

Numerical Investigation of The Effect of Spraying Vapor in Combustion Chamber of Turbine Engine on Engine Performance

Iman Mahmoodi¹, Mohammad Mehdi Doustdar^{2*} 

¹ Master's degree, Imam Hussein University, Tehran, Iran imanmahmoodi.mechanics@gmail.com

² Professor, Imam Hussein University, Tehran, Iran (*Correspondence: mdostdar@ihu.ac.ir)

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research Paper

Received: 02 June 2025

Received in Revised form: 21 July 2025

Accepted: 03 August 2025

Available online: 23 August 2025

*Correspondence:

mdostdar@ihu.ac.ir

GRAPHICAL

Turbine engines are one of the vital components in the transportation sector. Due to their widespread usage, there have been continuous strides to enhance the power and thrust of the turbine engines and also the overall cycle efficiency using various techniques. One of those techniques is the introduction of steam into the combustion chamber. The addition of steam enhances the mass flow rate of the working fluid, hence increasing the power and thrust of the engine. This would, additionally, reduce the outlet temperature from the combustion chamber and extend the turbine life while reducing the emissions; besides, as mentioned above, the steam generation from exhaust gases of the engine increases the overall cycle efficiency. The investigations are presented over LF502 engine in this study on injecting steam into a combustion chamber. The type of research that has been carried out is dealing with various flow rates and pressures besides fuel to air ratios. Calculations with STAR-CCM+ are carried out, then with a MATLAB code, the analysis for a suitable gas cycle of the engine and engine power and thrust calculation was found, at the same time, producible steam from exhaust gases estimation is done. The tests demonstrated that the injection of steam, solely derived from exhaust gases for the generation of steam without any additional fuel, resulted in power up to a maximum increase of 17%. Moreover, when added the required supplementary fuel to generate steam, three times the power increase and an increase in thrust by two-thirds were achievable.

Keywords:

Steam Injection

Computational Fluid Dynamics

Combustion Chamber

Power

Cycle Analysis

Cite this article: Mahmoodi, I[®], Doustdar, M. M.[®]. Numerical Investigation of The Effect of Spraying Vapor in Combustion Chamber of Turbine Engine on Engine Performance. Fluid Mechanics and Aerodynamics Year; 14 (1): 91-104. DOI: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.1.7.0>



©The Author(s).

Publisher: Imam Hossein University

بررسی عددی تأثیر پاشش بخار آب در محفظه احتراق موتور توربینی بر روی عملکرد موتور

ایمان محمودی^۱، محمد مهدی دوستدار^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع) (imanmahmoodi.mechanics@gmail.com)

^۲ استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع) (نویسنده مسئول: mdostdar@ihu.ac.ir)

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی
دریافت: ۱۲ خرداد ۱۴۰۴
بازنگری: ۳۰ تیر ۱۴۰۴
پذیرش: ۱۲ مرداد ۱۴۰۴
ارائه آنلاین: ۰۱ شهریور ۱۴۰۴

کلید واژه‌ها:

پاشش بخار آب
دینامیک سیالات محاسباتی
محفظة احتراق
توان
تحلیل سیکل

چکیده

موتورهای توربینی جزء مهمی از صنعت حمل و نقل هستند که به علت گستردگی استفاده از آن‌ها، همواره سعی شده تا با روش‌های مختلف بتوان هم میزان توان و رانش موتور را افزایش داد و هم بازده سیکل آن‌ها را بالا برد. یکی از این روش‌ها، استفاده از پاشش بخار آب در محفظه احتراق است. پاشش بخار آب می‌تواند با افزایش دبی جرمی سیال، توان و رانش موتور را افزایش دهد. همچنین می‌تواند دمای خروجی محفظه احتراق را کاهش و از این طریق عمر توربین را افزایش داده و باعث کاهش آلاینده‌ها شود. علاوه بر آن، بخار آب را می‌توان از گازهای خروجی موتور نیز تولید نمود که این امر باعث افزایش بازده کلی سیکل می‌شود. در تحقیق حاضر، پاشش بخار آب در محفظه احتراق موتور ای ال اف ۵۰۲ بررسی شده است. پاشش بخار آب در دبی‌های مختلف، در چند فشار و نسبت سوخت به هوا مطالعه شده است. جهت انجام محاسبات از نرم افزار استار سی سی ام استفاده شد. سپس با استفاده از نتایج به دست آمده از آن، سیکل گازی متناظر موتور با کد مطلب نوشته شده، تحلیل شده و توان و رانش موتور محاسبه گردید و میزان بخار آب تولیدی توسط گازهای خروجی نیز تخمین زده شد. مشاهده شد که تأثیر پاشش بخار بدون افزودن سوخت اضافی به موتور و با استفاده از گازهای خروجی برای تولید بخار، می‌تواند توان موتور را تا ۱۷ درصد افزایش دهد. این مقدار با افزودن سوخت اضافی مورد نیاز برای تولید بخار، می‌تواند تا حداکثر ۳ برابر توان و حداکثر ۲/۳ رانش را ارائه دهد.

استناد: محمودی، ایمان، دوستدار، محمد مهدی. بررسی عددی تأثیر پاشش بخار آب در محفظه احتراق موتور توربینی بر روی عملکرد موتور. مکانیک سیالات و آیرودینامیک. (۱۴۰۴): ۱۴ (۱): ۹۱-۱۰۴.

DOI: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.1.7.0>

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).

نویسندگان. ©



OPEN ACCESS

۱- مقدمه

در زمان‌های گذشته یکی از مشکلات موتورهای جت، شتاب‌گیری آهسته آن‌ها بود. این مسئله باعث می‌شد تا نیاز به مسافت زیادی برای برخاست هواپیما باشد و همچنین در شرایط خاص، خطراتی را بیافریند. به همین دلیل کمیته‌ی ملی مشاوره‌ی هوانوردی^۱ و بخش‌هایی از صنایع هوایی آمریکا در جستجوی روشی بودند تا بتوان رانش را برای مدت کوتاهی افزایش داد. از جمله این راه‌ها، استفاده از پس‌سوز، خروج هوا از سیکل اصلی و سوزاندن آن در محفظه احتراق ثانویه، تزریق خنک‌کننده و استفاده از نازل با دهانه‌ی متغیر بود. آزمایشگاه استاتیک پیشران جت آمریکا^۲ در توسعه‌ی هرکدام از این روش‌ها نقش مهمی را ایفا کرد [۱]. باید توجه داشت که قدرت نیز پارامتر مهمی در موتورهای زمینی و دریایی است. از بین روش‌های نام‌برده شده، روش تزریق خنک‌کننده می‌تواند به‌عنوان روش افزایش قدرت موتور نیز استفاده شود. لازم به ذکر است، نمی‌توان از سایر روش‌ها به‌طور مستقیم و بدون تغییر اساسی در موتور در جهت افزایش قدرت استفاده نمود.

پاشش سیال خنک‌کننده به‌عنوان یکی از این روش‌ها، از دیرباز مورد استفاده بوده است. پاشش سیال می‌تواند در مکان‌های مختلف موتور شامل ورودی، درون کمپرسور و محفظه احتراق انجام شود.

پاشش در ورودی می‌تواند از طریق کاهش دمای به وجود آمده به علت تبخیر سیال پاشیده شده در قسمت ورودی موتور، باعث افزایش دبی جرمی هوای ورودی به موتور شود. در سال ۱۹۹۴ میلادی، محققان آزمایشگاه تحقیقات موتور هواپیمای آمریکا^۳ این سیستم را روی موتور I-16 پیاده کرده و آن را با افزودن آب، آب - الکل، کروسین - کربن دی‌اکسید آزمون کردند. در تمام حالت‌های آزمایش انجام‌شده (به جز افزودن کروسین)، رانش در حدود ۳۵ درصد افزایش داشت. این سیستم با پیاده‌سازی روی موتور Bell P-59A باعث افزایش ۲۰ درصدی رانش و کاهش ۲۰ درصدی مسافت لازم برای برخاست شد [۱].

جونز و همکارش [۲] تأثیر پاشش چند نوع سیال در ورودی کمپرسور شعاعی موتوری با ۱۶۰۰ پوند رانش را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج ارائه‌شده از کار آن‌ها، پاشش ۲ پوند بر ثانیه آب باعث افزایش ۳۵/۸ درصدی رانش شده است. همچنین پاشش ۱/۶ پوند بر ثانیه آب به همراه ۰/۴ پوند بر ثانیه الکل در ورودی کمپرسور، افزایش رانش ۴۰ درصدی را در پی داشته است. اثر پاشش کروسین در ورودی بسیار ناچیز بوده و افزودن

دی‌اکسید کربن با نرخ ۴/۶ پوند بر ثانیه رانش را ۲۳/۵ درصد افزایش داد. پاشش ۳/۵ پوند بر ثانیه کربن دی‌اکسید به همراه مخلوط آب و الکل، درصد افزایش را تا ۳۶ درصد بالا برد. لازم به ذکر است که آزمایش در سرعت پروازی صفر انجام شد.

جونز و انگلن [۳] تأثیر پاشش مخلوط آب و الکل در ورودی یک کمپرسور شعاعی را آزمایش کردند. در این آزمایش ماکزیمم افزایش رانش به دست آمده ۲۶ درصد بوده و برای حالت پاشش آب با نرخ ۴/۵ پوند بر ثانیه به همراه الکل با نرخ ۲ پوند بر ثانیه بوده است. در این آزمایش با افزودن مخلوط در ورودی، سوخت اضافه‌ای به موتور تزریق نشده بود (یعنی دبی سوخت در حالت پاشش و بدون پاشش یکسان بود).

ویلکاکس [۴] تأثیر پاشش آب در ورودی کمپرسور را به‌صورت تئوری مورد بررسی قرار داد. برای این کار مقدار آب پاشش شده به میزانی در نظر گرفته شد که ۱) ورودی کمپرسور به حالت اشباع برسد، ۲) در خروجی کمپرسور طی فرآیند افزایش فشار به حالت اشباع برسد. همچنین برای مقایسه، حالت پاشش آب در محفظه احتراق را نیز مورد بررسی قرار داد. طبق نتایج این کار، زمانی که هوا در خروجی کمپرسور به حالت اشباع برسد، افزایش رانش بیشتری در مقایسه با حالت هوای اشباع در ورودی به دست آمد. همچنین با افزایش سرعت پروازی، مقدار رانش اضافه‌شده نسبت به حالت اولیه، افزایش داشته است. در سرعت‌های پروازی کمتر، بسته به دبی آب پاشش شده، حالت پاشش آب به محفظه احتراق، می‌تواند افزایش رانش بیشتری نسبت به حالت اشباع در ورودی داشته باشد.

لوندین [۵] تأثیر پاشش آب در کمپرسور شعاعی و محوری را با آزمایش خود مورد بررسی قرار داد. بررسی‌های او نشان داد که افزایش رانش برای کمپرسور محوری در حالت پاشش در ورودی ۰/۱۵ بوده است اما با تغییر محل پاشش به چند بخش از کمپرسور، افزایش رانش ۰/۲۴ شد.

بارون و همکارانش [۶] تأثیر پاشش مخلوط آب و الکل در ورودی موتور ۴۰۰۰ پوندی با کمپرسور محوری را بررسی کردند. بررسی آن‌ها افزایش ۱۵/۴ درصدی در رانش موتور که ناشی از پاشش ۴/۵ پوند بر ثانیه آب به همراه ۲/۲۵ پوند بر ثانیه الکل بود را نشان داد. آن‌ها همچنین سه سیستم پاشش ورودی را در کار خود مورد بررسی قرار دادند.

یوسلر و همکارش [۷] تأثیر پاشش سیال خنک‌کننده را به همراه پس‌سوز برای موتوری بارانش ۴۰۰۰ پوند مطالعه نمودند. آن‌ها در پاشش ۲ پوند بر ثانیه سیال در کمپرسور و در نسبت استوکیومتری برای سوخت در پس‌سوز، افزایش ۷۰ درصدی رانش را مشاهده کردند. همچنین گزارش شده است که پاشش بیش از ۲ پوند بر ثانیه نیاز به نسبت سوخت به هوای بالایی دارد

^۱ National Advisory Committee for Aeronautics (NACA)^۲ Jet Propulsion Static Laboratory (JPSL)^۳ Aircraft Engine Research Laboratory (AERL)

برای پاشش در محفظه‌ی احتراق ۱۳۵ گالن پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که کاهش NO_x در هر دو حالت تقریباً مشابه و برابر ۵۰٪ است.

از دیگر موارد مهم این کار، نازلی است که برای پاشش در محفظه‌ی احتراق پیشنهاد کرده‌اند. نازل پیشنهادی دارای ساختاری است که سوخت و آب را دریافت کرده و هر دو را به‌صورت آمیزه شده پاشش می‌کند تا اختلاط آب‌وهوا بهتر شود (آب در وسط و سوخت در اطراف). در نتایج این کار می‌توان دید که پاشش در کمپرسور مقدار SFC کمتر، دمای توربین کمتر و کاهش NO_x بیشتری در مقایسه با پاشش در محفظه‌ی احتراق داشته است اما نکته‌ی مهم مصرف آب بالای آن است. همچنین در بررسی صرفه‌ی اقتصادی این کار مشاهده می‌شود که هزینه‌های ناشی از تجهیزات لازم برای این کار کمتر از ۰/۱ هزینه‌ی صرفه‌جویی شده در تعمیر و نگهداری است که مزیت این سیستم را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که طبق این گزارش می‌توان عمر ۲/۵ برابری توربین را با پاشش آب تجربه کرد.

دگت [۱۲] در کار خود انواع روش‌های پاشش آب در سیستم را برای هواپیماهای بوئینگ ۷۴۷، ۷۰۷ و ۷۷۷ معرفی کرده و مزیت استفاده از این سامانه‌ها را در کاهش مقدار NO_x و افزایش عمر موتور بیان کرد. او همچنین در کار دیگری [۱۳]، سیستم پاشش در بوئینگ ۷۴۷ را به‌تفصیل بررسی کرد.

برانکوویچ و همکارانش [۱۴] قابلیت فن دینامیک سیالات محاسباتی را در محاسبه‌ی غلظت آلاینده‌ها برای یک محفظه‌ی احتراق با و بدون پاشش آب بررسی کردند. مشاهده شد که روش عددی برای توزیع دما مطابقت خوبی با آزمایش داشته است ولی در پیش‌بینی مقادیر غلظت آلاینده‌ها کارآمد نبود، اما روند تغییرات برحسب نسبت آب به سوخت را درست تخمین زده بود. همچنین در نتایج این کار مشاهده شد که با افزایش پاشش آب، ماکزیمم دما در محفظه‌ی احتراق و غلظت آلاینده‌ها کاهش داشته است.

فرخی پور و همکارانش [۱۵] تأثیر پاشش آب در محفظه‌ی احتراق را بر کاهش NO_x با شبیه‌سازی رایانه‌ای تحقیق کردند. بدین منظور از مدل اویلری-لاگرانژی برای این شبیه‌سازی استفاده شد. آن‌ها تأثیر جهت پاشش، مقدار و مکان پاشش را بر عملکرد محفظه‌ی احتراق و مقدار گازهای منتشرشده از احتراق، بررسی کردند. طبق نتایج این شبیه‌سازی‌ها، با پاشش آب اگرچه بازده احتراق و دمای بیشینه کاهش می‌یافت اما تأثیر مثبت آن یک سوم شدن غلظت NO_x بود.

امانی و همکارانش [۱۶] با روش CFD، پاشش در محفظه‌ی احتراق را بررسی نمودند. هدف از این شبیه‌سازی، بررسی تأثیر پارامترهای طراحی نظیر زاویه‌ی پاشش، دبی پاشش و عدد

که این باعث احتراق ناکارآمد و ناپایدار شده و ازاین‌جهت مانع پاشش بیش از ۲ پوند بر ثانیه سیال به کمپرسور می‌شد.

بومن و همکارش [۸] تأثیر پاشش مخلوط در دبی‌های مختلف را در قسمت‌های متفاوت یک موتور بارانش ۵۲۰۰ پوند، (ازجمله ورودی کمپرسور، طبقات کمپرسور، محفظه احتراق و ترکیبی از پاشش طبقات کمپرسور و محفظه احتراق) آزمایش کردند. در این آزمایش افزایش ۳۹/۵ درصدی رانش در حالت پاشش ترکیبی (در شش طبقه‌ی کمپرسور و محفظه احتراق) مشاهده شد. آن‌ها همچنین در پاشش خنک‌کننده در محفظه‌ی احتراق با نسبت خنک‌کننده به هوای ۲۵، ۰/۱ درصد افزایش رانش را شاهد بودند. فن و همکارانش [۹] تأثیر پاشش آب در یک محفظه‌ی احتراق را بر روی مقادیر NO_x بررسی کردند. این شبیه‌سازی با استفاده از KIVA-II انجام شد. در نتایج این کار مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت آب به سوخت مقادیر NO و CO کاهش داشته است. آن‌ها همچنین با تغییر موقعیت نازل پاشش، تأثیرش بر مقادیر آلاینده را تحقیق کرده و مشاهده نمودند که کمترین مقدار برای موقعیت نازل در مکان ۰/۴ طول محفظه از ابتدای آن است.

مرسی آکاردو و همکارش [۱۰] در مقاله‌ی خود نتایج تحلیل ترمودینامیکی در موتوری با سیستم پاشش آب در محفظه‌ی احتراق را ارائه نمودند. آن‌ها سیستم پاشش را به‌صورت GTITWI^۱ در نظر گرفتند. آنچه در این سیستم لازم توجه است هماهنگی دمای محفظه‌ی احتراق و مقدار آب پاشش شده است. آن‌ها با در نظر گرفتن شرایط عملکردی و فیزیکی فرضی برای موتور و اجزای آن، نموداری برای نسبت آب به سوخت و بازده ارائه دادند. آنچه در این کار گزارش شده، برای یک موتور یکسان و با فرض بازده داخلی یکسان اجزا، بازده حرارتی در حالت GTITWI^۲ بیشتر از موتور بدون سیستم پاشش (GTI^Y) در دمای محفظه‌ی احتراق مشابه بود. پس می‌توان نتیجه گرفت که یکی از مزیت‌های مهم سیستم GTITWI دمای پایین‌تر آن در بازده مشابه است که کار را در انتخاب مواد لازم برای ساخت موتور آسان‌تر و عملی‌تر می‌کند. همچنین کاهش NO_x نیز از مزیت این سیستم است.

دگت و همکارانش [۱۱] اثر پاشش آب در قسمت‌های مختلف موتور (پاشش قبل از کمپرسور کم‌فشار، پرفشار و محفظه‌ی احتراق) را بر روی کاهش مقدار NO_x ، عمر، هزینه‌های انجام‌شده برای سیستم و سود حاصل از آن و مقدار SFC بررسی کردند. در کار آن‌ها ذکر شده است که مخزن آب موردنیاز برای یک هواپیمای بزرگ که فقط در حال تیک‌آف از این سیستم استفاده می‌کند، در حالت پاشش در کمپرسور می‌بایست ظرفیتی در حدود ۳۰۰ گالن داشته باشد. این در حالی است که این مقدار

^۱Gas Turbine Installation Total Water Injection

^۲Gas Turbine Installation

۲- معادلات حاکم

در کار پیش رو، شبیه‌سازی جریان احتراقی هوا که دارای اجزای مختلف بوده با سوخت مایع Jet-A انجام گرفته است. شبیه‌سازی چنین جریانی که شامل سوخت مایع است، نیازمند استفاده از مدل‌های جریان دوفازی بوده که به علت ماهیت قطره‌ای سوخت، بهترین گزینه استفاده از معادلات لاگرانژی برای فاز قطره است که به صورت زیر هستند:

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = F_d + F_p \quad (1)$$

که m_p جرم ذره و V_p سرعت آن بوده و F_d و F_p به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A_p |V_s| V_s \quad (2)$$

$$F_p = -V_p \nabla P_{static} \quad (3)$$

که در این روابط:

$$V_s = V - V_p \quad (4)$$

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) & Re_p \leq 10^3 \\ 0.44 & Re_p > 10^3 \end{cases} \quad (5)$$

$$Re_p = \frac{\rho |V_s| D_p}{\mu} \quad (6)$$

که در این روابط D_p قطر ذره است. از آنجاکه جریان سوخت می‌بایست تبخیر شده و با جریان اصلی وارد واکنش شود، باید انتقال جرم و انرژی برای فاز لاگرانژی در نظر گرفته شود. مدل انتقال جرم بین دو فاز لاگرانژی و فاز پیوسته، مدل تبخیر شبه پایا برای قطره‌ی تک جزئی^۳ فرض شده که نرخ انتقال جرم در این مدل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{m}_p = -g^* A_s \ln(1+B) \quad (7)$$

که در این رابطه A_s مساحت سطح ذره بوده و:

$$B = \frac{C_p (T - T_p)}{L} \quad (8)$$

$$g^* = \frac{k Nu_p}{C_p D_p} \quad (9)$$

معادله‌ی انرژی برای ذره به صورت زیر است:

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = \dot{Q}_t + \dot{m}_p L \quad (10)$$

که مقدار $\dot{Q}_t$ برابر است با:

$$\dot{Q}_t = f h A_s (T - T_p) \quad (11)$$

که در آن:

$$f = \frac{z}{e^z - 1} \quad (12)$$

$$z = \frac{-\dot{m}_p C_p}{h A_s}$$

چرخش^۱ بر بازده حرارتی، دمای بیشینه و غلظت آلاینده‌ها بود. آن‌ها نقطه‌ی مناسب طراحی را نسبت آب به سوخت ۳/۴ محاسبه کردند که باعث کاهش ۱۹ درصدی ماکزیمم دما و کاهش ۸۷ درصدی NO_x می‌شد. البته باید به این نکته توجه نمود که در صورتی که شعله در این حالت پایدار نباشد، نقطه‌ی مناسب دارای نسبت ۲ است. لازم به ذکر است که در این کار تعداد صد شبیه‌سازی که با فن طراحی آزمایش^۲ انتخاب شده‌اند، انجام شده است تا نقطه‌ی مناسب را مشخص کنند. تحلیل CFD در این کاربر اساس روش حجم محدود با الگوریتم PISO بوده و به صورت دوبعدی انجام گرفته است.

دیوید آلزاندرو بلاک نولو و همکارانش [۱۷] پاشش در ورودی موتور آرتوست را آزمایش نمودند. آزمایش آن‌ها در سه نسبت آب به هوای ۰.۵، ۱ و ۲ درصد انجام شد. آن‌ها ابتدا در آزمایشی جداگانه ابعاد قطرات را در دما و فواصل مختلف از نازل پاشش اندازه‌گیری کردند. در آزمایش موتور طبق نتایج ارائه شده پاشش آب در ورودی با نسبت ۲ درصد، باعث کاهش ۳۴ درصدی دمای خروجی کمپرسور، کاهش ۳۱/۶ درصدی دمای خروجی توربین، کاهش ۹/۶ درصدی کار کمپرسور و افزایش ۲/۳ درصدی نسبت فشار کمپرسور شده است. همچنین در این حالت نسبت سوخت به هوا ۲/۲ درصد افزایش، مقدار CO، ۴۰ درصد افزایش و NO_x ، ۲۵ درصد کاهش را تجربه کردند.

با توجه به آنچه در تاریخچه‌ی کار موجود است، محدودیت اصلی روش پاشش سیال در موتورهای هوایی، وزن آب لازم برای این کار است که در سفرهای هوایی و همچنین کاربردهای نظامی یک نکته‌ی منفی به حساب می‌آید. لکن استفاده از این سیستم در حمل‌ونقل دریایی که مبتنی بر موتورهای توربینی است، مهم‌ترین ضعف این سیستم را جبران کرده و می‌توان از آب دریا برای پاشش در موتور استفاده نمود. البته این امر مستلزم بررسی عملکرد این موتورها به هنگام استفاده از آب دریا است. همچنین تأثیر فاز سیال (مایع یا بخار بودن آن) از مواردی است که لازم به بررسی عمیق‌تری دارد. این مهم لزوم جستجو برای یافتن نقطه عملکرد در محدوده‌ی مناسب این چنین سامانه‌ای را طلب کرده که سعی شده در این کار با بررسی پارامترهای مختلف تأثیرگذار مسئله به آن پرداخته شود.

بنابراین مسئله‌ی موردبررسی در اینجا، بررسی تأثیر پاشش آب در حالت بخار در محفظه‌ی احتراق موتور ALF502 به روش سی‌اف‌دی بوده تا بتوان با استفاده از نتایج به دست آمده تحلیلی روی سیکل کارکردی این موتور در کاربرد دریایی انجام داده و تأثیر پاشش آب در محفظه احتراق را روی توان و رانش بررسی نمود.

^۳ Quasi Steady Single Component Droplet Evaporation

^۱ Swirl Number

^۲ Design of experiment (DOE)

و ۰/۷ هستند. حال با محاسبه‌ی متغیرهای گفته‌شده دما، h^A ، Y_i^A و Y_i^A از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$T = f_i \left(\frac{Z}{1-Z_i}, \frac{Z_{var}}{(1-Z_i)^2}, h^A \right) \quad (23)$$

$$h = (1-Z_i)h^A + Z_i h_i \quad (24)$$

$$Y_i^A = f_i \left(\frac{Z}{1-Z_i}, \frac{Z_{var}}{(1-Z_i)^2}, h^A \right) \quad (25)$$

$$Y_i = (1-Z_i)Y_i^A + Z_i \delta_{i,l} \quad (26)$$

که f_i و f_i توابعی محاسبه‌شده هستند که از قبل بر اساس فلیملت پایا برای جریان هم‌راستای یک‌بعدی شعله‌ی دیفیوژن به‌دست آمده‌اند که از تابع β -PDF برای Z و δ -PDF برای h استفاده‌شده است. در اینجا از مکانیسم ۴۸ گونه‌ای توسعه‌یافته توسط جی‌وونگ پارک [۱۸] در محاسبات مربوط به مدل فلیملت استفاده شد.

۳- مدل فیزیکی

برای شبیه‌سازی جریان درون محفظه‌ی احتراق موتور مذکور، مدل سه‌بعدی آن با استفاده از روش ابر نقاط و سپس تبدیل آن به پروتجا CAD، در دسترس قرار گرفت. تصویر کلی این محفظه در شکل (۱) قابل مشاهده است.



شکل (۱): تصویر کامل محفظه احتراق موتور ALF502

برای افزایش سرعت شبیه‌سازی و با توجه به هندسه‌ی محفظه احتراق که متشکل از ۲۸ نازل پاشش مجزا بر روی مسیر دایره شکی است که ماهیت تکرارشونده‌ای دارد، شبیه‌سازی محفظه محدود به یک قسمت از ۲۸ قسمت گفته‌شده، گردید. شما تیک برش ذکرشده در شکل (۲) ارائه‌شده است.

که برای محاسبه‌ی h از مقدار ناسلت زیر استفاده‌شده است:

$$Nu_p = 2 \left(1 + 0.3 Re_p^{0.5} Pr^{1/4} \right) \quad (13)$$

علاوه بر آنچه گفته شد، به علت وجود مخلوط گاز در جریان موردبررسی، معادلات پیوستگی و مومنتوم نیز به معادلات حاکم افزوده می‌شوند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} = S_m^{(t)} \quad (14)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_{u_i}^{(t)} \quad (15)$$

که P فشار بوده و تانسور تنش τ_{ij} به‌صورت زیر است:

$$\tau_{ij} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (16)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (17)$$

که μ ضریب لزجت دینامیکی و μ_t ضریب لزجت آشفتگی هستند. در این کار برای محاسبه‌ی ضریب لزجت آشفتگی از مدل $K-\varepsilon$ استفاده شد. جملات چشمه در معادلات (۱۴) و (۱۵) مربوط به تأثیر فاز قطره بر مخلوط گاز هستند.

از مدل فلیملت غیرآدیاباتیک^۱ برای محاسبه‌ی کسر جرمی (Y_i) و دمای مخلوط (T) استفاده شد. این معادلات با فرض تأثیر فاز آب به‌صورت گاز خنثی به کار گرفته شدند. بدین منظور معادلات انتقالی به‌صورت زیر به معادلات اضافه می‌شوند.

$$\frac{\partial \rho Z_{mean}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j Z_{mean})}{\partial x_j} = \frac{\partial \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_t} \frac{\partial Z_{mean}}{\partial x_j} \right)}{\partial x_j} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \rho Z_{var}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j Z_{var})}{\partial x_j} = \frac{\partial \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial Z_{var}}{\partial x_j} \right)}{\partial x_j} + C_g \mu_t \left(\frac{\partial Z_{mean}}{\partial x_j} \right)^2 + C_d \rho \frac{\varepsilon}{K} Z_{var} \quad (19)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j h)}{\partial x_j} = \frac{\partial \left(\frac{\mu_{eff}}{Pr_t} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right)}{\partial x_j} + S_h + S_h^{(t)} \quad (20)$$

$$\frac{\partial \rho Z_l}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j Z_l)}{\partial x_j} = \frac{\partial \left(\frac{\mu_{eff}}{Sc_t} \frac{\partial Z_l}{\partial x_j} \right)}{\partial x_j} + S_m^{(t)} \quad (21)$$

در این روابط Z_{mean} و Z_{var} به ترتیب کسر مخلوطی میانگین و تغییرات آن هستند که برحسب جرم سوخت در معادله‌ی (۲۲) تعریف می‌شوند. همچنین Z_l کسر مخلوطی فاز خنثی در جریان است. این مقادیر به‌طور کلی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z_i = \frac{m_i}{m_{Fuel} + m_{Oxidizer} + m_{inert}} \quad (22)$$

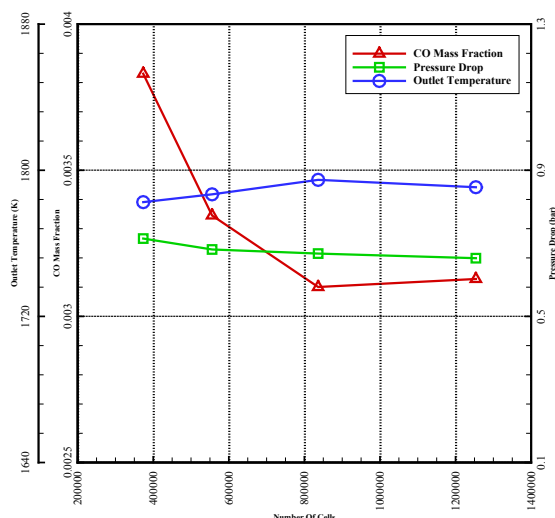
علاوه بر آن، در روابط (۱۸) تا (۲۱)، K و ε به ترتیب انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آن بوده و $S_m^{(t)}$ و $S_h^{(t)}$ جملات چشمه مربوط به فاز خنثی بوده و σ_t ، C_g ، C_d ، Pr_t و Sc_t ثوابت مدل بوده و به ترتیب دارای مقادیر ۰/۸۵، ۰/۸۶، ۲/۱۰، ۰/۹

^۱ Non-Adiabatic Flamelet

المان‌های دامنه انجام گرفت. برای این مهم، تعداد ۴ نوع شبکه‌بندی که در هر مرحله ۵۰ درصد به تعداد المان‌ها افزوده می‌شد، در نظر گرفته شد. نتایج این بخش در شکل (۳) و جدول (۲) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات بین دو شبکه‌بندی «خوب» و «مناسب» مقدار کمی بوده و قابل قبول است. بنابراین در شبیه‌سازی‌های این کار از شبکه‌بندی «مناسب» با تعداد المان‌های حدود ۸۴۰۰۰ برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شد.

جدول (۲): مطالعه‌ی استقلال نتایج از شبکه‌بندی

شبکه‌بندی	خوب	مناسب	ضعیف	خیلی ضعیف
اختلاف فشار ورودی و خروجی (bar)	۰.۶۵۹۳	۰.۶۷۲۰	۰.۶۸۳۲	۰.۷۱۳۰
متوسط جرمی دمای خروجی (K)	۱۷۹۱	۱۷۹۵	۱۷۸۷	۱۷۸۳
متوسط جرمی کسر جرمی CO	۰.۰۰۳۱۲۸	۰.۰۰۳۱۰۰	۰.۰۰۳۳۴۵	۰.۰۰۳۸۳۰

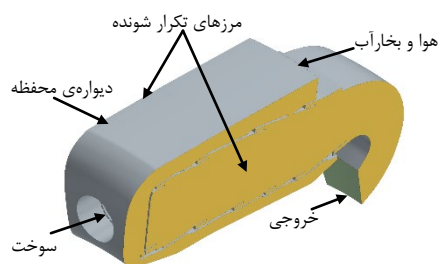


شکل (۳): نمودار مطالعه‌ی استقلال نتایج از شبکه‌بندی

علاوه بر این در بخش شبکه‌بندی مطالعه‌ای نیز بر روی مقدار y^+ صورت گرفت و سعی شد تا این مقدار در بیشتر قسمت‌های دیواره در محدوده‌ی پیشنهادی مدل آشفتگی یعنی ۵۰ تا ۳۰۰ قرار گیرد. شکل (۴) مقدار y^+ بر روی دیواره را نشان می‌دهد.

۴- اعتبار سنجی

به جهت بررسی صحت شبیه‌سازی و مدل‌های انتخابی برای این کار، شبیه‌سازی‌هایی با شرایط مطابق با آزمایش تجربی محفظه احتراق موتور ALF502 موجود در مرجع [۱۹] انجام گردید. نتایج



شکل (۲): شما تیک قسمت موردبررسی

محفظه احتراق در شبیه‌سازی

در شکل (۲) سوخت Jet-A از قسمت مرکزی محفظه احتراق وارد شده و هوا پس از ورود از بالا با عبور از کانال اطراف، به وسیله‌ی سوراخ‌های تعبیه‌شده در قسمت میانی با سوخت ترکیب شده و احتراق انجام می‌شود. سپس گازهای حاصل از احتراق از طریق قسمت انتهایی خارج می‌شوند. دیواره‌های کناری نیز با توجه به ماهیت تکرارشوندگی محفظه دارای شرط مرزی تکرارشونده‌ی چرخشی^۱ هستند. همچنین به منظور پاشش بخار آب نیز کانال‌هایی در قسمت ورودی هوا فرض شده‌اند. شرایط عملکردی موتور در جدول (۱) آمده است.

هدف اصلی از این پژوهش بررسی اثر پاشش بخار آب بر روی دمای خروجی محفظه احتراق با فن دینامیک سیالات محاسباتی بوده است. سپس با استفاده از تحلیل صفر بعدی سیکل به بررسی برآیند دو اثر پاشش بخار آب که افزایش دبی جرمی سیال عامل درازای کاهش دمای خروجی هستند، پرداخته شده و در نهایت میزان تأثیر پاشش بر روی موتور با استفاده از این تحلیل ارائه شده است.

جدول (۱): شرایط عملکردی موتور

فشار هوای ورودی کمپرسور (atm)	دمای هوای ورودی کمپرسور (K)	دبی جرمی هوای ورودی (kg/s)
۱	۳۰۰	۰.۳۲۵

برای شبکه‌بندی دامنه‌ی حل موردبررسی از المان‌های چندوجهی^۲ برای مش بندی استفاده شده است. در این المان‌ها به علت داشتن تعداد سطوح بیشتر، تبادل اطلاعات با المان‌های اطراف بهتر بوده و همگرایی حل به‌خصوص در مسائل دارای انتقال حرارت راحت‌تر است. برای شبکه‌بندی مسئله سعی شده است که اندازه‌ی اضلاع المان‌های از ۲ میلی‌متر تجاوز نکنند. همچنین مطالعه‌ای به منظور بررسی میزان وابستگی حل به تعداد

^۱ Rotational Periodic

^۲ Polyhedral

جدول (۴): نتایج تحلیل سیکل کد نوشته شده و نتایج [۲۰]

	w_c (kJ/kg)	T_r (K)	w_t (kJ/kg)	T_r (K)
مرجع [۲۰]	۲۶۹٫۵	۵۵۶٫۸	۶۶۴٫۷	۷۱۰٫۸
کد نوشته شده	۲۶۸٫۵	۵۴۹٫۸	۶۹۶٫۳	۷۷۲٫۹

جدول (۵): نتایج تحلیل سیکل کد نوشته شده و نتایج [۲۰]

	w_c (kJ/kg)	T_r (K)	w_t (kJ/kg)	T_r (K)
مرجع [۲۰]	۳۳۷	۶۲۴	۵۶۲٫۴	۸۱۲٫۸
کد نوشته شده	۳۳۵٫۷	۶۱۳٫۵	۵۹۱٫۶	۸۶۷٫۱

جدول (۶): نتایج تحلیل سیکل کد نوشته شده و نتایج [۲۰]

	P_t (MPa)	T_t (K)	V_o (%)	T_o (K)
مرجع [۲۰]	۰٫۴۶۶۸	۱۱۰۴٫۶	۸۸۹	۷۱۰٫۸
کد نوشته شده	۰٫۴۸۳۴	۱۱۵۱٫۵	۹۳۰	۷۷۲٫۹

همان طور که مشاهده می شود، تطابق بین کد نوشته شده و نتایج مرجع [۲۰] رضایت بخش است که باید توجه داشت منبع این اختلاف اثر فرض تغییر خواص برحسب دما است که در کد نوشته شده لحاظ شده ولی در مرجع [۲۰] خواص ثابت فرض شده اند.

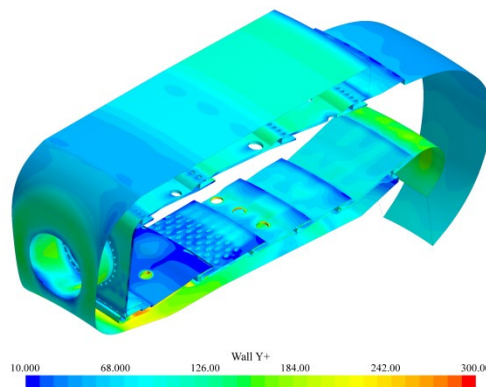
روند کد مطلب نوشته شده به این صورت بوده که پس از دریافت ورودی ها شامل کسر جرمی گازهای خروجی، دمای خروجی، فشار خروجی، بازده کمپرسور و توربین، خواص مخلوط گاز را محاسبه کرده و با تحلیل سیکل بر اساس روابط ترمودینامیکی موجود، میزان توان تولیدی موتور را تخمین می زد. در شکل (۵) به صورت خلاصه روند تحلیل کد مطلب آمده است.

۵- نتایج و بحث

در این مقاله، تأثیر پاشش بخار در محفظه احتراق موتور در سه فشار ۷، ۴ و ۱۳ اتمسفر و همچنین سه نسبت سوخت به هوای ۱٫۶، ۲٫۵ و ۴ درصد بررسی شد. در شبیه سازی ها پاشش بخار از صفر درصد شروع شده و تا نقطه ای که منجر به افت دما و خاموشی موتور شده، ادامه داشت. سپس با استفاده از اطلاعات به دست آمده از شبیه سازی ها و تحلیل صفر بعدی سیکل اثر پاشش بر توان و رانش موتور نیز بررسی شد.

در جدول (۷) نتایج شبیه سازی ها برای سه نسبت سوخت به هوای مختلف در فشار ۱۳ اتمسفر آورده شده است. لازم به ذکر است نتایج توان و رانش برای دبی عبوری از برش محفظه احتراق بوده و جریان کنارگذر موتور در آن لحاظ نشده است.

شبیه سازی و آزمایش مربوطه در جدول (۳) آورده شده است. می توان دید که تطابق رضایت بخشی میان نتایج شبیه سازی و آزمایش های انجام گرفته وجود داشته و کار عددی قابل استناد است.

شکل (۴): مقدار Y^+ بر روی دیواره ی محفظه احتراق

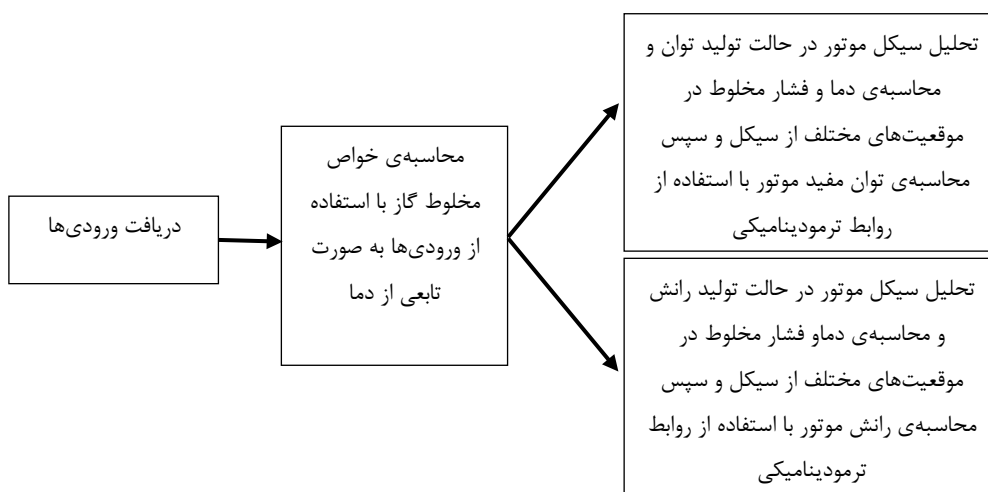
جدول (۳): مقایسه ی دمای خروجی محفظه در شبیه سازی و آزمایش

منبع [۱۹] (دما برحسب K است)

اختلاف (%)	شبیه سازی	آزمایش	شماره ی آزمون
۹٫۱۶	۱۱۶۸	۱۰۷۰	۴ × ۰۰۷۱
۸٫۶۵	۱۲۰۶	۱۱۱۰	۴ × ۰۰۸۱

همچنین به جهت بررسی اثر پاشش بخار در محفظه ی احتراق بر روی رانش و توان موتور، می بایست تحلیلی بر روی سیکل موتور انجام می شد. این تحلیل شامل تحلیل کمپرسور، توربین، نازل و پمپ لازم برای افزایش فشار آب است. همچنین در این تحلیل یک مبدل حرارتی برای خروجی در نظر گرفته شده است تا بتوان میزان بخار قابل تولید از دمای گاز خروجی را نیز محاسبه نمود؛ این مورد از این جهت حائز اهمیت است که در حقیقت در صورت تأمین میزان بخار توسط مبدل، بازده سیکل موتور نیز دچار افزایش می شود. علاوه بر آن، ظرفیت گرمایی سیال با دما و غلظت بخار موجود در سیکل به مقدار قابل توجهی دچار تغییرات می شود، که این اثر نیز در محاسبات و تحلیل سیکل با تعریف خواص سیال خروجی بر اساس چندجمله ای ناسا^۱ برای گازهای غالب در فرآیند شامل آب، اکسیژن، نیتروژن، کربن دی اکسید و کربن مونواکسید، لحاظ گردیده است. بدین منظور یک کد در نرم افزار مطلب نوشته شد. حال برای اطمینان از عملکرد صحیح این کد، مقایسه ای بین نتایج آن و مرجع [۲۰] آورده شده است. این مقایسه شامل محاسبات سیکل برای سه مورد از نتایج این مرجع بوده و در جدول های (۴) تا (۶) آمده است.

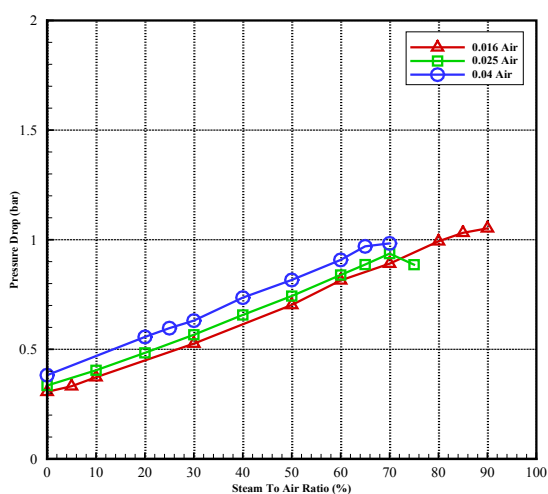
^۱NASA Polynomial



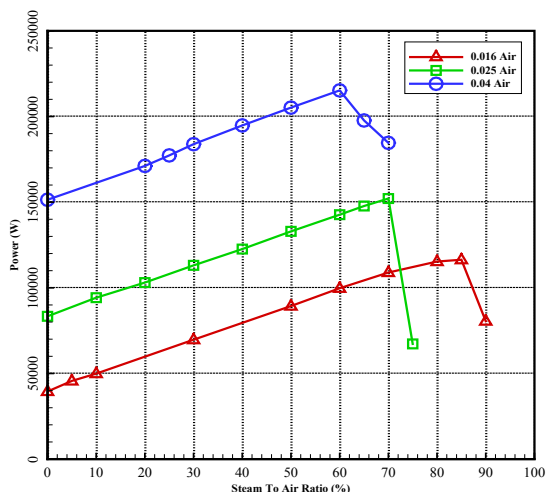
شکل (۵): روند عملکرد کد مطلب نوشته شده

جدول (۷): نتایج شبیه‌سازی برای پاشش بخار در نسبت سوخت به هوای مختلف ($P = 13 \text{ atm}$)

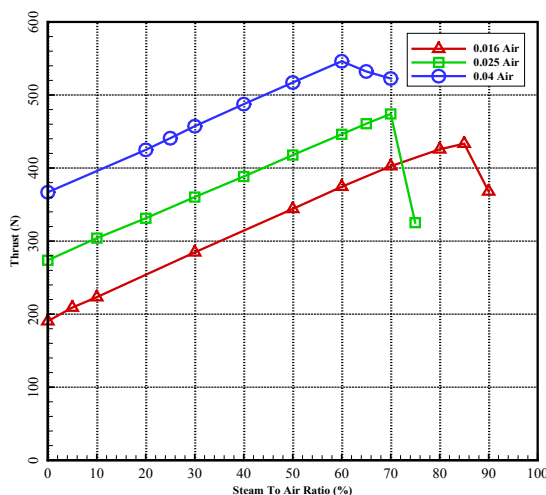
رانش (N)	توان خروجی (W)	افت فشار (bar)	دمای خروجی (K)	نسبت بخار به هوا (%)	نسبت سوخت به هوا (%)
۳۶۶٫۹	۱۵۱۴۱۷٫۲	۰٫۳۸۲۰۹	۱۸۸۹	۰	۴
۴۲۴٫۹	۱۷۱۱۵۸	۰٫۵۵۶۵۲	۱۵۴۴	۲۰	
۴۴۰٫۸	۱۷۷۲۹۲٫۵	۰٫۵۹۶۶۵	۱۴۸۹	۲۵*	
۴۵۷٫۳	۱۸۳۸۵۳٫۵	۰٫۶۳۰۸۵	۱۴۴۱	۳۰	
۴۸۷٫۵	۱۹۴۷۷۲٫۱	۰٫۷۳۵۷۳	۱۳۵۳	۴۰	
۵۱۷٫۱	۲۰۵۱۸۷٫۸	۰٫۸۱۶۳۵	۱۲۷۸	۵۰	
۵۴۶٫۲	۲۱۵۲۵۸	۰٫۹۰۷۸۲	۱۲۱۵	۶۰**	
۵۳۲٫۲	۱۹۷۶۹۶٫۵	۰٫۹۶۹۶۳	۱۱۱۹	۶۵	
۵۲۲٫۵	۱۸۴۶۰۷٫۵	۰٫۹۸۳۲۱	۱۰۴۰	۷۰	
۲۷۳٫۸	۸۳۳۶۴٫۲	۰٫۳۳۴۸۴	۱۴۸۹	۰	۲٫۵
۳۰۴٫۱	۹۴۲۳۷٫۶	۰٫۴۰۴۳۴	۱۳۴۹	۱۰*	
۳۳۱٫۲	۱۰۳۰۵۵٫۵	۰٫۴۸۳۹۷	۱۲۳۵	۲۰	
۳۶۰٫۳	۱۱۳۱۱۲٫۲	۰٫۵۶۶۳۸	۱۱۵۳	۳۰	
۳۸۸٫۴	۱۲۲۶۱۱٫۸	۰٫۶۵۶۷۳	۱۰۸۵	۴۰	
۴۱۷٫۸	۱۳۲۹۵۰٫۶	۰٫۷۴۳۰۳	۱۰۳۳	۵۰	
۴۴۶٫۲	۱۴۲۶۸۹٫۴	۰٫۸۳۹۱۱	۹۸۷	۶۰	
۴۶۰٫۷	۱۴۷۷۵۸٫۵	۰٫۸۸۶۷۶	۹۶۸	۶۵	
۴۷۴٫۱	۱۵۲۱۰۹٫۴	۰٫۹۳۶۶۳	۹۴۷	۷۰**	
۳۲۵٫۳	۶۷۳۴۵	۰٫۸۸۶۱۰	۶۵۹	۷۵	
۱۹۰٫۳	۳۹۲۳۹٫۴	۰٫۳۰۵۹۹	۱۲۱۷	۰	۱٫۶
۲۰۹	۴۵۳۹۱٫۹	۰٫۳۳۱۶۰	۱۱۶۵	۵*	
۲۲۳٫۲	۴۹۶۵۱٫۶	۰٫۳۷۲۷۳	۱۱۱۲	۱۰	
۲۸۴٫۶	۶۹۶۶۲٫۵	۰٫۵۲۶۰۹	۹۶۹	۳۰	
۳۴۴	۸۹۰۹۸٫۸	۰٫۷۰۲۱۹	۸۷۹	۵۰	
۳۷۴٫۴	۹۹۴۹۰٫۷	۰٫۸۱۴۵۴	۸۴۷	۶۰	
۴۰۲٫۵	۱۰۸۶۸۲٫۹	۰٫۸۹۰۷۲	۸۱۶	۷۰	
۴۲۵٫۶	۱۱۵۰۷۸٫۱	۰٫۹۹۲۶۷	۷۸۲	۸۰	
۴۳۳٫۳	۱۱۶۱۳۱٫۷	۱٫۰۳۱۳۸	۷۶۰	۸۵**	
۳۶۸	۸۰۲۹۲٫۱	۱٫۰۵۱۷۷	۶۳۷	۹۰	



شکل (۷): نمودار افت فشار محفظه احتراق بر حسب نسبت مقدار بخار به مقدار هوای ورودی در سه نسبت سوخت به هوا

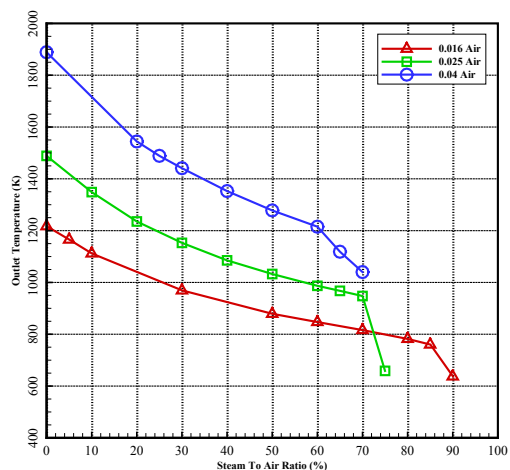


شکل (۸): نمودار توان خروجی بر حسب نسبت مقدار بخار به مقدار هوای ورودی در سه نسبت سوخت به هوا



شکل (۹): نمودار رانش بر حسب نسبت مقدار بخار به مقدار هوای ورودی در سه نسبت سوخت به هوا

در توضیح علامت‌های * و ** در جدول (۷) باید گفت که علامت * نشان‌دهنده‌ی آن است که بخار برای درصد علامتدار و کمتر از آن توسط گازهای خروجی توربین در سیکل قدرت، قابل تولید است. علامت ** نیز مربوط به درصدی است که حداکثر توان و رانش تولیدی را قبل از خاموشی شعله دارد که در این مورد به منبع و انرژی موردنیاز برای تولید بخار ورودی توجه نشده است.

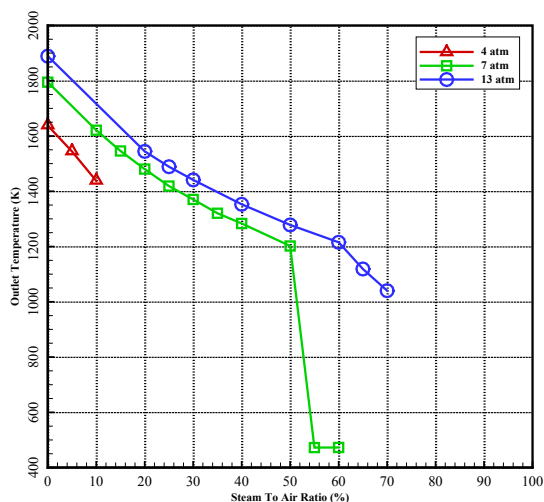


شکل (۶): نمودار دمای خروجی محفظه احتراق بر حسب نسبت مقدار بخار به مقدار هوای ورودی در سه نسبت سوخت به هوا

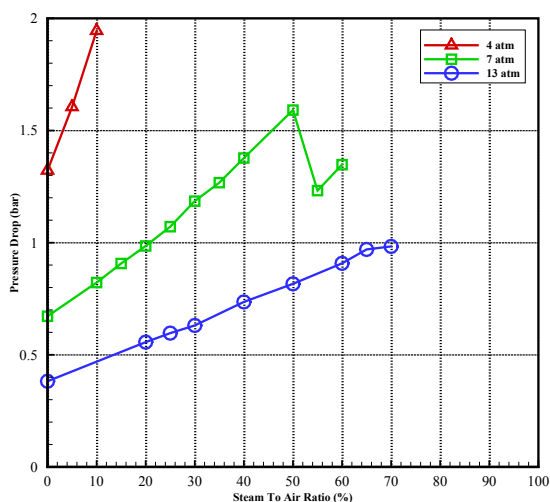
با استناد به آنچه در جدول (۷) آمده است، مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت سوخت به هوا، می‌توان جرم بیشتری از بخار را پیش از تأثیر کاهشی بر روی توان و رانش به محفظه احتراق افزود. همچنین در جدول (۷) دیده می‌شود که با افزایش نسبت سوخت به هوا، مقدار بخار تولیدی توسط گازهای خروجی افزایش می‌یابد که علت آن دمای بیشتر در خروجی محفظه احتراق (شکل (۶)) و به دنبال آن دمای بیشتر پس از منبسط شدن در توربین می‌باشد که قابلیت تولید بخار بیشتری در مبدل را دارد. از دیگر موارد که در شکل (۷) قابل مشاهده است، می‌توان به افزایش افت فشار محفظه احتراق با افزایش مقدار بخار، اشاره نمود. علت این امر افزایش دبی جرمی محفظه در اثر پاشش بوده است. البته باید ذکر کرد که با پاشش بخار دمای خروجی کاهش یافته و به دنبال آن چگالی افزایش می‌یابد اما این افزایش چگالی به تنهایی نمی‌تواند افزایش دبی جرمی را پوشش دهد، در نتیجه سرعت خروجی نیز افزایش می‌یابد که این خود باعث کاهش فشار خروجی و در نتیجه افزایش افت فشار محفظه احتراق می‌شود.

با افزایش نسبت سوخت به هوا نیز مشاهده می‌شود که افت فشار محفظه احتراق افزایش می‌یابد که با توجه به افزایش دما خروجی و به دنبال آن کاهش چگالی گازهای خروجی محفظه احتراق و در نتیجه افزایش سرعت خروجی و در نهایت کاهش فشار خروجی محفظه احتراق، امری طبیعی است.

احتراق با افزایش فشار کاهش داشته (شکل (۱۱)) که علت آن را می‌توان افزایش چگالی گازهای خروجی و در نتیجه کاهش سرعت آن و به تبع افزایش فشار خروجی دانست. علاوه بر این با توجه شکل‌های (۱۲) و (۱۳)، می‌توان دریافت که با کاهش فشار محفظه احتراق، توان و رانش کاهش داشته که امری واضح بود اما آنچه مهم است این است که کاهش فشار زیاد باعث تأثیر منفی پاشش بخار در سیکل شده است؛ چرا که مشاهده می‌شود که در فشار ۴ atm، افزودن بخار باعث کاهش توان و رانش سیکل می‌شود که این امر می‌تواند ناشی از افت فشار زیاد محفظه احتراق باشد.



شکل (۱۰): نمودار دمای خروجی محفظه احتراق بر حسب نسبت مقدار بخار به مقدار هوای ورودی در فشارهای مختلف



شکل (۱۱): نمودار افت فشار محفظه احتراق بر حسب نسبت مقدار بخار به مقدار هوای ورودی در فشارهای مختلف

مورد دیگر، افزایش مقدار بخار قابل پذیرش در سیکل با افزایش فشار محفظه احتراق است. اگرچه مقدار بخاری که توسط گازهای خروجی قابل تولید است، به جز مورد فشار ۴ atm، تغییر چندانی نداشته است.

شکل‌های (۸) و (۹) رفتار توان و رانش را که با استفاده از تحلیل سیکل موتور با خروجی‌های شبیه‌سازی بدست آمده، نشان می‌دهد. مشاهده شده است که توان و رانش موتور با افزایش دبی جرمی بخار پاشش شده افزایش داشته است و این روند تا زمانی ادامه داشته که افت دمای محفظه احتراق به حدی رسیده که عملاً انرژی لازم برای ادامه‌ی احتراق تأمین نشده و در نتیجه احتراق مختل شده و افت دمای خروجی نسبتاً زیادی داشته و به تبع افت توان و رانش ایجاد شده است. در ادامه نتایج شبیه‌سازی محفظه احتراق در حالت پاشش بخار با تغییر فشار درون محفظه در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول (۸): نتایج شبیه‌سازی برای پاشش بخار در فشارهای مختلف (نسبت سوخت به هوا = ۰/۰۴)

رانش (N)	توان خروجی (W)	افت فشار (bar)	دمای خروجی (K)	نسبت بخار به هوا (%)	فشار (atm)
۲۱۶/۹	۵۴۴۰۱/۲	۱/۳۲۲۱۶	۱۶۳۹	۰/۰۴	۴
۲۰۰/۹	۴۴۵۶۴/۶	۱/۶۰۵۲۲	۱۵۴۶	۵	
۱۶۲/۹	۲۸۰۰/۸	۱/۹۴۴۸۲	۱۴۳۹	۱۵	
۳۲۳/۷	۱۱۹۸۲۹/۴	۰/۶۷۱۹۷	۱۷۹۵	۰	۷
۳۴۸/۵	۱۲۶۹۸۴/۱	۰/۸۲۲۰۴	۱۶۲۱	۱۰	
۳۵۹/۵	۱۲۹۴۹۷/۹	۰/۹۰۷۱۰	۱۵۴۶	۱۵	
۳۷۰/۴	۱۳۲۰۵۴/۵	۰/۹۸۵۱۴	۱۴۸۰	۲۰	
۳۸۰/۴	۱۳۳۹۰۸/۹	۱/۰۷۱۱۲	۱۴۱۹	۲۵*	
۳۹۰/۹	۱۳۶۲۶۳/۶	۱/۱۸۵۱۶	۱۳۷۰	۳۰	
۴۰۰/۵	۱۳۷۹۰۹/۷	۱/۲۶۷۳۶	۱۳۲۰	۳۵	
۴۱۱/۲	۱۴۰۴۶۸/۸	۱/۳۷۷۲۰	۱۲۸۳	۴۰	
۴۲۷/۲	۱۴۱۸۰۰/۹	۱/۵۹۰۹۲	۱۲۰۲	۵۰**	
۳۸/۲	۱۰۱۴/۳	۱/۲۳۱۹۹	۴۷۲	۵۵	
۸۰/۱	۴۳۵۵/۱	۱/۳۴۷۵۴	۴۷۳	۶۰	
۳۶۶/۹	۱۵۱۴۱۷/۲	۰/۳۸۲۰۹	۱۸۸۹	۰	۱۳
۴۲۴/۹	۱۷۱۱۵۸	۰/۵۵۶۵۲	۱۵۴۴	۲۰	
۴۴۰/۸	۱۷۷۲۹۲/۵	۰/۵۹۶۶۵	۱۴۸۹	۲۵*	
۴۵۷/۳	۱۸۳۸۵۳/۵	۰/۶۳۰۸۵	۱۴۴۱	۳۰	
۴۸۷/۵	۱۹۴۷۷۲/۱	۰/۷۳۵۷۳	۱۳۵۳	۴۰	
۵۱۷/۱	۲۰۵۱۸۷/۸	۰/۸۱۶۳۵	۱۲۷۸	۵۰	
۵۴۶/۲	۲۱۵۲۵۸	۰/۹۰۷۸۲	۱۲۱۵	۶۰**	
۵۳۲/۲	۱۹۷۶۹۶/۵	۰/۹۶۹۶۳	۱۱۱۹	۶۵	
۵۲۲/۵	۱۸۴۶۰۷/۵	۰/۹۸۳۲۱	۱۰۴۰	۷۰	

با توجه به آنچه در جدول (۸) آمده است، مشاهده می‌شود که با افزایش فشار درون محفظه احتراق، دما خروجی محفظه احتراق افزایش یافته است (شکل (۱۰)). همچنین افت فشار محفظه

مورد نیاز برای تولید بخار، می‌تواند تا حداکثر ۳ برابر توان (در نسبت سوخت به هوای ۱/۶ درصد) را ارائه دهد. همچنین مقدار رانش موتور نیز می‌تواند تا حداکثر ۲/۳ برابر (در نسبت سوخت به هوای ۱/۶ درصد) افزایش داشته باشد.

۴- پاشش بخار نیز دمای نهایی سیکل را کاهش داده و از این جهت می‌تواند در کاهش آلاینده‌گی و افزایش عمر موتور نقش داشته باشد.

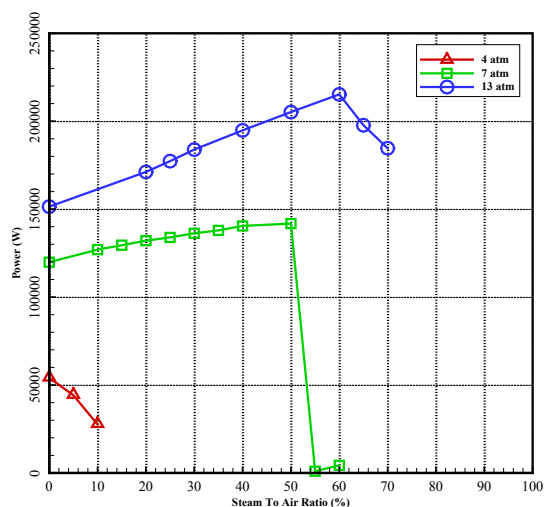
۵- در پاشش بخار، با افزایش نسبت سوخت به هوا، مقدار بخار تولیدی توسط خروجی افزایش می‌یابد. بنابراین در نسبت‌های بالاتر سوخت به هوا می‌توان افزایش توان بیشتری را بدون نیاز به انرژی اضافی برای تولید بخار بیشتر داشت. اما حد نهایی مقدار بخار قابل پاشش (بدون در نظر گرفتن منبع تامین انرژی مورد نیاز تولید بخار) با افزایش نسبت سوخت به هوا کاهش می‌یابد.

۶- در پاشش بخار، افزایش فشار درون محفظه احتراق، حد نهایی بخار قابل پذیرش را افزایش می‌دهد اما مقدار بخار قابل تولید توسط خروجی تغییر زیادی ندارد.

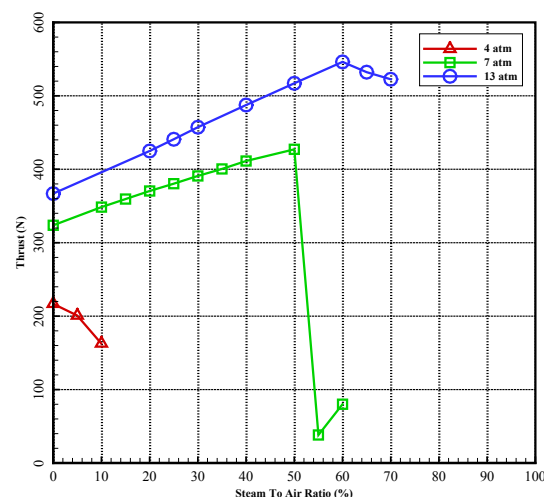
۷- در پاشش بخار، افزایش مقدار دبی جرمی بخار، باعث افزایش افت فشار محفظه احتراق می‌شود. در فشارهای کم محفظه احتراق، این افت فشار می‌تواند باعث اثر کاهشی پاشش بخار بر روی توان و رانش شود.

۷- فهرست علائم و اختصارات

m_p	جرم ذره، kg
V_p	سرعت ذره، m/s
F_p	نیروی ناشی از گرادیان فشار، N
F_d	نیروی پسا، N
C_d	ضریب پسا
A_p	مساحت سطح ذره، m^2
V_s	سرعت لغزش ذره، m/s
P_{static}	فشار استاتیکی، N/m^2
V	سرعت جریان، m/s
Re_p	عدد رینولدز ذره
D_p	قطر ذره، m
$\dot{m}_p$	نرخ انتقال جرم ذره، kg/s
g^*	میزان هدایت انتقال جرم، $kg/m^2.s$
A_s	مساحت سطح ذره، m^2
B	عدد انتقال اسپالدینگ
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه فشار ثابت، $J/kg.K$
T	دمای جریان، K
T_p	دمای ذره، K
L	گرمای نهان تبخیر، J/kg



شکل (۱۲): نمودار توان خروجی بر حسب نسبت مقدار بخار به مقدار هوای ورودی در فشارهای مختلف



شکل (۱۳): نمودار رانش بر حسب نسبت مقدار بخار به مقدار هوای ورودی در فشارهای مختلف

۶- نتیجه‌گیری

در مجموع نتایج حاصل از این کار را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- ۱- پاشش بخار می‌تواند روشی برای افزایش توان و رانش موتور باشد.
- ۲- با افزایش فشار محفظه احتراق، به طور کلی افت فشار آن کاهش یافته و دمای خروجی افزایش داشته است.
- ۳- پاشش بخار به محفظه احتراق به جز در شرایط فشار کم (در اینجا ۴ atm)، می‌تواند تأثیر چشمگیری در افزایش رانش و توان داشته باشد. این تأثیر بدون افزایش سوخت اضافی و با استفاده از گازهای خروجی برای تولید بخار، می‌تواند توان موتور را تا ۱۷ درصد افزایش دهد و در این صورت بازده سیکل نیز افزایش می‌یابد. این مقدار بدون توجه به سوخت اضافی

- <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19740075147>
- [5] B. T. Lundin, "Experimental investigation of thrust augmentation by water-alcohol injection," 1948. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19740075147>
- [6] W. C. Baron, Burnett; Dowman, Harry W.; Dackis, "Experimental investigation of thrust augmentation of axial-flow-type 4000-pound-thrust turbojet engine by water and alcohol injection at compressor inlet," 1948. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19930085789>
- [7] J. H. Useller, James W.; Povolny, "Experimental investigation of turbojet-engine thrust augmentation by combined compressor coolant injection and tail-pipe burning," 1951. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19930086891>
- [8] W. E. Boman, David S.; Mallett, "Investigation of thrust augmentation using water-alcohol injection on a 5200-pound-thrust axial-flow-type turbojet engine at static sea-level conditions," 1952. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19930090414>
- [9] L. Fan, S. L. Yang, and K. P. Kundu, "Evaluation of water injection effect on NOx formation for a staged gas turbine combustor," in *34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 1996. doi: 10.2514/6.1996-706.
- [10] M. Cârdu and M. Baica, "Gas turbine installation with total water injection in the combustion chamber," *Energy Convers. Manag.*, vol. 43, no. 17, pp. 2395–2404, Nov. 2002, doi: 10.1016/S0196-8904(01)00175-3.
- [11] D. L. Daggett, S. Ortanderl, D. Eames, C. Snyder, and J. Berton, "Water injection: Disruptive technology to reduce airplane emissions and maintenance costs," in *SAE Technical Papers*, 2004, vol. 113, pp. 1547–1556. doi: 10.4271/2004-01-3108.
- [12] D. L. Daggett, "Water misting and injection of commercial aircraft engines to reduce airport NOx," *Natl. Aeronaut. Sp. Adm. Glenn ...*, no. x, 2004, Accessed: Jan. 28, 2020. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20040035576>
- [13] D. Daggett, "Water Injection Feasibility for Boeing 747 Aircraft," *Nasa Cr-2005-213656*, no. December, Dec. 2005, Accessed: Jan. 28, 2020. [Online]. Available: <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2005/CR-2005-213656.pdf>
- [14] A. Brankovic, R. C. Ryder, R. C. Hendricks, N. S. Liu, D. T. Shouse, and W. M. Roquemore, "Emissions prediction and measurement for liquid fueled TVC combustor with and without water injection," in *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit - Meeting Papers*, 2005, pp. 6117–6128. doi: 10.2514/6.2005-215.
- [15] A. Farokhipour, E. Hamidpour, and E. Amani, "A numerical study of NOx reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers," *Fuel*, vol. 212, pp. 173–186, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2017.10.033.
- [16] E. Amani, M. R. Akbari, and S. Shahpouri, "Multi-objective CFD optimizations of water spray injection
- C_p ظرفیت گرمایی ویژه فشار ثابت، J/kg.K
- k ضریب هدایت حرارتی، W/m.K
- Nu_p عدد ناسلت ذره
- t زمان، s
- Q_t نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی از فاز پیوسته به ذره، W
- h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، $\text{W/m}^2.\text{K}$
- Pr عدد پراتل
- u_i مؤلفه سرعت در راستای i ، m/s
- x_i مؤلفه مکان در راستای i ، m
- S ترم چشمه معادله
- P فشار میانگین‌گیری شده، N/m^2
- τ_{ij} مؤلفه تنش عمود بر i در راستای j ، N/m^2
- Z کسر مخلوطی
- K انرژی جنبشی آشفتنگی، J/kg
- Sc عدد اشمیت
- Y کسر جرمی
- علائم یونانی**
- ρ جرم مخصوص، kg/m^3
- μ ضریب لزجت دینامیکی، N.s/m^2
- μ_t ضریب لزجت دینامیکی آشفتنگی، N.s/m^2
- ε نرخ اتلاف آشفتنگی، J/kg.s
- زیروندها**
- eff مؤثر
- $mean$ میانگین‌گیری شده
- var تغییرات پارامتر
- ۸- مراجع**
- [1] "Turbojet Enhancements | Glenn Research Center | NASA." <https://www1.grc.nasa.gov/historic-facilities/special-projects-laboratory/turbojet-enhancements/> (accessed Jan. 26, 2020).
- [2] H. W. Jones, William L.; Dowman, "Investigation of thrust augmentation of a 1600-pound thrust centrifugal-flow-type turbojet engine by injection of refrigerants at compressor inlets," 1947. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19930085811>
- [3] H. W. Jones, William L.; Engelman, "Experimental investigation of thrust augmentation of 4000-pound-thrust centrifugal-flow-type turbojet engine by injection of water and alcohol at compressor inlets," 1948. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19930085748>
- [4] E. C. Wilcox, "Analysis of water-injection methods of thrust augmentation," 1948. [Online]. Available:

- [19] H. F. Trembley, "Determination of Effects on Ambient Conditions on Aircraft Engine Emissions. ALF 502 Combustor Rig and Engine Verification Test. | National Technical Reports Library - NTIS," 1977. Accessed: Apr. 18, 2022. [Online]. Available: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/94002MVY.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1976+Thru+1980&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>
- [20] C. Borgnakke, R. E. Sonntag, and G. J. Wylen, *Fundamentals of Thermodynamics-6e*. Wiley, 2002.
- in gas-turbine combustors," *Fuel*, vol. 227, pp. 267–278, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.04.093.
- [17] D. A. Block Novelo, U. Igie, V. Prakash, and A. Szymański, "Experimental investigation of gas turbine compressor water injection for NOx emission reductions," *Energy*, vol. 176, pp. 235–248, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.187.
- [18] H. Wang *et al.*, "A physics-based approach to modeling real-fuel combustion chemistry - I. Evidence from experiments, and thermodynamic, chemical kinetic and statistical considerations," *Combust. Flame*, vol. 193, pp. 502–519, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.COMBUSTFLAME.2018.03.019.