

استفاده از محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده به عنوان یک فناوری نو در توربین های گازی

در این مقاله سیر تکامل استفاده از محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده TVC به عنوان یک فناوری جدید در توربین های گازی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می دهد، انواع مختلف محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده (محصولات مراکز AFRL و GE) دارای قابلیت عالی LBO و عملکرد مؤثر در محدوده وسیع دینامیکی هستند. ضمناً، در بعضی از انواع TVC، میزان آلاینده NO_x به ۴۰ تا ۶۰ درصد استانداردهای موجود کاهش می یابد و میزان راندمان احتراق به ۹۹ درصد رسیده است. همچنین، فناوری محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده، شش مرحله از سطوح آمادگی فناوری (مراحل دانش علمی و توسعه محصول) را گذرانده است، ولی هیچ نمونه موتور توربین گازی تجاری که در آن از فناوری TVC استفاده شده باشد، گزارش نشده است.

واژه های کلیدی: محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده، راندمان احتراق، سطوح آمادگی فناوری

مصطفی اسماعیلی^{۱*}، استادیار، گروه

مهندسی مکانیک، دانشکده فنی-مهندسی

دانشگاه خوارزمی

*نویسنده مخاطب، آدرس تهران، کد پستی:

۱۵۷۱۹۱۴۹۱۱

m.esmaeili@khu.ac.ir

Trapped-Vortex-Combustor: A Novel Technology in the Gas Turbines

In the present study, the evolution of using TVC as a novel technology in gas turbine combustors is investigated. The reported data suggest that different types of TVCs (AFRL and GE products) have the potential to provide low lean-blow out (LBO) and a wide range of dynamic operations. Also, in some types of TVCs, the NO_x emission is in the range of 40% to 60% of ICAO standard and combustion efficiency is maintained at 99%. Moreover, TVC technology has passed the technology readiness level 6 but to the date, its use has not been reported in any kind of commercial gas turbine engines.

Keywords: Trapped vortex combustor, Combustion efficiency, Technology readiness level

M. Esmaili^{1*}, Assistant Professor,
Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering, Kharazmi
University

*Corresponding Author, Postal
Code: 1571914911, Tehran, IRAN

m.esmaeili@khu.ac.ir

مقدمه

اکسیدهای نیتروژن به‌عنوان تابعی از نسبت هم‌ارزی نشان داده است [۴]. شرایط پروازی نیز در اطلاعات شکل مشخص است. اکسیدهای نیتروژن در ناحیه نزدیک به شرایط استوکیومتری ($\phi \approx 1$) و در دمای بالا (حالت take-off) تولید می‌شوند. ولی مونوکسیدکربن در دماهای پایین و یا حالت احتراق ناکامل ($\phi \gg 1$ or $\phi \ll 1$) ایجاد می‌شود. بنابراین، یک ناحیه بهینه وجود دارد که به‌عنوان ناحیه با آلاینده‌گی پایین شناخته می‌شود. با این حال، وجود قیود متعدد طراحی باعث می‌شود که کار کردن در این ناحیه با آلاینده‌گی پایین برای محفظه احتراق‌های رایج بسیار مشکل شود. به‌عنوان مثال، وجود جداکننده ثابت هوا بین نواحی اولیه و ثانویه در محفظه‌های فعلی، در کنار تخیخ سوخت مایع، یک میدان دمایی غیریکنواخت را در ناحیه اولیه به‌وجود می‌آورد که به‌صورت کامل قابل کنترل نیست.

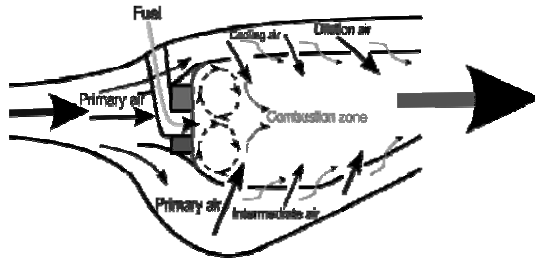
فناوری‌های متعدد جایگزینی برای افزایش محدوده کاری محفظه در سال‌های متمادی توسعه یافته است. محفظه‌های احتراق مرحله‌ای یا دارای هندسه متغیر شاید راه حل مشکل باشد، ولی پیچیدگی‌های زیادی را در بحث جمع‌مکانیکی دارد. احتراق پیش‌آمیخته رقیق، یک فناوری نویددهنده برای کاهش آلاینده‌های نیتروژن (NO_x) است. در این حالت سوخت و هوا قبل از ورود به محفظه مخلوط می‌شوند و نسبت هم‌ارزی کاملاً قابل کنترل است. در این شرایط، چون هوای بیشتری تزریق می‌شود، دمای آدیاباتیک شعله به‌صورت چشمگیری کاهش می‌یابد که این مسئله از تولید NO_x حرارتی جلوگیری می‌کند. متأسفانه تولید احتراق پیش‌آمیخته رقیق در محفظه احتراق چالش‌های تکنولوژیکی را دربردارد. زیرا، در این شرایط نسبت هم‌ارزی کاهش می‌یابد و تغییرات دما و سرعت شعله مرتبط با آن بزرگ‌تر است. این امر باعث می‌شود که شعله به اغتشاشات خارجی بسیار حساس‌تر باشد. در شرایط احتراق غیردائم، پدیده‌هایی چون خاموشی موضعی شعله، پرش شعله، پس‌زنی شعله^۵ یا حتی نوسانات ترموآکوستیکی به‌وجود می‌آید. احتراق غیردائم مشکل‌زاست و می‌تواند پایداری شعله را شدیداً تحت تأثیر قرار دهد. این مسئله، باعث کاهش راندمان احتراق و در نتیجه آن وارد شدن تنش‌های شدید به مواد و حتی منجر به تعویض پیش از موعد قطعات می‌شود [۵-۷].

موتورهای هوایی که در حال حاضر در صنایع هوابیمایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند. سوالی که در اینجا به ذهن می‌رسد، این است که اثر صنعت هوابیمایی بر تولید آلودگی و تغییرات آب و هوایی در آینده چیست؟ از یک طرف از زمان اختراع هواپیما توسط برادران رایت، پیشرفت‌های مهمی در فناوری هواپیماسازی صورت گرفته است. به‌طوری‌که از سال ۱۹۶۰ تا ۱۹۹۸ این پیشرفت‌ها منجر به کاهش ۶۰ درصدی انرژی مصرفی شده است [۱]. از طرفی دیگر، با افزایش مسافرت‌های هوایی، میزان مصرف انرژی صنایع هوایی دائماً در حال افزایش است و ممکن است در سال ۲۰۵۰ سه برابر شود و به حدود 750 Mtoe ^۶ برسد. این دو عامل متضاد (افزایش مصرف انرژی ناشی از افزایش استفاده از صنعت هوابیمایی و کاهش انرژی ناشی از پیشرفت فناوری) نشان‌دهنده شکاف بین بهبود راندمان هواپیما و نرخ رشد فعالیت‌های صنعت هوابیمایی است. در نتیجه، هیچ شکی بر اثر فعالیت‌های صنایع هوابیمایی بر روی تغییرات آب و هوایی نیست. بین آلاینده‌های فسیلی مختلف، دی‌اکسیدهای کربن (CO_2)، مونوکسید کربن (CO) و اکسیدهای نیتروژن (NO_x) بخش عمده آلودگی‌های هواپیماها را تشکیل می‌دهند.

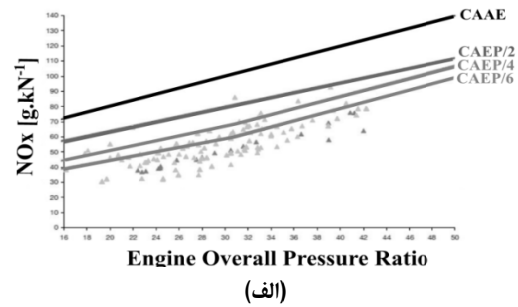
همان‌طور که سواپ^۳ [۲] تأکید کرده است، تصویب قوانین برای کاهش صدور آلاینده‌های موتورهای هوایی الزامی است. به‌عنوان نمونه، در شکل ۱-الف، استانداردهای متفاوت مرتبط با آلاینده‌های نیتروژن به‌عنوان تابعی از نسبت فشار کلی موتور نشان داده شده است [۳]. این شکل نشان می‌دهد، با وجود این‌که بخش عمده کارایی موتورها بالای استاندارد CAEP/6 است، باز هم آلاینده‌گی بعضی از موتورها، بالاتر از میزان استاندارد است. در اروپا، ACARE^۴، اهداف میان‌مدت و بلندمدت تحقیق و توسعه را در صنعت هوابیمایی تعیین می‌کند. این مرکز توصیه کرده که میزان آلاینده‌گی دی‌اکسیدکربن تا ۵۰ درصد و آلاینده‌های نیتروژن تا ۸۰ درصد از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۲۰ کاهش یابد. چون دی‌اکسیدکربن یک محصول جانبی احتراق است، تنها راه حل کاهش این آلاینده، کاهش مصرف سوخت است. کاهش سایر آلاینده‌ها راه حل و همچنین موضوعات گوناگون دیگری را دربردارند. در شکل ۱-ب، تغییرات آلاینده‌های مونوکسیدکربن، هیدروکربن سوخته و

5. Local Flame Extinction
6. Flame Blow-off
7. Flash Back

1. Energy Footprint
2. Million Tons of Oil Equivalent
3. Sawyer
4. Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe



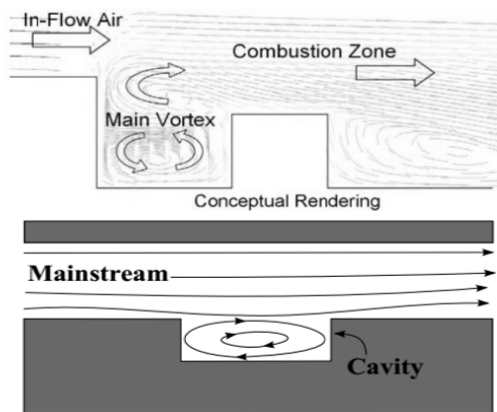
شکل ۲- محفظه احتراق‌های رایج



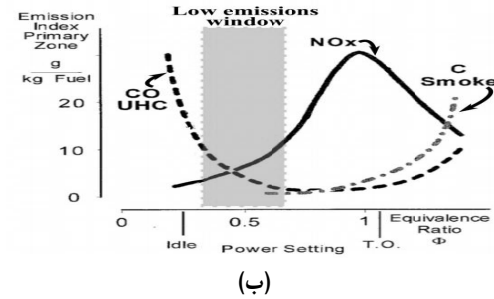
(الف)

معرفی محفظه احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده

توسعه محفظه احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده از دهه پایانی قرن بیستم در آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی هوایی آمریکا^{۱۲}، با مطالعه آزمایشگاهی سو^{۱۳} و همکاران [۸، ۹] و مطالعه عددی کاتا^{۱۴} و روکومر^{۱۵} [۱۰، ۱۱] آغاز شد. در شکل ۳، توپولوژی جریان کلی گردابه به‌دام‌افتاده در این نوع محفظه احتراق نشان داده شده است. ایده اصلی اضافه کردن حفره^{۱۶} به محفظه احتراق، برگرفته از تحقیقات انجام شده بر جریان انبساط ناگهانی در علم آیرودینامیک است. مطالعات بسیاری بر انجام دادن کنترل فعال به‌منظور کاهش ضریب درگ در سیستم‌های دارای حفره تمرکز کرده‌اند [۱۲]. همچنین، مطالعات بسیاری به مکانیزم ناپایداری مرتبط به حضور لایه برشی سطحی^{۱۷} تشکیل شده در جریان جدا شده بین حفره و جریان اصلی پرداخته‌اند. غریب و همکاران [۱۳] دریافتند در زمانی که یک گردابه پایدار در حفره ایجاد شود، نیروی درگ به‌صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این اثر با مشاهدات سایر محققان [۱۴، ۱۵] تأیید شد. سو و همکاران [۸، ۹]، از این مفهوم پایداری جریان استفاده نمودند و محفظه با گردابه به‌دام‌افتاده را معرفی کردند.



شکل ۳- شماتیک توپولوژی جریان کلی گردابه به‌دام‌افتاده [۱۶]



(ب)

شکل ۱- الف) نسبت میزان آلاینده اکسیدهای نیتروژن در نسبت فشارهای مختلف موتور توربین گازی. خطوط با عناوین مختلف نشان‌دهنده استانداردهای گوناگون صنعت هواپیمایی [۳]، ب) میزان صدور آلاینده‌ها در توربین‌های گازی رایج [۴]

شایان ذکر است، فناوری‌های لازم برای آلاینده‌گی استاندارد در محفظه احتراق‌های رایج، که به‌صورت شماتیکی در شکل ۲ نشان داده شده است، بسیار پیچیده است و زمان زیاد برای طراحی و توسعه این سیستم‌ها نیاز است. از آنجاکه تزریق سوخت مایع و اختلاط منتج شده از آن با هوا، به‌صورت مستقیم در ناحیه اولیه ممکن است، نواحی مختلف احتراق (غنی و رقیق) و انواع مختلف شعله (پیش‌آمیخته^۸ و پخشی^۹) در این محفظه‌ها وجود دارد. در نتیجه، نسبت هم‌ارزی در این ناحیه قابل کنترل نیست، بنابراین امکان کنترل تولید آلاینده‌ها وجود ندارد. به‌علاوه، از آنجا که جریان چرخشی استفاده می‌شود، محدوده شرایط کاری قویاً به دبی ورودی وابسته است. از این‌رو، بسیاری از ناپایداری‌ها می‌توانند در فرآیند احتراق تأثیرگذار باشد و محدوده کارکرد پایدار را کاهش دهد.

یک راه حل ممکن برای جلوگیری از این پدیده‌ها و مشکلات نامطلوب، استفاده از یک شعله نگه‌دار^{۱۰} در کنار محفظه اصلی احتراق به‌منظور بهبود پایداری شعله است. کارایی این مفهوم، در سال‌های متعددی در محفظه احتراق اسکرم جت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله، سیر پیشرفت فناوری استفاده از این مفهوم در کاربردهای مادون صوت، که به‌عنوان محفظه با گردابه به‌دام‌افتاده^{۱۱} شناخته می‌شود، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

12. U.S. Air Force Research Laboratory
13. Hsu
14. Katta
15. Roquemore
16. Cavity
17. Interfacial Shear Layer

8. Premixed Flame
9. Diffusion Flame
10. Flame Holder
11. Trapped Vortex Combustor

۳- میزان صدور آلاینده اکسیدهای نیتروژن، بدون وجود رقیق‌سازی یا مراحل احتراق ثانویه بسیار بسیار پایین است.

۴- محفظه احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده در صورت تزریق سوخت به داخل حفره و جریان اصلی توانایی به‌کارگیری به‌عنوان محفظه احتراق مرحله‌ای را دارد. این فناوری در صورت تزریق تنهای سوخت به داخل حفره، قابلیت به‌کارگیری به‌عنوان مفهوم احتراقی سوختن غنی/خاموشی سریع/سوختن رقیق^{۱۹} (RQL) را نیز داراست. بنابراین، با وجود حفظ قابلیت پایدارسازی شعله (نگهداری شعله)، محدوده وسیعی از شرایط کاری قابل دستیابی است. لازم به‌ذکر است که دما و زمان اقامت^{۲۰} نقش مهمی را در تولید اکسیدهای نیتروژن حرارتی^{۲۱} دارند [۱۸]. بنابراین، در نتیجه دست‌یابی به یک رژیم احتراقی رقیق، دمای آدیباتیک شعله لزوماً کاهش می‌یابد. به‌علاوه بهینه‌سازی فرایند اختلاط، زمان اقامت را در محفظه احتراق کاهش می‌دهد. معماری یک محفظه TVC شبیه یک محفظه RQL است و هر سه ویژگی سوختن غنی، اختلاط سریع و سوختن رقیق را دارد. منظور از این ویژگی‌ها عبارتند از:

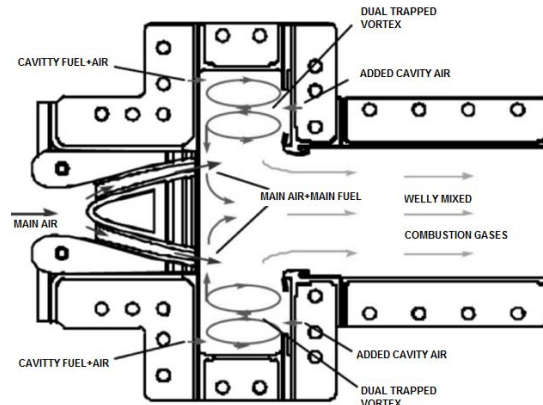
سوختن غنی: سوخت و هوا ابتدا به‌منظور ایجاد یک ناحیه غنی به داخل محفظه وارد می‌شوند. بنابراین احتراق ناکامل بوده و دما پایین‌تر از شرایط استوکیومتریک است. در TVC، این مرحله در حفره اتفاق می‌افتد (معمولاً در حفره نسبت هم‌ارزی بالاتر از یک است).

اختلاط سریع: مقدار زیادی از هوا به‌منظور خاموش کردن^{۲۲} مخلوط غنی اضافه می‌شود. اختلاط سریع، اهمیت زیادی در جلوگیری از تشکیل نواحی^{۲۳} دما بالا و رقیق شدن مخلوط دارد. تبادل بین جریان اصلی و حفره، فرایند اختلاط را در یک TVC ارائه می‌کند. تصویر شماتیک از مسیر معمولی کاهش اکسیدهای نیتروژن و مسیر RQL برای کاهش اکسیدهای نیتروژن در شکل ۵ نشان داده شده است.

سوختن رقیق: احتراق مخلوط رقیق از سوخت می‌تواند منجر به تولید اکسیدهای نیتروژن پایین شود. شرایط رقیق در جریان اصلی TVC، امکان کاهش دمای کلی و بنابراین جلوگیری از تولید اکسیدهای نیتروژن حرارتی را فراهم می‌کند.

بعد از بررسی امتیازات و فیزیک محفظه احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده، در ادامه توسعه فناوری انواع محفظه‌های احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مفهوم TVC، از یک جریان چرخشی غنی (از سوخت) که در یک حفره به‌دام‌افتاده است، استفاده می‌کند. در این حالت یک شعله پایلوت^{۱۸} به‌وجود می‌آید و به‌صورت پیوسته مخلوط رقیق عبوری از بالای حفره را مشتعل می‌کند. ناحیه چرخشی محصولات داغ احتراقی درون حفره و اختلاط سریع آنها با مخلوط رقیق اصلی یک منبع اشتعال پیوسته را فراهم می‌آورد و شعله را پایدار می‌سازد. به‌منظور دست‌یابی به یک اختلاط بهبودیافته بین محصولات حفره و جریان اصلی، نگه‌دارنده‌های شعله اضافی نیز به کانال اصلی اضافه می‌گردد. شکل شماتیکی از یک نوع محفظه احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده، در شکل ۴ نشان داده شده است. ناحیه چرخشی با دو حفره که در اطراف جریان اصلی قرار داده شده‌اند، ایجاد می‌شود (جریان اصلی از سمت چپ به راست می‌رود).



شکل ۴- شماتیک از محفظه احتراق‌های با گردابه به‌دام‌افتاده [۱۷]

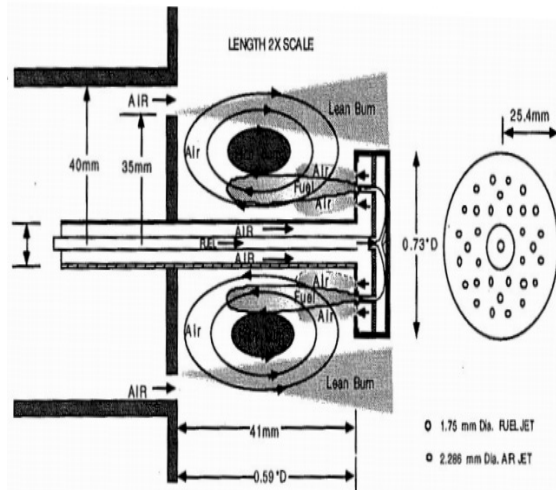
در حفره دو سیستم تزریق، هوای اولیه و سوخت را فراهم می‌کنند تا یک ناحیه چرخشی پایدار را به‌وجود آورد و محصولات احتراق، رادیکال‌ها و گرمای مورد نیاز برای فرآیند پایدارسازی را تولید کنند. این فناوری امتیازات جذابی را برای موتورهای هوایی به‌وجود می‌آورد که عبارتند از:

۱- از آنجاکه احتراق در درون حفره اتفاق می‌افتد به‌دلیل محدودیت طبیعی این ناحیه، شعله پایلوت از تغییرات جریان اصلی تأثیر کمتری می‌پذیرد.

۲- همه توربولانس (اغتشاشات) اتفاق افتاده در محفظه احتراق در درون حفره به دام می‌افتد که منجر به اختلاط بهتر سوخت و اکسید (واکنش‌دهنده‌ها) می‌شود.

19. Rich-Burn/Quick-Quench/Lean-Burn (RQL)
20. Residence Time
21. Thermal NOx
22. Quench
23. Pocket

18. Flame Pilot

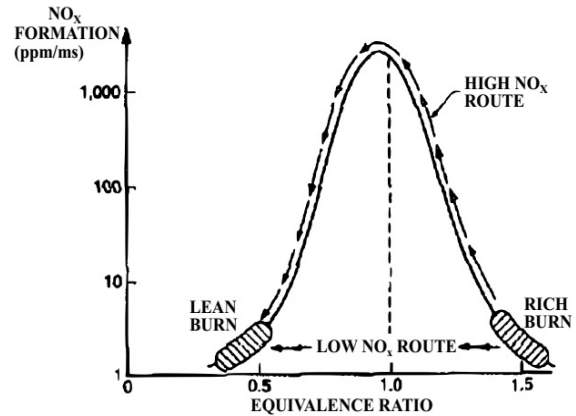


شکل ۶- نسل اول محفظه‌های احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده توسعه داده شده در AFRL (نسل اول)

بعد از تعیین اندازه مناسب حفره در نسل اول TVC، در مطالعات مراجع [۱۵، ۱۹]، قوانین اندازه‌گذاری حفره برای کاهش نیروی درگ اجسام توپی شکل^{۲۵} در جریان‌های غیر واکنشی مورد بررسی قرار گرفت. آنها نشان دادند که برای نسبت قطر دیسک ثانویه به اولیه کمتر از یک، یک ناحیه جدا شده بهینه با نیروی درگ کمینه به‌وجود می‌آید. علاوه بر آن، این مقدار کمینه درگ، به‌صورت قابل ملاحظه‌ای کمتر از حالتی است که فقط دیسک اول وجود داشته باشد. همچنین، آنها دریافتند که درگ کمینه منطبق به شرایطی است که در آن، ناحیه جدا شده پایدار باشد. کاتا و روکومور [۱۱] با استفاده از یک مدل عددی وابسته به زمان تقارن محوری، نتایج غیر واکنشی مرجع [۱۹] و نتایج احتراقی سو و همکاران [۹] را به‌صورت عددی پیش‌بینی کردند. میر^{۲۶} و همکاران [۱۹] رابطه‌ای بین طول ناحیه جدا شده و قطر دیسک ثانویه (شرایط لازم برای درگ کمینه) را استخراج کردند. شکل میانگین آن به‌صورت رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$\frac{L}{D_0} = -(1.62)D_i / D_0 + 1.79 \quad (1)$$

با کمک رابطه ۱، L/D_0 برای نسل اول TVC، برابر با 0.6 به‌دست می‌آید. ضمناً نتایج آزمایشگاهی برای جریان احتراقی، $L/D_0 = 0.59$ را نشان می‌دهند. بنابراین، ابعاد حفره برای حالت درگ کمینه جریان غیر واکنشی، برای جریان واکنشی نیز حالت بهینه را می‌دهد. لازم به‌ذکر است که TVC های نسل اول دارای محدوده کنده شدن شعله^{۲۷} (LBO) بسیار پایین‌تری نسبت به محفظه احتراق‌های رایج است. از این‌رو، TVC‌های



شکل ۵- محفظه احتراق‌های رایج [۱۸]

سیر تحول توسعه فناوری محفظه‌های احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده

نسل اول محفظه‌های احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده AFRL

این نسل از TVC در آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی هوایی آمریکا (AFRL) به‌وجود آمده است. در تلاش‌های اولیه در ارزیابی مفهوم TVC، یک هندسه با تقارن محوری مورد استفاده قرار گرفت. در این هندسه تنها از یک حفره بیرونی استفاده شده و در آن دیفیوزر به‌کار گرفته نشده بود. در این هندسه، به‌علت بزرگی حفره، احتراق پایدار قابل دستیابی نبود. بدیهی است با استفاده از یک هندسه که در آن طول حفره قابل تغییر باشد، می‌توان به یک شعله پایدار رسید. این مطلب منجر به پیدایش نسل اول TVC شد که در آن حفره بین دو دیسک که به موازات هم روی یک شفت قرار دارند، شکل می‌گیرد (شکل ۶). جریان اصلی شامل هوای خالص بوده و هوا و سوخت از صفحه جلویی دیسک ثانویه^{۲۴} به داخل حفره تزریق می‌شوند. در این حالت طول حفره به‌راحتی با تغییر فاصله دیسک قابل تغییر است. در این نسل سوخت پروپان و هوا به‌صورت مجزا به داخل حفره تزریق می‌شوند. ضمناً در این هندسه قطر دیسک ثانویه نیز قابل تغییر است. با تکرار آزمایش، نتایج نشان داد که با یک حفره به طول $0.59 D_0$ و یک دیسک ثانویه به قطر $0.173 D_0$ ، یک احتراق پایدار قابل دستیابی است (D_0 قطر دیسک جلویی است). مطالعات مختلف نشان می‌دهند که یک شعله پایدار در صورت پدید آمدن یک گردابه پایدار به‌دام‌افتاده در داخل حفره قابل دستیابی است [۸، ۹].

25. Bluff-Body
26. Mair
27. Lean Blow Out

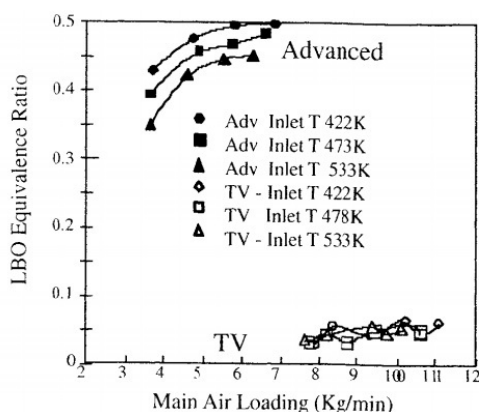
24. After-Body

نسل اول می‌توانند در محدوده وسیعی از سرعت هوای ورودی و نسبت سوخت به هوا به صورت پایدار کار کنند و ویژگی‌های اساسی به دام انداختن گردابه را از خود به نمایش بگذارند.

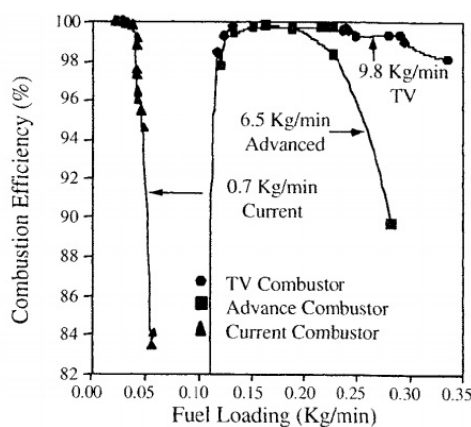
نسل دوم محفظه‌های احتراق با گردابه به دام افتاده AFRL

نسل دوم محفظه‌های احتراق با گردابه به دام افتاده که در شکل ۷ نشان داده شده، یک هندسه قوطی شکل^{۲۸} با حفره در اطراف محفظه اصلی است. عمق حفره مشابه حالت بهینه نسل اول TVC است. برخلاف نسل اول، جریان اصلی هم در این نسل دارای سوخت است. علاوه بر آن، استراتس^{۲۹} نیز به جریان اصلی اضافه شده تا انتقال جرم بین حفره و میدان اصلی را بهبود بخشد. پروپان گازی و هوا از صفحه پشتی حفره تزریق می‌گردند. چهار جت هوا اطراف هر جت سوخت وجود دارد. جریان هوای حفره به صورت مستقل از جریان اصلی قابل کنترل و اندازه‌گیری است. از دو استراتس شعاعی برای انتقال محصولات داغ احتراقی به بیرون از حفره استفاده می‌شود. جریان سوخت و هوا در بالادست ورودی محفظه اصلی به صورت پیش‌آمیخته است. ماکزیمم سرعت ورودی جریان هوا به داخل محفظه بدون تخریب شعله پیلوت ۱۵۰ متر بر ثانیه است. با افزایش سرعت گردابه تشکیل شده پایدار خواهد بود. با این حال، مهمترین جنبه تأثیرگذار نسل دوم TVC، محدوده بالای کاری دینامیکی این محفظه‌ها است. نسبت هم‌ارزی کلی به راحتی می‌تواند از ۱ به ۰/۵ تغییر کرده و سپس به صورت معکوس به یک بازگردد. این کار با خاموش و روشن کردن جریان سوخت اصلی، درحالی‌که جریان پیلوت روشن باشد، میسر می‌شود. اشتعال سریع جریان اصلی را می‌توان به کارایی استراتس در اختلاط محصولات داغ حفره با جریان اصلی (مخلوط سوخت و هوا) نسبت داد.

نتایج آزمایشگاهی مرجع [۲۰] نشان‌دهنده عدم وجود نقاط بسیار داغ و در نتیجه توزیع مناسب دما در محفظه‌های نسل دوم است. در شکل ۸-الف، محدوده عملکرد رقیق برای محفظه احتراق‌های پیشرفته و محفظه‌های با گردابه به دام افتاده برای دمای ورودی متفاوت مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده عملکرد رقیق بسیار مناسب محفظه‌های با گردابه به دام افتاده است. همچنین، در شکل ۸-ب مقایسه جالبی بین راندمان احتراق محفظه نسل دوم TVC، محفظه احتراق‌های پیشرفته و محفظه احتراق‌های رایج انجام پذیرفته است. این شکل نشان می‌دهد محفظه نسل دوم TVC، با کارایی بالا در محدوده وسیع‌تری از سوخت ورودی نسبت به دو محفظه دیگر کار می‌کند. به نظر می‌رسد وجود استراتس تأثیر مهمی در محدوده وسیع کاری محفظه نسل دوم TVC دارد. علاوه بر آن، با وجود دبی هوای خیلی بالاتر نسل دوم TVC، افت فشار درون هر سه محفظه حدود ۴ درصد است. به صورت خلاصه، نسل دوم TVC، قابلیت عالی LBO و عملکرد موثر در محدوده وسیع دینامیکی دارند.

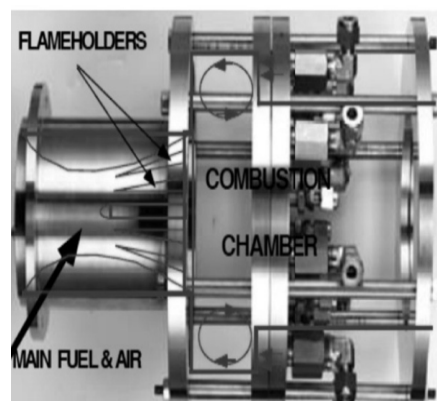


(الف)



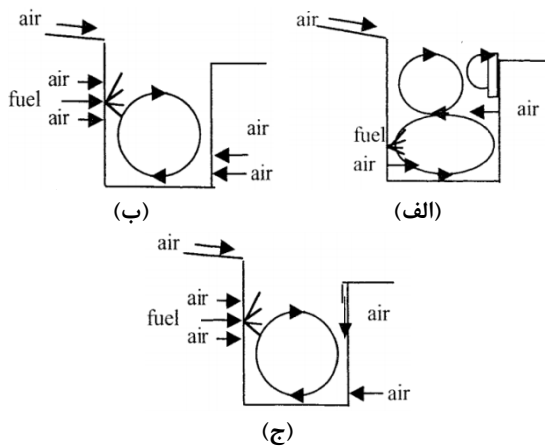
(ب)

شکل ۸-الف) مقایسه محدوده عملکرد رقیق (LBO)، ب) مقایسه راندمان احتراق در محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده با محفظه‌های رایج و پیشرفته [۲۰]

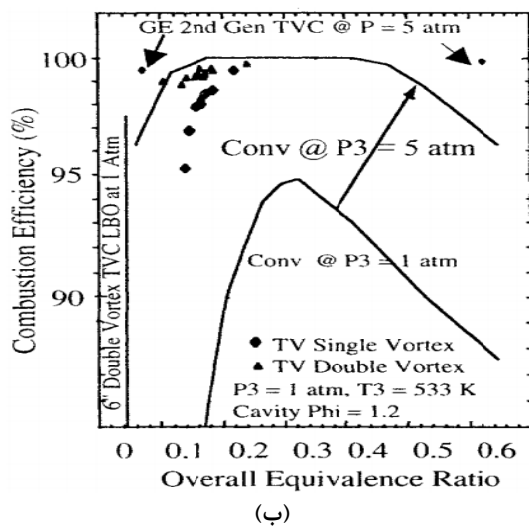
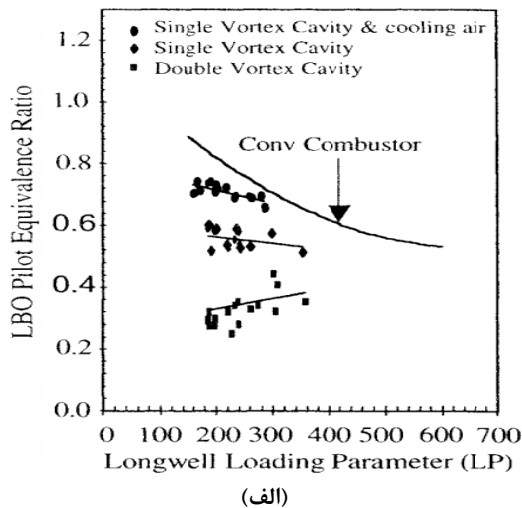


شکل ۷- نسل دوم محفظه‌های احتراق با گردابه به دام افتاده توسعه داده شده در AFRL

28. Can-Type
29. Struts



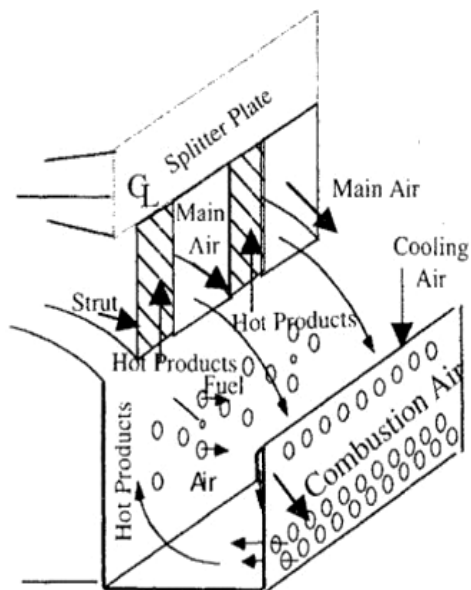
شکل ۱۰- مقایسه الگوهای مختلف ورود سوخت و هوا به داخل حفره [۲۰]



شکل ۱۱- الف) مقایسه محدوده عملکرد رقیق (LBO) و ب) مقایسه راندمان احتراق در محفظه احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده برای الگوهای مختلف ورود سوخت و هوا به داخل حفره [۲۰]

نسل سوم محفظه‌های احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده AFRL

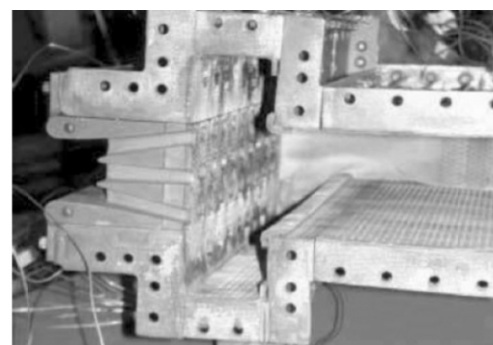
قابلیت یکپارچه شدن TVCها در توربین گازی هواپیما با استفاده از سوخت مایع برای این نسل از TVCها تست شده است. هندسه این محفظه به‌منظور دستیابی به امکان دیدن اپتیکی شعله، دارای سطح مقطع دوبعدی که به‌صورت شماتیکی در شکل ۹ نشان داده شده است، خواهد بود. با توجه به استفاده از سوخت مایع، یکی از چالش‌های اساسی در این نسل از TVCها، تعیین مکان ورود سوخت به داخل حفره است. آزمایش‌های انجام شده در AFRL، بر روی نسل سوم TVC با استفاده از الگوی‌های مختلف ورود سوخت JP-8 نشان داد که الگوهای نشان داده شده در شکل ۱۰، عملکرد کلی بهینه‌تری نسبت به سایر الگوها دارند. نتایج آزمایش نشان می‌دهد، بین این سه الگو، حفره با گردابه دوگانه کمترین میزان محدودیت LBO را دارد و در عین حال برای هر سه الگو، میزان محدودیت LBO کمتر از محفظه احتراق‌های رایج (در شرایط کاری یکسان) است. همچنین، حفره با گردابه دوگانه بالاترین راندمان احتراق بین الگوهای متفاوت در مقادیر پایین نسبت هم‌ارزی را داراست. ضمناً راندمان احتراق برای الگوهای مختلف به‌صورت قابل ملاحظه‌ای بالاتر از محفظه احتراق‌های رایج است. در شکل ۱۱، محدودیت LBO و راندمان احتراق محفظه‌های دارای حفره با الگوهای مختلف با مقایسه رایج مقایسه شده است. آزمایش‌های نسل سوم TVC اطلاعات مورد نیاز را برای طراحی TVC فشار بالا به‌عنوان تحولی در استفاده از مفهوم TVC در شرایط واقعی تر دما و فشار ورودی را فراهم آورد [۲۰].



شکل ۹- شماتیک نسل سوم محفظه‌های احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده توسعه داده شده در AFRL [۲۰]

محفظه‌های احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده شرکت جنرال الکتریک

شرکت جنرال الکتریک (GE) مفهوم TVC را برای موتورهای توربین گاز از اواسط ۱۹۹۰ آغاز کرده است. این شرکت اختراعات مختلفی در زمینه استفاده از مفهوم TVC در کاربردهای نظامی و صنعتییه ثبت رسانده است که پشتیبانی مالی این اختراعات از طرف U.S. DOE بوده است. محفظه‌های TVC طراحی شده در این شرکت، شبیه به نسل سوم TVC هستند. در این نوع از TVC، سوخت مایع هم در حفره و هم در جریان اصلی تزریق می‌شود. همچنین، سیستم تزریق هوای اضافی برای خنک‌کاری دیواره‌ها به این محفظه‌ها اضافه شده‌اند. هندریکس^{۳۰} و همکاران [۲۱] هندسه‌های مختلف را برای تعیین بهترین رویکرد برای تزریق سوخت آزمایش کرده‌اند. شرکت‌های GE و AFRL به‌صورت مشترک مفهوم جدیدی از TVC را برای موتورهای توربین‌های گازی نظامی از سال ۱۹۹۶ ارائه کرده‌اند. این کار ادامه تحقیقات AFRL بر روی نسل سوم TVC است. این کار به ساخت یک محفظه مستطیلی آزمایشگاهی با سوخت JP-8 منجر شد که توانایی تحمل فشار تا ۲۰/۵ اتمسفر را داراست (شکل ۱۲). آزمایش بر روی این TVC‌ها نشان داد که شرایط اشتعال، کنده شدن شعله و روشن شدن مجدد در ارتفاع، تا ۵۰ درصد نسبت به محفظه‌های پایدار شده با جریان چرخشی^{۳۱} فعلی بهبود پیدا کرده است. در ضمن، میزان آلایندگی‌های اکسیدهای نیتروژن (NO_x) در محدوده ۴۰ تا ۶۰ درصد استاندارد ICAO است. همچنین، راندمان احتراق بالاتر از ۹۹ درصد است و ۴۰ درصد محدوده کاری وسیع‌تر از شکل رایج محفظه احتراق‌های توربین گازی هواپیماست. لازم به ذکر است، شرکت GE در مورد استفاده از مفهوم TVC در موتورهای توربین گازی صنعتی با میزان آلایندگی بسیار پایین هیچ اطلاعات جدیدی ارائه نکرد.



شکل ۱۲- محفظه احتراق TVC در مقیاس آزمایشگاهی توسعه داده شده در GE

محفظه‌های احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده آزمایشگاه فناوری ملی انرژی DOE

آزمایشگاه فناوری ملی انرژی DOE، در حال توسعه فناوری نیروگاه‌های تولید انرژی بسیار پاک با راندمان و آلایندگی‌های تولیدی با قابلیت بالاتر از توربین‌های گازی نیروگاه‌های فعلی است. طبق گزارش DOE، ۹۰ درصد نیروگاه‌های جدید که در حال حاضر در حال ساخت هستند با سوخت پایه گاز طبیعی کار خواهند کرد. یک ویژگی این نیروگاه‌های آینده، انعطاف‌پذیری و گوناگونی سوخت خواهد بود. طراحی‌های محفظه احتراق توربین گازی، قابلیت کار کردن در محدوده وسیعی از سوخت‌ها شامل سوخت‌های سنتزی غنی شده با هیدروژن را خواهند داشت. ضمناً آزمایشگاه فناوری ملی انرژی DOE، مفهوم TVC را به‌عنوان یک فناوری نویددهنده برای محفظه احتراق‌های توربین‌های گازی آتی در نظر گرفته است. کار مشترک بین AFRL و NETL به‌منظور ارزیابی مفهوم TVC برای کاربردهای تولید توان از ۱۹۹۹ آغاز شد. هدف اولیه، ارزیابی قابلیت آلایندگی پایین محفظه احتراق‌های RQL مرحله‌ای بوده است. هدف بعدی، دستیابی به میزان آلایندگی پایین CO و NO_x در حدی که قابل مقایسه با دیگر توربین‌های گازی تجاری که با سیستم DLN (سیستم با مونوکسید نیتروژن پایین خشک بدون اضافه کردن آب و بخار) کار می‌کنند، است. بدین منظور سوخت‌های BTU بالا و سوخت‌های شامل مقادیر قابل توجه از باندهای نیتروژن مورد ارزیابی قرار گرفت. کار مشترک NETL با PRS منجر به ساخت تجهیزات آزمایشی محفظه‌هایی شده که در شرایط کاری توربین‌های گازی صنعتی بدون نیاز به کاتالیست پایدارکننده، دارای NO_x خروجی کمتر از ۳ ppmv شده است.

سیستم‌های توان Ramgen

سیستم‌های توان Ramgen [۲۲]، محفظه احتراق گردابه‌ای پیشرفته‌ای توسعه داده‌اند که توانایی بالایی برای بهبود راندمان، کاهش آلایندگی، پایداری شعله بالاتر، انعطاف پذیری سوخت، افزایش ماندگاری و کاهش هزینه ساخت داشته باشد. با وجود کاربردهای متفاوت، کاربرد اصلی محفظه احتراق گردابه‌ای پیشرفته در موتورهای توربین گازی صنعتی با آلایندگی پایین است. اولین آزمایش RPS با استفاده از مفهوم TVC در سال ۲۰۰۲ انجام شده که با استفاده از گاز طبیعی در حالت پیش مخلوط رقیق، میزان آلایندگی NO_x حدود ۹ ppmv است. نتایج اخیر این محفظه، کاهش آلایندگی NO_x به کمتر از ۱ ppmv و کاهش آلایندگی CO به کمتر از ۹ ppmv در شرایط کاری توربین گازی‌های صنعتی را نشان می‌دهد. ضمناً

30. Hendricks
31. Swirl Stabilized

فناوری و گروه محصول تقسیم شده است و در شروع گروه سه نمونه پروتوتایپ از محصول ساخته می‌شود.

با توجه به توضیحات داده شده در بخش‌های قبلی، تحقیقات متعددی به‌صورت عددی و آزمایشگاهی جنبه‌های مختلف فیزیکی جریان در محفظه احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده را مورد بررسی قرار داده‌اند. بنابراین مراحل مربوط به گروه دانش علمی که شامل TRL1 تا TRL3 در این فناوری است، طی شده است. ضمناً در مراکز معتبر تحقیقاتی و صنعتی اعم از AFRL و GE، نمونه آزمایشگاهی این فناوری ساخته شده و در شرایطی نزدیک به شرایط واقعی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بنابراین مراحل مربوط به گروه توسعه فناوری که شامل TRL4 تا TRL6 است نیز به‌صورت موفق انجام شده است. نتایج تحقیقات در این مقاله نشان می‌دهد که، هیچ نمونه موتور توربین گازی تجاری که در آن از فناوری TVC استفاده شده باشد، گزارش نشده است. بنابراین فناوری محفظه احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده در ابتدای سطح آمادگی فناوری TRL7 یعنی سطح بلوغ فناوری است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، سیر تحول استفاده از محفظه احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده به‌عنوان یک فناوری جدید در توربین‌های گازی مورد بررسی قرار گرفته است. ایده استفاده از این نوع از محفظه احتراق از افزایش آلودگی حاصل از هواپیماها با افزایش تعداد مسافری در سال‌های آینده ناشی می‌شود. بین آلاینده‌های فسیلی مختلف، دی‌اکسیدهای کربن (CO_2)، مونوکسید کربن (CO) و اکسیدهای نیتروژن (NO_x) بخش عمده آلودگی‌های هواپیماها را تشکیل می‌دهند. در محفظه احتراق‌های رایج، در اثر تزریق مستقیم سوخت و مایع و اختلاط با هوا در ناحیه اولیه، ممکن است نواحی مختلف غنی و رقیق و همچنین انواع مختلف شعله پیش‌آمیخته و غیر پیش‌آمیخته وجود داشته باشد. در نتیجه، نسبت هم‌ارزی در این ناحیه غیر قابل کنترل است و بنابراین امکان کنترل تولید آلاینده‌ها ممکن نیست. به علاوه، از آنجا که جریان چرخشی استفاده می‌شود، محدوده شرایط کاری قویاً به دبی ورودی وابسته است. همچنین، بسیاری از ناپایداری‌ها می‌تواند در فرآیند احتراق تأثیرگذار باشد و محدوده کارکرد پایدار را کاهش دهند. یک راه حل ممکن برای جلوگیری از مشکلات نامطلوب موجود در فناوری‌های جایگزین، استفاده از یک شعله نگه‌دار در کنار محفظه اصلی احتراق به‌منظور بهبود پایداری شعله است. این مفهوم در کاربردهای مادون صوت، به‌عنوان محفظه با گردابه به‌دام‌افتاده (TVC) شناخته می‌شود. مفهوم محفظه با گردابه به‌دام‌افتاده را برای یک

شرایط پایدار در هنگام شروع و پایان کار، اشتعال در دمای محیط، کاهش افت فشار به کمتر از ۲/۶ درصد و راندمان بالاتر از ۹۹ درصد، از ویژگی‌های مهم این محفظه جدید است.

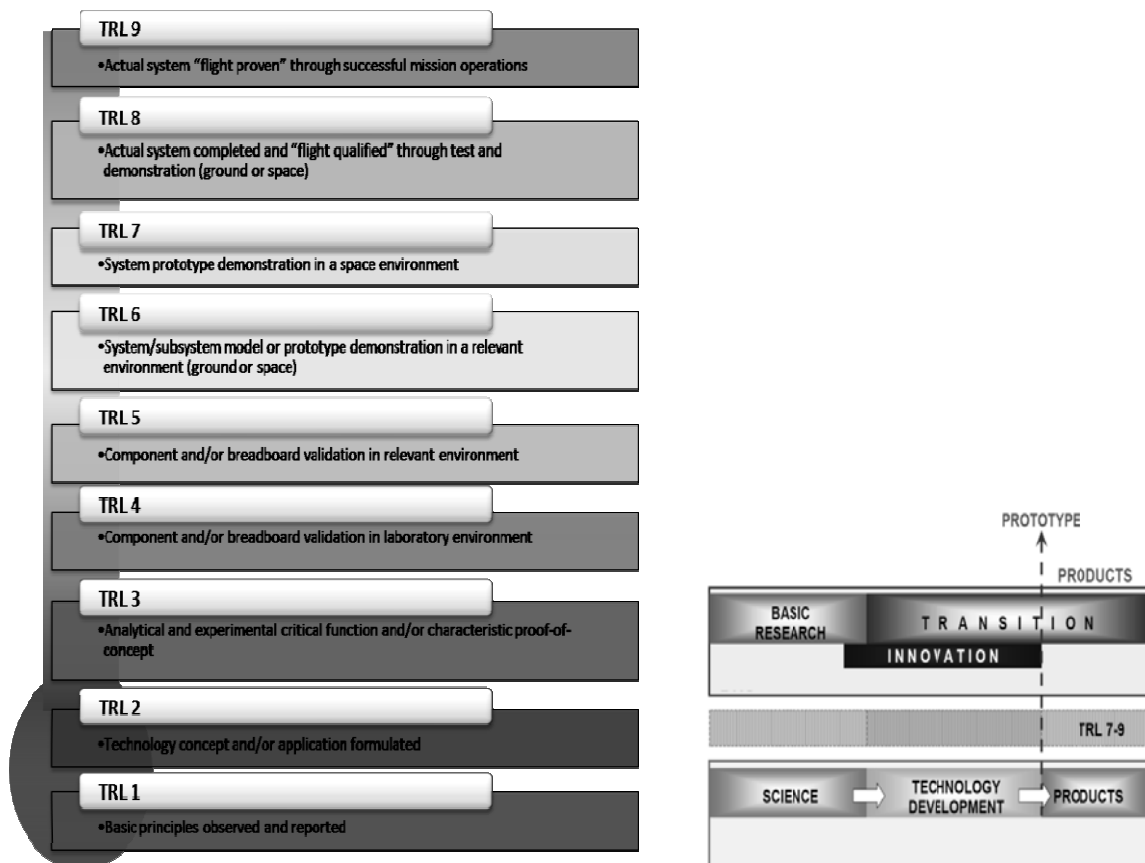
سطح آمادگی فناوری محفظه احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده

یکی از ابزارهای کاربردی در زمینه مدیریت فناوری و تجاری‌سازی نتایج تحقیقات که توسط سازمان ناسا در دهه هفتاد میلادی توسعه یافت و مورد استفاده قرار گرفت، ابزاری با هدف تعیین سطح آمادگی فناوری^{۳۳} به نام TRL است [۲۳]. ابزار مذکور که امکان ارزیابی بلوغ فناوری را در مراحل توسعه محصول امکان‌پذیر می‌سازد، به‌صورت گسترده در سطح کشورهای پیشرفته در سازمان‌های صنعتی و دولتی مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌طور که در سمت راست شکل ۱۳ نشان داده شده است، ارزیابی سطح آمادگی هر تکنولوژی (TRL) در قالب ۹ سطح زیر تقسیم‌بندی می‌شود که باتوجه به محیط سیستم از پژوهش‌های پایه‌ای و استخراج معادلات مفهومی آغاز شده و تا تولید صنعتی و توسعه بازار ادامه یابد. این ۹ سطح به ترتیب ذیل است:

- سطح اول: اصول و ایده‌های اولیه
 - سطح دوم: مفاهیم فناوری و موارد به‌کارگیری و روال شده
 - سطح سوم: کاربرد دقیق و علمی مبتنی بر ویژگی‌های رسمی یک فناوری شناخته شده
 - سطح چهارم: اجزای تهیه شده آزمایشگاهی و نمونه‌های اولیه آزمایشگاهی
 - سطح پنجم: اجزای آزمون شده در عمل و قبول شده در مرحله به‌کارگیری آزمایشگاهی
 - سطح ششم: مدل سیستمی و نمایش نمونه اولیه مورد تایید و در ابعاد واقعی
 - سطح هفتم: به‌کارگیری سیستمی فناوری پروتوتایپ در محیطی متفاوت از محیط اولیه آزمایشی
 - سطح هشتم: سیستم حقیقی و واقعی کامل شده و قابل بهره‌برداری با اطمینان بالا
 - سطح نهم: موفقیت یک فناوری در مرحله آزمون عملیاتی کامل
- همچنین ۹ سطح مذکور از آمادگی فناوری، خود به گروه‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند که با توجه به محیط سیستم، سازمان و صنعت مربوطه انعطاف‌پذیر است. نمونه‌ای از این تقسیم‌بندی در سمت چپ شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این شکل، سطوح فناوری به سه گروه دانش، گروه توسعه

تولید محفظه احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده، شرکت جنرال الکتریک (GE) است که مفهوم TVC را برای موتورهای توربین گاز از اواسط ۱۹۹۰ آغاز کرده‌اند. این شرکت اختراعاتی مختلفی در زمینه استفاده از مفهوم TVC در کاربردهای نظامی و صنعتی به ثبت رسانده است. محفظه‌های TVC طراحی شده در این شرکت، شبیه به نسل سوم TVC هستند. سوخت مایع هم در حفره و هم در جریان اصلی تزریق می‌شود. سیستم تزریق هوای اضافی برای خنک‌کاری دیواره‌ها به این محفظه‌ها اضافه شده‌اند. ضمناً، میزان آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن (NO_x) محفظه‌های شرکت GE، در محدوده ۴۰ تا ۶۰ درصد استاندارد ICAO است. راندمان احتراق بالاتر از ۹۹ درصد بوده و ۴۰ درصد شرایط کاری وسیع‌تر از شکل رایج محفظه احتراق‌های توربین گازی هواپیما می‌باشد. در انتها سطح آمادگی فناوری محفظه احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که این فناوری مراحل شش‌گانه سطوح آمادگی (مراحل دانش علمی و توسعه محصول) را گذرانده ولی هیچ نمونه موتور توربین گازی تجاری که در آن از فناوری TVC استفاده شده باشد، گزارش نشده است. بنابراین فناوری محفظه احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده در ابتدای سطح آمادگی فناوری TRL7 یعنی سطح بلوغ فناوری می‌باشد.

جریان چرخشی غنی (از سوخت) که در یک حفره به‌دام‌افتاده است، استفاده می‌کند. در این حالت یک شعله پیلوت به‌وجود می‌آید و به‌صورت پیوسته مخلوط رقیق عبوری از بالای حفره را مشتعل می‌کند. ناحیه چرخشی محصولات داغ احتراقی درون حفره و اختلاط سریع آنها با مخلوط رقیق اصلی یک منبع اشتعال پیوسته را فراهم می‌آورد و شعله را پایدار می‌سازد. توسعه محفظه احتراق با گردابه به‌دام‌افتاده از دهه پایانی قرن بیستم در آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی هوایی آمریکا (AFRL) با توسعه سه نسل از این محفظه‌ها شروع شده است. محفظه احتراق‌های نسل اول و نسل دوم این مرکز، استوانه‌ای شکل بود و نسل سوم به‌صورت صفحه‌ای است. در نسل‌های اول و دوم TVC، دارای قابلیت عالی LBO و عملکرد موثر در محدوده وسیع دینامیکی هستند. برخلاف نسل اول و دوم که در آنها از سوخت گازی استفاده شده است، در نسل سوم از سوخت مایع JP-8 استفاده شده است. در این نسل الگوهای مختلف ورود سوخت و اکسید به داخل حفره بررسی شد و الگوی بهینه با راندمان احتراق بالا و LBO مناسب‌تر به‌دست آمد. آزمایش‌های نسل سوم TVC، اطلاعات مورد نیاز را برای طراحی TVC فشار بالا به‌عنوان تحولی در استفاده از مفهوم TVC در شرایط واقعی‌تر دما و فشار ورودی را فراهم آورد. یکی دیگر از مراکز فعال در



شکل ۱۳- شمایک سطوح فناوری [۲۳]

[11] Katta, V. R. and Roquemore, W., "Numerical Studies on Trapped-Vortex Combustor," *AIAA Paper*, Vol. 2660, 1996.

[12] Mongeau, L., Kook, H. and Franchek, M., "Active Control of Flow-Induced Cavity Resonance," *AIAA/CEAS Paper*, 98-2349, 1998.

[13] Gharib, M. and Roshko, A., "The Effect of Flow Oscillations on Cavity Drag," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 177, 1987, pp. 501-530.

[14] Koenig, K. and Roshko, A., "An Experimental Study of Geometrical Effects on the Drag and Flow Field of Two Bluff Bodies Separated by a Gap," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 156, 1985, pp. 167-204.

[15] Little, B. and Whipkey, R., "Locked Vortex after Bodies," *Journal of Aircraft*, Vol. 16, 1979, pp. 296-302.

[16] Xavier, P., "Investigation of Flame PhD diss., INSA de Rouen, 2014.

[17] Burrus, D., Johnson, A., Roquemore, W. and Shouse, D., "Performance Assessment of a Prototype Trapped Vortex Combustor Concept for Gas Turbine Application," in *ASME Turbo Expo 2001: Power for Land, Sea, and Air*, 2001, pp. V002T02A053-V002T02A053.

[18] Lefebvre, A. H., *Gas Turbine Combustion*, CRC press, Hoboken, NJ, 1998.

[19] Mair, W. "The Effect of a Rear-Mounted Disc on the Drag of a Blunt-Based Body of Revolution (Drag of Body of Revolution with Blunt Base Substantially Reduced by Mounting Disk Behind Body with Smaller Diameter than Body)," *Aeronautical Quarterly*, Vol. 16, 1965, pp. 350-360.

[20] Roquemore, W. and *et al.*, "Vortex Combustor Concept for Gas Turbine Engines," in *AIAA, Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 39th, Reno, NV*, 2001.

[21] Hendricks, R.C. and *et al.*, "Experimental and Computational Study of Trapped Vortex Combustor Sector Rig with Tri-Pass Diffuser," *International Journal of Rotating Machinery*, Vol. 7, 2001, pp. 375-385.

[22] Bucher, J. and *et al.*, "The Development of a Lean-Premixed Trapped Vortex Combustor," *ASME, Paper No. GT2003-38236*, 2003.

[23] https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html.

مراجع

[1] Agarwal, K. K., Krishna, S. and Ravikrishna, R., "Mixing Enhancement in a Compact trapped Vortex Combustor," *Combustion Science and Technology*, Vol. 185, 2013, pp. 363-378.

[2] Sawyer, R.F., "Science Based Policy for Addressing Energy and Environmental Problems," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32, 2009, pp. 45-56.

[3] CAEP Seventh Meeting: Report of the Committee Independent Experts on the 2006 NOx Review and the Establishment of Medium and Long Term Technology Goals for NOx, Feb 2007.

[3] David L. Daggett: Water Mist and Injection of Commercial Aircraft Engines to Reduce Irport NOx, NASA/CR-2004-212957.

[4] Wulff, A. and Hourmouziadis, J., "Technology Review of Aeroengine Pollutant Emissions," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 1, 1997, pp. 557-572.

[5] Candel, S., "Combustion Dynamics and Control: Progress and Challenges," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, 2002, pp. 1-28.

[6] Gokulakrishnan, P., and *et al.*, "A Novel Low Nox Lean, Premixed, and Prevaporized Combustion System for Liquid Fuels," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 130, 2008, pp. 051501.

[7] Lieuwen, T., McDonell, V., Petersen, E. and Santavicca, D., "Fuel Flexibility Influences on Premixed Combustor Blowout, Flashback, Autoignition, and Stability," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 130, 2008, pp. 011506.

[8] Hsu, K., Goss, L., Trump, D. and Roquemore, W., "Performance of a Trapped-vortex Combustor," *AIAA Paper*, Vol. 810, 1995.

[9] Hsu, K.-Y., Goss, L. and Roquemore, W. "Characteristics of a Trapped-Vortex Combustor," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, 1998, pp. 57-65.

[10] Katta, V. R. and Roquemore, W., "Study on Trapped-Vortex Combustor-Effect of Injection on Flow Dynamics," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, 1998, pp. 273-281.