عمیدپور، مهندس احمدرضا سجادی، اکسرژی ۱۳۸۷، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- [۶] نبوی، سید محمد؛ تئوری توربین های گازی و موتور جت ۱۳۸۷، مرکز نشر دانشگاهی.
- [7] <https://asiavacuum pumps.com/portals/0/image/MehvariComperssor/MehvariComperssor11.jpg>