



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of Space Science,
Technology & Applications
(Persian)

Vol. 5, No. 1, pp.:100-124
2025

DOI:

10.22034/jssta.2025.453968.1161

Article Info

Received: 1403-02-04
Accepted: 1404-02-28

Keywords

rotating detonation rocket
engine, detonation, Scientific
status

How to Cite this article

F. Kiani Falavarjani, "A
review and scientometric
analysis of rotary detonation
engine", *Journal of Space
Science, Technology and
Applications*, vol. 5, no. 1,
pp. 100–124, 2025.

Original Article

A review and scientometric analysis of rotary detonation engine

Farhad Kiani Falavarjani¹

¹ Malek Ashtar university of Technology, Faculty of mechanic Engineering, Isfahan, Iran
aerospace1362@gmail.com

Abstract

The use of explosion instead of combustion can lead to a significant reduction in the dimensions and mass of the propulsion chamber. Explosion releases significantly more energy compared to combustion, which causes more effective thrust and can create a new evolution in the aerospace industry. The purpose of this research is to develop the knowledge of enabling technologies in the field of space propulsion and to develop the concept and performance and to examine the status of scientific productions in the field of rotary explosive engine technology. The current research is of applied, data mining and scientometric type, and scientific database analysis techniques were used in its implementation. Data and keywords related to research between 2010 and 2024 were searched and evaluated using the Scopus database. Vosviewer software was used to analyze the data and visualize the obtained information. The statistical population of the research was 895 articles in the field of technology related and involved with the rotary explosive engine. The analyzes included the frequency of publication by year, the countries publishing the most documents, and the preparation of a map of technologies and a map of emerging technologies in this field. The results of the survey show that the main keywords include combustion chamber design, modeling and simulation, heat-resistant materials, and fuel injection systems and efficiency. The frequency and trend of publishing scientific documents in the field of rotary explosion engine is on the rise, China and the United States Muttahida has done the most research and support (scholarships, joint courses, equipping infrastructure and laboratories, etc.) in this field of technology.

مرور و تحلیل علم سنجی متون در حوزه موتور

انفجار چرخشی

فرهاد کیانی فلاورجانی^۱

۱- دانشگاه صنعتی مالک اشتر مجتمع دانشگاهی مکانیک، اصفهان (شاهین شهر)، ایران

aerospace1362@gmail.com



دسترس پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه علوم، فناوری
و کاربردهای فضایی

سال پنجم، شماره ۱، صفحه ۱۰۰-۱۲۴

بهار و تابستان ۱۴۰۴

DOI:

10.22034/jsssta.2025.453968.1161

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

واژه‌های کلیدی

موتورهای انفجاری چرخشی، انفجار،
وضعیت علمی

نحوه استناد به مقاله

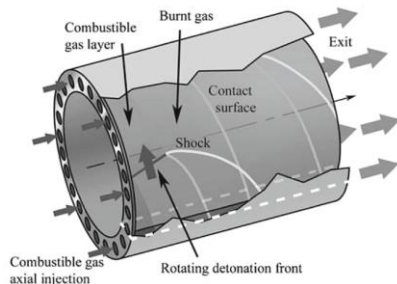
فرهاد کیانی فلاورجانی، "مرور و
تحلیل علم‌سنجی متون در حوزه
موتور انفجار چرخشی"، دو فصلنامه
علوم، فناوری و کاربردهای فضایی،
جلد پنجم، شماره اول، صفحات
۱۰۰-۱۲۴، ۱۴۰۴.

چکیده

استفاده از انفجار به جای احتراق می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه ابعاد و جرم محفظه پیشران شود. انفجار به شکل قابل توجهی انرژی بیشتری در مقایسه با احتراق آزاد می‌کند که باعث رانش مؤثرتر شده و می‌تواند تحول جدیدی در صنعت هوافضا ایجاد کند. هدف این پژوهش توسعه دانش فناوری‌های برتر در حوزه پیشران‌های فضایی (توسعه مفهوم و طرز عملکرد) و بررسی وضعیت تولیدات علمی در حوزه فناوری موتور انفجاری چرخشی است. پژوهش حاضر از نوع کاربردی، داده کاوی و علم‌سنجی است و در انجام آن از تکنیک‌های تحلیل پایگاه‌های داده علمی استفاده شده است. داده‌ها و کلیدواژه‌های مرتبط با پژوهش در فاصله بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ با استفاده از پایگاه اطلاعاتی اسکوپوس جستجو و ارزیابی شدند. برای تحلیل داده‌ها و مصورسازی اطلاعات به دست آمده، از نرم‌افزار Vosviewer استفاده شده است. جامعه آماری پژوهش ۸۹۵ مقاله در زمینه فناوری مرتبط و درگیر با موتور انفجاری چرخشی بوده است. تحلیل‌ها شامل، میزان فراوانی انتشار بر حسب سال، کشورهای بیشترین اسناد منتشر کننده، و تهیه نقشه فناوری‌ها و نقشه فناوری‌های نوظهور در این حوزه بوده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد کلیدواژه‌های اصلی شامل طراحی محفظه احتراق، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، مواد مقاوم به حرارت، و سیستم‌های تزریق سوخت و کارایی بوده است. فراوانی و روند انتشار اسناد علمی در حوزه موتور انفجاری چرخشی به شدت سیر صعودی دارد، کشور چین و ایالات متحده بیشترین پژوهش‌ها و حمایت‌ها (بورسیه تحصیلی، دوره‌های مشترک، تجهیز زیرساخت و آزمایشگاه...) را در این حوزه فناوری انجام داده‌اند.

۱- مقدمه

نیاز به سیستم‌های پشتیبانی پیچیده‌ای که موتور موشک‌های معمولی برای کنترل چگونگی مخلوط کردن و سوخت پیش‌رانه‌ها نیاز دارند، عمل می‌کند [6]. این بدان معنی است که موتور انفجاری چرخشی از نظر مکانیکی می‌تواند بسیار ساده‌تر باشد [3]. فرایند عملیاتی موتور انفجاری چرخشی یک موج انفجاری است که در اطراف یک کانال دایره‌ای (حلقه) حرکت می‌کند [5]. این مفهوم در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- فرآیند عملکرد یک موتور انفجاری چرخشی [5]

سوخت و اکسید کننده از طریق سوراخ‌ها یا شکاف‌های کوچک به کانال تزریق می‌شوند. سپس انفجار در مخلوط سوخت اکسیدکننده توسط نوعی جرقه‌زنی آغاز می‌شود. پس از روشن شدن موتور، انفجارها به خودی خود ادامه می‌یابند. در نهایت، محصولات احتراق به خارج از کانال هدایت می‌شوند و توسط سوخت و اکسید کننده ورودی به بیرون رانده می‌شوند [7] [8]. انفجار با استفاده از توده سوخت، به شکل قابل توجهی انرژی بیشتری در مقایسه با احتراق تولید می‌کند. بنابراین بیش از ۶۰ سال است که محققان در حال کار بر ایده موتور انفجاری چرخشی به عنوان یک روش بالقوه برای کاهش وزن و اضافه کردن رانش هستند [9]. در اصل، این وسیله با استفاده از یک استوانه که در داخل یک استوانه بزرگ‌تر دیگر قرار گرفته کار خود را شروع می‌کند. همچنین یک فاصله بین استوانه‌ها و تعدادی سوراخ کوچک یا روزنه‌هایی که از طریق آن مخلوط سوخت می‌تواند منفجر شود، در این وسیله طراحی می‌شود [10]. نوعی از احتراق باعث ایجاد انفجار در فاصله حلقوی می‌شود و به این ترتیب گازهایی تولید می‌شود که در انتهای کانال حلقه‌ای به بیرون رانده می‌شوند تا نیروی رانش را در جهت مخالف تولید کنند. همچنین این کار، یک موج شوک ایجاد می‌کند که با سرعت تقریباً ۵ برابر سرعت صوت در اطراف کانال پخش می‌شود. از این موج شوک، در صورت اضافه شدن سوخت در نقاط مناسب و در زمان‌های مناسب، می‌توان برای ایجاد انفجارهای بیشتر در یک الگوی پایدار و چرخشی استفاده کرد [11].

موتورهای موجود هوافضایی به دلیل مشکلات ذاتی برای رسیدن به سرعت چندین برابر سرعت صوت تلاش می‌کنند. به عنوان مثال توربوجت یک واژه کلی برای توصیف موتورهای توربین گازی است، که به طور کلی از سه قسمت کمپرسور (فشارنده هوای ورودی)، محفظه احتراق و توربین (برای چرخاندن کمپرسور و یا شفت) تشکیل می‌شوند. در کل منظور از توربوجت نوعی از موتور جت بدون شفت اضافی (مقصود شفتی است که برای انتقال نیرو به جایی غیر از کمپرسور مورد استفاده قرار بگیرد) و ضریب کنار گذر صفر است. طراحی پایه و کلی این نوع موتور در سرعت‌های کم بسیار ناکارآمد، کم بازده، پر مصرف و نسبتاً پر صدا می‌باشد و در رسیدن به سرعت‌های بالا ناتوان است [1]. سایر گزینه‌های امیدوارکننده، مانند موتورهای رم جت، می‌توانند با فشرده‌سازی هوای ورودی با شکل منحصربه‌فرد از ۳ ماخ پیشی بگیرند [2]. با این حال، چنین موتورهایی راندمان احتراق بهبود یافته را ارائه نمی‌دهند. آن‌ها همچنین به سرعت اولیه بالایی نیاز دارند (در حالت ایده‌آل ۰٫۵ ماخ). به همین دلیل، اعتقاد بر این است که یک موتور انفجاری چرخشی جایگزین موثرتری برای موتورهای توربوجت و رم جت است و آن‌ها پتانسیل ایجاد انقلابی در پروازهای مافوق صوت با مصرف سوخت کمتر را دارند [4] [5]. گزینه‌های دیگر، مانند موتورهای اسکرام جت، نیز عالی هستند، اما برای شروع به سرعت‌های بالاتر از ۴ ماخ نیاز دارند [6]. از سوی دیگر، موتور انفجاری چرخشی می‌تواند از صفر کیلومتر در ساعت شروع کند و نگهداری آن آسان‌تر است [1]. موتورهای انفجاری چرخشی نیز بدون مشکل نیستند. به عنوان مثال، دیواره‌های داخلی موتور باید در برابر امواج ضربه ثابت مقاومت سازه‌ای لازم را داشته باشد، که این امر مستلزم استانداردهای بالایی در یکپارچگی ساختار و استحکام سازه و بدنه است [6].

یک موتور انفجاری چرخشی از استوانه‌های متحدالمرکز ساخته شده است [2]. سوخت در شکاف بین استوانه‌ها جریان می‌یابد و پس از احتراق، انتشار سریع گرما موج شوک را ایجاد می‌کند و یک ضربه قوی از گاز با فشار و درجه حرارت قابل توجهی که سرعت بیشتری نسبت به سرعت صوت دارد، موج را به حرکت در می‌آورد [3]. این روند احتراق به معنای واقعی کلمه یک انفجار است، این انفجار، فشار و درجه حرارت بالایی را تولید می‌کند که باعث حرکت سریع‌تر وسیله می‌شود [5]. به عبارت ساده، آنچه اتفاق می‌افتد، این است که وقتی موج شوک برقرار شد، بدون

۲- فناوری انفجار چرخشی

فناوری پیشران یک عنصر کلیدی برای تحقق مأموریت‌های فضایی پیشرفته می‌باشد، دستیابی به مدارهای بالاتر و یا انجام اکتشافات فضایی و یا حمل محموله‌ها در فضای دور نیازمند ایده پیشران‌های جدید می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، محققان مطالعه اشکال جدید پیشران را در دستور کار دارند. فناوری موتور انفجار چرخشی^۲ فناوری جدید و تازه‌ای نیست این فناوری در دهه ۱۹۵۰ میلادی مطرح شد [1]. موتور انفجار چرخشی به شکلی ساده، به معنای مکانیکی، از سوی مهندسان دانشگاه میشیگان در دهه ۱۹۵۰ توسط پروفیسور جیمز آرتور نیکولز^۳ مطرح شد، موتورهای انفجار چرخشی، یک نوع احتراق حلقوی است که موج انفجار را محدود و سوخت پیوسته را تزریق و مخلوط اکسید کننده را می‌سوزاند. این نوع احتراق منجر به افزایش فشار کل و در نتیجه راندمان بالاتر نسبت به فشار ثابت می‌شود. موتورهای انفجار چرخشی در فرکانس‌های بالا بدون نیاز به قطعات متحرک عمل کرده و از نظر فیزیکی فشرده‌تر هستند که این ویژگی آن‌ها را در مقایسه با سایر موتورهای جذاب‌تر می‌کند. موتورهای انفجار چرخشی معمولاً در مقیاس آزمایشگاهی عملکرد کمتر از حالت ایده‌آل را نشان می‌دهند و به دلیل فیزیک پیچیده و رژیم‌های جریان در کانال انفجار چرخشی، درک کامل از مکانیسم‌های پشت این تلفات به راحتی ممکن نیست [15].

از دهه ۱۹۶۰ به بعد، موتورهای انفجار چرخشی در مجامع علمی و تحقیقاتی مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما با توجه به پیچیدگی‌های فنی و عملیاتی در حد ایده باقی ماندند، اما در سال‌های اخیر توجه به آن‌ها به عنوان یکی از فناوری‌های پیشران پیشرفته نسل آینده دوباره افزایش یافته است [5]. موتورهای انفجار چرخشی با وجود چالش‌های خود، به دلیل پتانسیل بالایی که در افزایش کارایی و عملکرد دارند، موضوع تحقیقات گسترده‌ای هستند. اکنون با رشد سریع تکنولوژی و استفاده از فناوری‌های نوظهور این فناوری با توجه به قابلیت‌های آن به عنوان آینده پیشران‌های فضایی مطرح شده است [9]. شرکت‌ها و سازمان‌های متعددی در حال تحقیق و پژوهش بر روی این فناوری هستند و تاکنون موفقیت‌هایی نیز حاصل شده است، ناسا و آژانس اکتشافات هوافضای ژاپن اولین نمونه از این سامانه پیشران را با موفقیت بر روی سامانه هوافضایی آزمایش کرده‌اند [16] [11]. برای بیش

اگر این احتراق به پایداری برسد، این موتور می‌تواند نیرویی با بازدهی بسیار بیشتر تولید کند. آزمایش‌های جدید انجام شده به قدری قدرتمند و طولانی بود که ملزومات نشستن یک فرودگر یا احتراق در خلأ را برای یک مأموریت به ماه یا مریخ برآورده می‌کند.

این تکنولوژی هنوز راه زیادی تا رسیدن به بلوغ دارد. آزمایش‌های احتراق بیشتری لازم است تا مقیاس موتورهای بزرگ‌تر شود و دسته‌های پارامترهای مختلفی را در بر بگیرد. اگر این کار با موفقیت انجام شود، موتورهای انفجار چرخشی می‌توانند در فرودگرها، مراحل بالایی بوسترها و پیش‌رانش‌های ترمزی برای فرودآوردن محموله‌ها روی سطح مریخ استفاده شوند. سامانه‌های مجهز به موتورهای انفجار چرخشی جهشی بزرگ در بازدهی طراحی‌ها ایجاد خواهند کرد.

هدف اصلی در تمایل به این پیشران جدید این است که وزن سامانه مجموعه پیشران کاهش یافته و وسایل هوافضایی بتوانند محموله‌های بیشتری را به اعماق فضا بفرستند.

موتورهای انفجاری چرخشی در واقع ترکیب موتورهای انفجاری ضربه‌ای^۱ با توربین‌های گازی می‌باشند که از طریق هوای کنارگذر موتور وارد لوله‌های انفجار شده و با احتراق، تولید نیروی پیشران می‌کند [12].

ترکیب موتور انفجاری با توربین گازی علاوه بر کاهش مصرف سوخت بدلیل تولید نیروی پیشران بیشتر، این امکان را به وسایل هوافضایی می‌دهد که بتواند با سرعت‌های بالاتری نیز پرواز کنند، محققان با آزمایش بر روی نمونه‌های شبیه‌سازی شده نشان داده‌اند که موتورهای انفجاری چرخشی بطور بالقوه می‌توانند ۱۰ درصد قدرت بیشتر تولید کرده و هم‌چنین ۲۵ درصد مصرف سوخت کمتری نیز داشته باشند [13] [6].

البته اکثریت قریب به اتفاق موتورهای برای دستیابی به اهداف خود از احتراق به جای انفجار استفاده می‌کنند. احتراق فرایندی نسبتاً کند و کنترل شده است که ناشی از واکنش بین سوخت و اکسیژن در دماهای بالاست و به عنوان یک فناوری بسیار موثر شناخته می‌شود [11]. از طرف دیگر، انفجار فرایندی سریع و بی‌قاعده است که قابلیت پیش‌بینی بسیار کمتری دارد. یک انفجار برخلاف احتراق، مقدار زیادی انرژی تولید می‌کند [14].

² Rotating Detonation Engines (RDEs)

³ James Arthur Nicholls

¹ Pulse Detonation Engine

بار به طور عملی مورد آزمایش قرار گرفتند، اما به دلیل چالش‌های فنی، این پروژه‌ها نتوانستند به توسعه تجاری منجر شوند.

تحقیقات مدرن (دهه ۱۹۹۰ تا اکنون): در دهه ۱۹۹۰، با ظهور روش‌های شبیه‌سازی عددی و محاسباتی پیشرفته، علاقه‌مندی جدیدی به تحقیق در زمینه موتورهای انفجاری ایجاد شد. در این دوره بود که مفهوم موتورهای انفجار چرخشی موتورهای انفجار چرخشی مطرح شد. برخلاف PDEها که از انفجارهای پالسی استفاده می‌کردند، موتورهای انفجار چرخشی از انفجارهای مداوم در محفظه‌های حلقوی بهره می‌بردند، که منجر به کارایی بالاتر و پایداری بیشتر می‌شد. این دوره شاهد آزمایش‌های گسترده و مدل‌سازی‌های پیچیده برای بهینه‌سازی طراحی موتورهای انفجار چرخشی بود.

تحقیقات جاری (۲۰۲۰ به بعد): در سال‌های اخیر، تحقیق و توسعه در زمینه موتورهای انفجار چرخشی شتاب بیشتری گرفته است. دانشگاه‌ها، آزمایشگاه‌های تحقیقاتی، و شرکت‌های صنایع دفاعی و فضایی در حال حاضر در حال انجام آزمایش‌های پیشرفته برای بهینه‌سازی این فناوری هستند. پیشرفت‌های اخیر در مواد مقاوم در برابر دما و فشار بالا، طراحی‌های نوآورانه محفظه‌های احتراق، و شبیه‌سازی‌های دقیق‌تر باعث شده است که موتورهای انفجار چرخشی به‌عنوان یکی از گزینه‌های جدی برای پیش‌ران‌های فضایی و هوایی مطرح شوند. شکل ۲ نشان‌دهنده عملکرد یک موتور انفجار چرخشی است:

- ❖ محفظه‌ی احتراق^۴: محل وقوع انفجار و ایجاد موج دتونیشن که با رنگ خاکستری روشن نشان داده شده است.
- ❖ ورودی سوخت و هوا^۵: دو فلش جداگانه آبی و سبز برای ورود سوخت و هوا به محفظه‌ی احتراق.
- ❖ شمع جرقه‌زن^۶: دایره قرمز در نزدیکی ورودی محفظه که برای شروع فرایند انفجار استفاده می‌شود.
- ❖ موج انفجار^۷: فلش نارنجی بزرگ نشان‌دهنده موج انفجار که در داخل محفظه حرکت می‌کند.
- ❖ نازل خروجی: قسمت مخروطی در انتهای محفظه که برای افزایش سرعت گازهای خروجی و ایجاد نیروی رانش به کار می‌رود.

^۴ Detonation Chamber

^۵ Fuel and Air Inlet

^۶ Spark Plug

^۷ Detonation Wave

از شش دهه، ناسا برای ارسال فضاپیما و ماهواره به فضا به راکت‌های شیمیایی متکی بوده است. این راکت‌ها کار خود را به خوبی انجام می‌دهند، اما نقطه ضعفشان این است که از سال ۱۹۴۲ تاکنون به نزدیکی حد نظری عملکرد رسیده‌اند؛ از زمان راکت‌های V2 آلمان، طراحی پایه اکثر راکت‌های سوخت مایع تغییر قابل توجهی نداشته است [17].

ناسا با توسعه موتورهای انفجار چرخشی به دنبال تغییری بنیادی در طراحی موتور راکت‌ها و پیش‌ران‌های هوافضایی است [18]. به جای یک محفظه احتراق در یک موتور انفجار چرخشی سوخت وارد یک شکاف بین دو استوانه هم‌محور می‌شوند. وقتی فرایند احتراق در این ترکیب ایجاد شود، یک واکنش ترکیبی و یک موج شوک ایجاد می‌شود [19]. این موج با سرعت بسیار زیاد در شکاف حرکت می‌کند، گرما و فشار بیشتری را تولید می‌کند [18]. ناسا با هدف آماده‌سازی سریع‌تر ماموریت بازگشت به ماه، در حال ساخت نوعی موتور راکت انفجار چرخشی است. فرایند گرم‌سازی فراصوت باعث ایجاد نیرو در این موتور می‌شود. عملکرد آن شباهت زیادی به فرایند حرکت امواج شوک انفجار در اتمسفر دارد. قرار است از این فناوری در سفرهای ماه و مریخ استفاده شود [7].

۳- مفهوم و طرز عملکرد موتورهای انفجار چرخشی

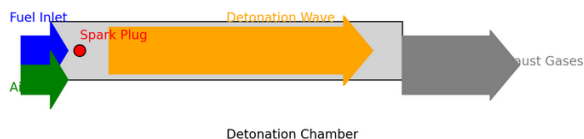
موتورهای انفجار چرخشی نوعی از موتورهای هستند که از انفجارهای پالس‌دار برای تولید نیروی محرکه استفاده می‌کنند. برخلاف موتورهای جت سنتی که از احتراق مداوم بهره می‌برند، موتورهای انفجار چرخشی از انفجارهای پیاپی برای ایجاد فشار و دماهای بالا جهت نیروی رانش استفاده می‌کنند. تاریخچه تحقیقاتی این فناوری به صورت زیر بوده است:

مفاهیم اولیه (اوایل قرن ۲۰): اولین مطالعات در زمینه استفاده از انفجار برای پیش‌ران‌ها توسط دانشمندانی مانند یاکوب کریستوفسکی انجام شد که در اوایل قرن ۲۰ میلادی درباره نحوه استفاده از امواج انفجاری برای افزایش بازدهی موتورها تحقیق کردند. در این دوران، مفاهیم اولیه موتورهای انفجاری در چارچوب‌های نظری مطرح شد، اما به دلیل عدم وجود فناوری‌های پیشرفته، این تحقیقات به مرحله عملی نرسید.

دوره بعد از جنگ جهانی دوم: پس از جنگ جهانی دوم، به‌ویژه در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰، برخی تحقیقات این زمینه آغاز شد. موتورهای انفجاری پالسی از موج‌های انفجاری پیاپی برای تولید پیش‌ران استفاده می‌کردند. این فناوری در اصل جد موتورهای انفجار چرخشی به حساب می‌آید. PDEها برای اولین

- ❖ گازهای خروجی^۸: فلش خاکستری نشان‌دهنده گازهای خروجی که باعث ایجاد نیروی رانش می‌شوند.

Schematic of a Pulse Detonation Engine (PDE)



شکل ۲- شماتیکی از طرز عملکرد موتورهای انفجار چرخشی [19]

این فرایند به طور مداوم تکرار می‌شود تا نیروی محرکه‌ی مورد نیاز فراهم شود. طراحی ساده و کارایی بالای این موتورها باعث شده تا آنها به عنوان یکی از گزینه‌های مهم در تحقیقات هوافضا و سامانه‌های نظامی پرسرعت مطرح باشند، استفاده از موتورهای انفجار چرخشی برای پروازهای هایپرسونیک (با سرعت بیش از پنج برابر سرعت صوت) و پرتاب‌های فضایی می‌تواند بهبودهای چشمگیری در کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی در مأموریت‌های فضایی ایجاد کند [21].

۱-۳- اصول کار موتورهای انفجار چرخشی

اصول کار موتورهای انفجار چرخشی را می‌توان به صورت خلاصه به صورت زیر بیان نمود [23][22]:

- **ورود مخلوط سوخت و هوا:** مخلوطی از سوخت (مانند هیدروژن، متان یا سوخت‌های هیدروکربنی دیگر) و هوا وارد یک محفظه‌ی احتراق می‌شود. نسبت مخلوط سوخت و هوا باید دقیق باشد تا بتواند شرایط مناسبی برای دتوئیشن (انفجار) فراهم کند.
- **ایجاد موج انفجار:** یک منبع جرقه (مثل جرقه‌زن) یا روش‌های دیگر اشتعال، مخلوط سوخت و هوا را مشتعل می‌کند. این اشتعال منجر به ایجاد یک موج انفجار می‌شود که با سرعتی بسیار بالاتر از سرعت صوت (حدود ۱۶۰۰ متر بر ثانیه) در داخل محفظه‌ی احتراق حرکت می‌کند.
- **تخلیه محصولات انفجار:** موج انفجار با عبور از مخلوط سوخت و هوا، دما و فشار بسیار بالایی ایجاد می‌کند. محصولات انفجار با فشار و دمای بالا از انتهای محفظه به سمت بیرون تخلیه می‌شوند و این خروج با سرعت بالا نیروی رانش را ایجاد می‌کند.

۲-۳- ساختار موتورهای انفجار چرخشی

محفظه‌ی احتراق:^۹ این محفظه معمولاً یک لوله‌ی بلند و استوانه‌ای است که از مواد مقاوم در برابر دما و فشار بالا ساخته شده است. مواد معمول شامل آلیاژهای نیکل و فولادهای مخصوص می‌باشند.

سیستم تزریق سوخت و هوا: برای ورود دقیق مخلوط سوخت و هوا به محفظه‌ی احتراق، از سیستم‌های تزریق پیشرفته استفاده می‌شود. این سیستم‌ها باید بتوانند مخلوط را به طور مداوم و با نسبت دقیق وارد محفظه کنند.

سیستم اشتعال: سیستم جرقه‌زن یا منابع دیگر اشتعال برای شروع فرایند انفجار ضروری است. این سیستم باید قادر به ایجاد جرقه در زمان‌های دقیق و به طور مکرر باشد.

نازل: انتهای محفظه به یک نازل منتهی می‌شود که نقش آن افزایش سرعت خروج گازهای محصولات انفجار و افزایش رانش است. طراحی نازل بهینه برای کاهش افت فشار و افزایش کارایی موتور اهمیت دارد.

۳-۳- مزایای موتورهای انفجار چرخشی

- **بازدهی بالا:** موتورهای انفجار چرخشی به دلیل استفاده از انفجار به جای احتراق مداوم، بازدهی بالاتری در تبدیل انرژی شیمیایی سوخت به نیروی محرکه دارند. کنترل دقیق و پایدار نگه‌داشتن انفجارها چالشی بزرگ در این موتور می‌باشد [11][2].
- **طراحی ساده‌تر:** به دلیل عدم نیاز به قطعات متحرک پیچیده، طراحی این موتورها ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر است [3].
- **عملکرد در سرعت‌های بالا:** این موتورها قابلیت عملکرد بهتر در سرعت‌های بالاتر از سرعت صوت را دارند [6][4]. این موتور می‌تواند بازدهی سوخت بالاتری داشته باشد و در عین حال پایداری بهتری نسبت به موتورهای احتراق معمولی فراهم کند. این فناوری منجر به کاهش مصرف سوخت و افزایش

^۹ Detonation Chamber

^۸ Exhaust Gases

چالش: تزریق دقیق و یکنواخت سوخت و اکسیدان به محفظه انفجار چرخشی برای ایجاد و حفظ امواج انفجاری پایدار ضروری است [26].

دلایل: تغییرات فشار و دما در محفظه که می‌تواند بر تزریق سوخت تاثیر بگذارد و نیاز به تزریق سریع و یکنواخت برای حفظ فرآیند انفجاری می‌باشد.

راه‌حل‌های احتمالی: توسعه نازل‌های پیشرفته که می‌توانند به طور دقیق سوخت و اکسیدان را تزریق کنند و استفاده از سیستم‌های الکترونیکی برای کنترل و تنظیم جریان سوخت در این فناوری مورد نیاز است.

۴. ارتعاشات و تنش‌های مکانیکی

چالش: امواج انفجاری می‌توانند ارتعاشات و تنش‌های مکانیکی زیادی را ایجاد کنند که ممکن است به ساختار موتور آسیب برساند [23]. انفجارهای مکرر باعث تولید سر و صدا و ارتعاشات شدید می‌شوند که نیاز به سیستم‌های جذب و کاهش نویز دارند [25]. انفجارهای مکرر باعث تولید صدای زیاد می‌شوند که می‌تواند مشکل‌ساز باشد [26].

دلایل: طبیعت انفجاری فرآیند که منجر به ایجاد شوک‌ها و ارتعاشات شدید می‌شود. نوسانات فشار در محفظه که می‌تواند تنش‌های مکانیکی زیادی ایجاد کنند.

راه‌حل‌های احتمالی: استفاده از مواد با استحکام بالا و قابلیت جذب شوک. طراحی‌های مهندسی برای کاهش تنش‌ها و ارتعاشات، مانند استفاده از میراگرهای ارتعاشی در این حوزه پیشنهاد می‌شود.

۵. مدل‌سازی و شبیه‌سازی

چالش: مدل‌سازی دقیق فرآیندهای انفجاری و شبیه‌سازی عملکرد موتور نیازمند محاسبات پیچیده و زمان‌بر است [26][25].

دلایل: فرآیندهای غیرخطی و پیچیده انفجار نیاز به در نظر گرفتن تاثیرات مختلف مانند حرارت، فشار، و واکنش‌های شیمیایی و سایر پارامترها می‌باشد.

راه‌حل‌های احتمالی: توسعه نرم‌افزارهای پیشرفته برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی دقیق فرآیندها و استفاده از رایانه‌های با توان محاسباتی بالا برای انجام شبیه‌سازی‌های پیچیده در این حوزه فناوری پیشنهاد می‌شود.

کارایی موتور شود [8]. پیچیدگی طراحی و نیاز به سیستم‌های خنک‌کننده پیشرفته می‌تواند از جمله چالش‌های این تکنولوژی باشد [9].

۳-۴- چالش‌های عملیاتی در موتورهای انفجار چرخشی

چالش‌های علمی و فناوری بسیاری در این حوزه فناوری وجود دارد که برخی از آنها به صورت زیر است:

۱. پایداری امواج انفجاری

چالش: حفظ پایداری امواج انفجاری چرخشی یکی از بزرگترین چالش‌هاست [23]. این امواج باید به طور مداوم در محفظه احتراق حرکت کنند و نباید قطع یا دچار نوسانات شدید شوند [24]. پایداری و کنترل دقیق موج‌های انفجار بسیار پیچیده است و نیاز به تحقیقات پیشرفته در زمینه دینامیک گازها و مواد دارد.

دلایل: تغییرات ناگهانی در ترکیب سوخت و اکسیدان و ناپایداری‌های حرارتی و مکانیکی در محفظه احتراق.

راه‌حل‌های احتمالی: طراحی محفظه‌های پیشرفته با هندسه دقیق و استفاده از سیستم‌های کنترلی هوشمند برای مانیتورینگ و تنظیم فرآیند انفجار لازم است.

۲. مدیریت حرارتی

چالش: دماهای بسیار بالا در محفظه احتراق می‌تواند منجر به آسیب دیدن مواد و کاهش کارایی موتور شود [25]. انتخاب و توسعه مواد مقاوم در برابر دما و فشار بسیار بالا از چالش‌های اصلی در ساخت موتورهای انفجار چرخشی است [23]. مواد سازنده باید توانایی تحمل دما و فشارهای بسیار بالا را داشته باشند.

دلایل: طبیعت انفجاری فرآیند که دماهای بسیار بالا تولید می‌کند. نیاز به حفظ ساختار محفظه در دماهای بالا برای جلوگیری از ذوب شدن یا خرابی سازه موتور می‌باشد.

راه‌حل‌های احتمالی: استفاده از مواد مقاوم به حرارت مانند سرامیک‌های پیشرفته و آلیاژهای خاص و طراحی سیستم‌های خنک‌کننده کارآمد که می‌توانند گرمای تولید شده را به سرعت از محفظه خارج کنند.

۲. طراحی سیستم‌های تزریق سوخت

۶. تجاری‌سازی و تولید انبوه

چالش: تولید انبوه و تجاری‌سازی موتورهای انفجار چرخشی نیازمند حل مسائل مختلف تولیدی و اقتصادی و ایمنی است [27].

دلایل: پیچیدگی و دقت بالای مورد نیاز در فرآیند تولید و هزینه‌های بالا برای توسعه و آزمایش موتورهای جدید یکی از مهمترین عدم پیشرفت این فناوری می‌باشد.

راه‌حل‌های احتمالی: توسعه فرآیندهای تولید بهینه و مقرون به صرفه و همکاری با صنایع مختلف برای به اشتراک گذاری هزینه‌ها و منابع به منظور توسعه و پیشرفت این فناوری لازم است.

۵-۳- انفجار در موتورهای انفجار چرخشی

انفجار^{۱۰} به زمانی اطلاق می‌شود که شعله در مخلوط مشتعل شده اکسید کننده سوخت چنان سریع حرکت کند که از سرعت صوت فراتر رود. به طور معمول، انبساط گازهای سوخته در پشت شعله باعث می‌شود که مخلوط سوخت-اکسیدکننده سوخته به سمت خارج حرکت کند [28]. اما پیشروی جبهه شعله در حین انفجار به قدری سریع است که زمانی برای خارج شدن مخلوط سوخته از سر راه وجود ندارد. [29] در عوض، فشار و دما به سمت بالا پرش می‌کنند (به شدت افزایش می‌یابند) در حالی که حجم به سرعت کاهش می‌یابد، از این فرایند به عنوان موج شوک انفجار یاد می‌شود [30].

سوزاندن مخلوط سوخت و اکسید کننده قبل از منبسط شدن منجر به احتراق سریع و کارآمد می‌شود، زیرا مخلوط سوخت و اکسید کننده متراکم‌تر می‌تواند به سرعت سوزانده شود [30] با این حال، موج انفجار معمولاً محصولات احتراق را به سمت خروجی (موشک) هدایت می‌کند و باید دوباره راه‌اندازی شود، اما از راه‌اندازی مجدد و مداوم موج انفجار مشتعل (پایداری انفجار-احتراق) در سیستم موتور انفجاری چرخشی با محدود کردن موج برای حرکت در اطراف یک محفظه استوانه‌ای با انتهای باز اجتناب می‌شود [31]. با حرکت دایره‌ای، موج به طور مداوم مخلوط سوخت و اکسید کننده را در حین وارد شدن به محفظه مشتعل می‌کند. موج انفجار به طور مکرر از طریق سوخت در

مسیر دایره‌ای خود برخورد می‌کند، احتراق سریع رخ می‌دهد و محصولات حاصل به سمت خروجی منبسط می‌شوند و برای تولید نیروی رانش از انتهای محفظه شتاب می‌گیرند [30] چنین سیستمی می‌تواند اندازه موتور (موشک) را به میزان قابل توجهی کاهش دهد [32]. با سوزاندن سریع و بدون نیاز به فشرده سازی سوخت در حال انبساط، محفظه احتراق در یک موتور انفجاری می‌تواند بسیار کوچکتر باشد. حتی ممکن است بتوان این محفظه را به طور کامل حذف و سیستم نشانه‌گذاری را در مخازن سوخت یا قسمت دیگری از ساختار موشک تعبیه کرد [33] [34].

احتراق انفجاری همچنین می‌تواند منجر به جهش‌های فشار و دما بسیار بزرگ‌تر شود که می‌تواند راندمان را در مقایسه با موتورهای موشکی معمولی افزایش دهد. [35]

۶-۳- ویژگی‌های منحصر به فرد در موتورهای انفجار چرخشی

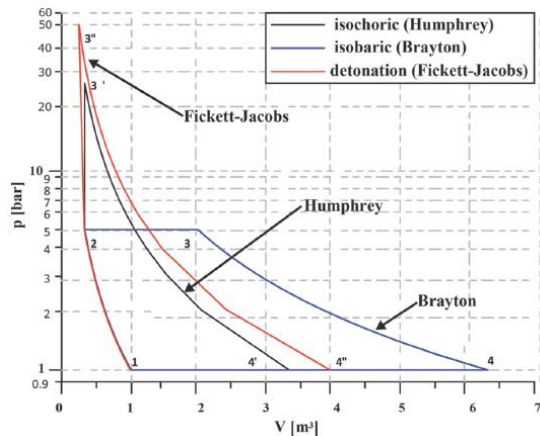
۱-۶-۳- انفجار^{۱۱} به جایی احتراق^{۱۲}

دتونیشن (انفجار) یک واکنش شیمیایی خود منتشر شونده است، که در طی آن مواد منفجره اعم از مواد جامد، مایع، مخلوط‌های گازی، در مدت زمان بسیار کوتاه در حد میکروثانیه. به محصولات گازی شکل داغ و پرفشار با دانسیته بالا و توانا برای انجام کار تبدیل می‌شود [12]. فرض بگیرید قطعه‌ای از مواد منفجره، منفجر شود. به نظر می‌رسد که همه آن در یک لحظه و بدون هیچ تاخیر زمانی نابود می‌شود. البته در واقع انفجار از یک نقطه آغازین شروع شده و از میان ماده بطرف انتهای آن حرکت می‌کند. این عمل بخاطر آن آنی بنظر می‌رسد که سرعت رخداد آن بسیار بالاست. از نظر تئوری انفجار ایده‌ال واکنشی است که در مدت زمان صفر (با سرعت بی‌نهایت) انجام شود. در این حالت انرژی ناشی از انفجار فوراً آزاد می‌شود. اصولاً زمان واکنش بسیار کوتاه، یکی از ویژگی‌های مواد منفجره است. هر چه این زمان کمتر باشد، انفجار قوی‌تر خواهد بود. از نظر فیزیکی امکان ندارد که زمان انفجار صفر باشد [2]. زیرا کلیه واکنش‌های شیمیایی برای کامل شدن به زمان نیاز دارند. پدیده انفجار با تقریبی عالی مستقل از شرایط خارجی است و با سرعتی که در شرایط پایدار

^{۱۰} Detonation یک موج احتراقی می‌تواند با سرعت‌های مافوق صوت منتشر شود. دتونیشن یک موج ضربه‌ای است که توسط انرژی آزاد شده از احتراق تقویت می‌شود.

^{۱۱} Detonation

^{۱۲} Deflagration



شکل ۳- تصویری از سیکل براتون و فرایند حجم ثابت در فرایند انفجار [20] چرخه انفجاری به عنوان یک جایگزین برای چرخه برایتون در توربین‌های گازی می‌تواند عملکرد بهتری در بازدهی حرارتی و کارایی سیستم‌های پیش‌رانشی ایجاد کند [20]. چرخه برایتون، که در توربین‌های گازی استاندارد استفاده می‌شود، مبتنی بر احتراق زیرصوت است. این نوع احتراق به نسبت بهینه‌سازی شده و برای دهه‌ها در سیستم‌های توربین‌های گازی مورد استفاده قرار گرفته است. اما چرخه انفجاری با استفاده از احتراق مافوق صوت یا موج‌های انفجاری، پتانسیل بهبودهای قابل توجهی در بازدهی و کارایی دارد [20].

تفاوت‌های کلیدی بین چرخه انفجاری و چرخه برایتون شامل موارد زیر است [20][21]:

■ نوع احتراق:

در چرخه برایتون، احتراق به صورت زیرصوت انجام می‌شود و از یک محفظه احتراق پیوسته استفاده می‌شود که در آن گازها به آرامی مشتعل شده و گسترش می‌یابند.

در چرخه انفجاری، احتراق به صورت مافوق صوت و با سرعت بسیار بالا در قالب یک موج انفجاری رخ می‌دهد. این موج انفجاری فشار و دمای گازها را به طور ناگهانی و با کارایی بالاتری افزایش می‌دهد.

■ افزایش بازدهی ترمودینامیکی:

چرخه برایتون از احتراق ایزوپرسور استفاده می‌کند، یعنی فشار ثابت در طول فرآیند احتراق حفظ می‌شود.

در چرخه انفجاری، احتراق ایزوترمال اتفاق نمی‌افتد. در عوض، انفجار با افزایش ناگهانی فشار و دما، گازها را به سرعت منبسط می‌کند که منجر به بازدهی حرارتی بالاتر می‌شود.

برای هر ترکیب، فشار و دمای ماده انفجاری اولیه ثابت است منتشر می‌شود [10][12]. ثابت بودن سرعت انفجار، یکی از خصوصیات فیزیکی مهم برای هر ماده منفجره می‌باشد. در اثر انفجار، فشار، دما و چگالی افزایش می‌یابند. این تغییرات در اثر تراکم محصولات انفجار حاصل می‌شوند [13]. در انفجار، عمل احتراق اتفاق افتاده و پس از ترکیب ماده آتش‌گیر با منبع گرما، شعله ایجاد می‌شود و شعله به وجود آمده سعی در سوزاندن مابقی گاز نسوخته کرده در نتیجه شعله در سطح ماده انتشار یافته، پیشروی کرده و به سمت محل نشت حرکت می‌کند، در احتراق سرعت سوختن ترکیب ماده با هوا از سرعت صوت کمتر می‌باشد [12]، در اثر حرکت شعله، موج فشار ایجاد می‌شود و هر چقدر قدرت احتراق بیشتر باشد موج فشار بیشتری تولید می‌شود. [13]

در انفجار به دلیل موج فشار بالا در اثر سرعت بالای حرکت شعله (بیشتر از سرعت صوت) تلفات بیشتری به بار می‌آید. موج فشار به وجود آمده در احتراق به عوامل زیادی مانند میزان متراکم بودن فضا، میزان تلاطم هوا و درجه آتش‌گیری ماده انتشار یافته بستگی دارد. انرژی بسیار بالایی جهت ایجاد انفجار نسبت به احتراق لازم می‌باشد [9][16].

۲-۶-۳- استفاده از چرخه انفجاری به جای چرخه برایتون در توربین‌های گازی [20][21]

توربین‌های گازی در مقیاس کوچک می‌توانند قدرت بالایی تولید کنند و همچنین تعمیر و نگهداری آنها نیز نسبتاً آسان می‌باشد. توربین‌های گازی امروزی عمدتاً بر پایه چرخه ترمودینامیکی برایتون کار می‌کنند که در این چرخه، هوای فشرده شده با سوخت ترکیب شده و در یک فشار ثابت عمل احتراق صورت می‌گیرد و انرژی مکانیکی لازم برای تولید نیروی محرکه و یا تولید الکتریسیته فراهم می‌شود [19]. به همین منظور برای کارآمدتر کردن چرخه تولید قدرت در توربین‌های گازی محققان بر روی چرخه‌های دیگر برای دست‌یابی به عملکرد بهتر کار می‌کنند که یکی از این چرخه‌های مورد مطالعه، چرخه انفجاری می‌باشد. اکثر توربین‌های گازی از چرخه برایتون پیروی می‌کنند: یک فرآیند ایزوباریک (فشار ثابت)، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است که در مقابل، یک انفجار تقریباً ایزوکوریک (حجم ثابت) است و ممکن است با چرخه هامفری یا ترجیحاً با چرخه فیکت-جیکوبز که انفجار را مدل می‌کند، مدل‌سازی شود [۲۰].

▪ فشار بالاتر و دمای بالاتر:

یکی از مزیت‌های اصلی چرخه انفجاری این است که می‌تواند فشار و دمای گازهای خروجی را به‌طور ناگهانی افزایش دهد، که به معنای تولید نیروی بیشتر در مراحل انبساط و استفاده در توربین است.

این افزایش ناگهانی فشار و دما در چرخه انفجاری می‌تواند بازدهی کلی توربین را افزایش دهد.

▪ کارایی بیشتر در وزن و سوخت:

موتورهای مبتنی بر چرخه انفجاری به دلیل سادگی ساختار و بهره‌وری بالاتر، می‌توانند وزن کمتری نسبت به سیستم‌های مبتنی بر چرخه برایتون داشته باشند. همچنین مصرف سوخت در این سیستم‌ها می‌تواند بهینه‌تر باشد.

مزایای چرخه انفجاری در مقایسه با چرخه برایتون شامل موارد زیر است [21][20]:

بازدهی بالاتر: چرخه انفجاری بازدهی بالاتری نسبت به چرخه برایتون دارد، چرا که از احتراق مافوق صوت استفاده می‌کند که باعث افزایش ناگهانی فشار و دما می‌شود.

کاهش مصرف سوخت: استفاده از موج‌های انفجاری به‌جای احتراق تدریجی می‌تواند منجر به کاهش مصرف سوخت شود، چرا که انرژی بیشتری از فرآیند احتراق استخراج می‌شود.

ساختار ساده‌تر: موتورهای مبتنی بر چرخه انفجاری می‌توانند ساختار ساده‌تری نسبت به موتورهای معمولی داشته باشند، چرا که احتراق مافوق صوت به تجهیزات کمتری برای تزریق سوخت و مدیریت احتراق نیاز دارد.

افزایش نیروی تراست: در کاربردهای هوایی و فضایی، موتورهای انفجاری می‌توانند نیروی تراست بیشتری تولید کنند که به افزایش عملکرد و کارایی کلی سیستم کمک می‌کند.

اگرچه چرخه انفجاری پتانسیل‌های زیادی دارد، اما چالش‌های متعددی برای استفاده عملی از آن وجود دارد:

پایداری احتراق: یکی از بزرگترین چالش‌ها در استفاده از چرخه انفجاری، پایداری احتراق و کنترل دقیق موج‌های انفجاری است. کنترل امواج انفجاری مداوم بدون ایجاد ناپایداری‌های مخرب دشوار است.

مدیریت حرارتی: انفجارهای مافوق صوت منجر به تولید دماهای بسیار بالا می‌شوند که نیاز به مواد مقاوم در برابر دما و سیستم‌های خنک‌کاری پیشرفته دارند.

تزریق سوخت: تامین سوخت در شرایطی که انفجارهای مافوق صوت رخ می‌دهند نیاز به تکنولوژی‌های پیشرفته برای تزریق سریع و دقیق سوخت دارد.

استفاده از چرخه انفجاری به‌جای چرخه برایتون در توربین‌های گازی می‌تواند منجر به بهبودهای چشمگیری در بازدهی، کاهش مصرف سوخت، و افزایش تراست شود [20]. با این حال، این فناوری هنوز در مراحل توسعه است و برای رسیدن به کاربردهای عملی و تجاری نیازمند رفع چالش‌های فنی متعددی است.

۴- مرور مقالات و بررسی پیشرفت‌های اخیر در حوزه

فناوری‌های مرتبط با موتور انفجار چرخشی

در جدول زیر فعالیت‌های صورت گرفته داخلی در حوزه فناوری‌های مرتبط با موتور انفجار چرخشی فهرست شده است.

جدول ۱- نمونه ای از فعالیت‌های تحقیقاتی داخلی در حوزه موتور

انفجار چرخشی

ردیف	عنوان فعالیت	نویسندگان	سال انتشار	محل انتشار	یافته‌ها
۱	تحلیل عددی مشخصه‌های دینامیکی موثر در دتونیشن ابر دیوفازی سوخت و هوا	کریم مظاهری، محمد مهدی دوستدار، سیدمصطفی حسینی پور	۱۳۸۴	نشریه استقلال	در این مقاله به مطالعه عددی مشخصه‌های دینامیکی ابر دو فاز سوخت و هوا در محیط باز اتمسفر به منظور بررسی دتونیشن پذیری آن پرداخته می‌شود. مشخصه‌هایی از ابر نظیر نسبت توازن، آشفستگی، شکل، حجم و یکنواختی ابر و نیز توزیع زمان تاخیر در اشتعال به عنوان عوامل مهم در شروع دتونیشن مورد مطالعه قرار داده می‌شوند.

<p>هدف این مقاله، معرفی موتورهای انفجار ضربه ای، نحوه عملکرد و مزایای آن و همچنین بررسی مباحث مهم در طراحی بهینه این دسته از موتورهاست.</p>	<p>مجله مهندسی مکانیک،</p>	<p>۱۳۹۳</p>	<p>محمدصادق حامدی، جابر نورالله زاده</p>	<p>موتورهای انفجار ضربه‌ای و بررسی مباحث مهم در طراحی بهینه</p>	<p>۵</p>	<p>در این تحقیق با استفاده از یک برنامه‌ی رایانه‌ای، میدان جریان و احتراق ناشی از مخلوط سوخت و هوا که سرعت چرخشی دارند از طریق حل معادلات جریان، انرژی و اجزا محاسبه شده‌اند. برای مدل سازی تنش‌های آشفتگی از فرضیه بوزینسک توسعه داده شده در جریان چرخشی استفاد شده است. نتایج نشان می‌دهند که وجود دو عامل چرخش و احتراق، هر دو باعث کوتاه‌تر شدن ناحیه بازگشتی جریان می‌شوند.</p>
<p>به منظور به کارگیری عملیاتی و طولانی مدت موتورهای پالس دتونیشن، باید دما در لوله های دتونیشن کنترل شود. در این مقاله ابتدا به بررسی فرایندهای مختلف یک سیکل از کارکرد موتور پرداخته و الگویی برای بارگذاری و شرایط مرزی حرارتی ارائه شده است. در ادامه مدلسازی عددی و تحلیلی مطابق فرضیات شرح داده شده ایجاد و پاسخ حرارتی لوله برای سیکل‌های پایایی به دست آمده است.</p>	<p>نشریه مکانیک سازه ها و شاره ها</p>	<p>۱۳۹۸</p>	<p>محمد جواد ترکمان اسدی، مجید میرزایی</p>	<p>بررسی پاسخ گذرای حرارتی لوله موتور پالس دتونیشن تحت کارکرد متوالی</p>	<p>۶</p>	<p>مهندسی مکانیک شریف (شریف ویژه مهندسی مکانیک)</p>
<p>در این مقاله ضمن معرفی احتراق دتونیشن چرخشی؛ این فرآیند نیز به صورت دو موجی شبیه‌سازی شده است. همچنین روشی ارائه می‌گردد که با در نظر گرفتن فیزیک مسئله، می‌توان هر تعداد موج را در محفظه احتراق شبیه‌سازی نمود. در این روش با در نظر گرفتن شرایط مرزی پرپودیک در امتداد انتشار موج در حالت دوبعدی، موج دتونیشن به صورت پیوسته و چرخشی درآمده و با تنظیم کد مناسب برای اعمال شرط مرزی در ورودی، تزریق به دامنه را مدیریت کرده است.</p>	<p>مکانیک سیالات و آیرودینامیک</p>	<p>۱۴۰۰</p>	<p>محمدمرتضی انبارلویی رضا ابراهیمی، امید حبیبی</p>	<p>ارائه یک روش کاربردی برای شبیه سازی عددی دوبعدی موتور دتونیشن چرخشی با بیش از یک موج چرخان</p>	<p>۷</p>	<p>کنفرانس بین المللی انجمن هوا فضای ایران</p>
<p>در این پژوهش مولد قدرت موج پالسی دتونیشن (انفجاری) طراحی و ساخته شده است. ابعاد لوله بکار رفته به طول ۱۵۰ سانتی متر و قطر ۲.۵ سانتی متر است. یکی از ویژگی‌های بسیار مهم در این دستگاه تولید فشار در حدود ۲۰ بار و سرعت ۲ تا ۳ کیلومتر در ثانیه است.</p>	<p>مهمسا خان محمدی، آزاده کبریانی، محمد فرشچی</p>	<p>۱۳۹۳</p>	<p>کنفرانس بین المللی انجمن هوا فضای ایران</p>	<p>۸</p>	<p>کنفرانس بین المللی انجمن هوا فضای ایران</p>	
<p>شبهه سازی عددی جریان داخلی و خارج انژکتورهای فشاری چرخشی</p>	<p>محمد مهدی علیناهایی، مسعود خواجه</p>	<p>۱۳۸۴</p>	<p>شبهه سازی عددی جریان چرخشی احتراقی درون محفظه احتراق</p>	<p>۹</p>	<p>شبهه سازی عددی جریان چرخشی احتراقی درون محفظه احتراق</p>	

پالایش مش تطبیقی^{۱۳} به صورت عددی حل شد. اثرات پارامترهای مختلف بر فرایند انعکاس با جزئیات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، نتایج نشان می‌دهد که نوع بازتاب یک انفجار سلولی پایدار شبیه به یک موج ضربه‌ای مسطح بر روی یک گوه مقعر است. زمانی که انفجار سلولی برای اولین بار با گوه مقعر برخورد می‌کند با شوک مسطح منتشر شده با همان عدد ماخ برخورد می‌کند. همانطور که زاویه موثر گوه به طور مداوم افزایش می‌یابد، بازتاب ماخ انفجار سلولی از یک شوک مسطح با ماخ کاهش یافته و منحرف می‌شود و انتقال از ماخ به انعکاس منظم در یک زاویه کوچکتر رخ می‌دهد.

ژای و همکاران [15] در سال ۲۰۲۳ در مقاله تحت عنوان بررسی عددی ویژگی‌های موج انفجاری چرخشی با ترکیبات چند جزئی را به منظور شناسایی اثرات اجزای گاز بر ویژگی‌های احتراق موج انفجاری چرخشی مورد بررسی قرار دادند. در این فعالیت تحقیقاتی آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی دو بعدی برای شبیه‌سازی فرآیند انتشار موج انفجاری چرخشی با تبدیل‌های مختلف گاز متان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که پنج حالت انتشار موج انفجاری چرخشی با مولفه‌های مختلف وجود دارد: حالت تک موج، حالت دو موج سه گانه و حالت موج مخالف، حالت دو موج، حالت موج جهت جلو در هر پنج حالت منتشر می‌شود. با افزایش تبدیل متان، حالت چند موجی در محفظه احتراق ظاهر می‌شود و مؤلفه سوخت تأثیر زیادی بر نسبت آزادسازی حرارت ناشی از انفجار دارد. سرعت موج انفجار با افزایش تبدیل متان کاهش می‌یابد. با افزایش تبدیل متان، سرعت واکنش شیمیایی به تدریج افزایش می‌یابد که منجر به تشدید واکنش شیمیایی در سطح آتش‌زدایی می‌شود.

پیشرفت دیگری در تحقیقات بهبود انتقال از انفجار به دتونیشن^{۱۴} است که منجر به درک بیشتر مصرف سوخت در محفظه شده است [۲۳-۲۵]. نمونه‌های اولیه موتورهای انفجار چرخشی برای اندازه‌گیری نیروی پیشران به عنوان مبنایی برای رفتار مدل‌های بزرگتر توسعه داده شده است، در این تحقیقات از نتایج داده‌های آزمایشی در توسعه و بهبود زیرسامانه‌ها کمک گرفته شده است [۲۶-۲۹].

مولد قدرت موج پالسی دتونیشن در تولید نیروی پیشران برای کاربردهای هوافضایی استفاده می‌گردد. در بررسی‌های انجام گرفته عملکرد موتور مورد ارزیابی قرار گرفت. در بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که با افزایش نسبت هم‌ارزی مخلوط سوخت و اکسیدکننده از ۰/۷ تا ۱/۶ فشار به طور تقریباً یکنواخت از ۱۷ تا ۲۱ بار افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت هم‌ارزی تا نسبت هم‌ارزی استوکیومتری دمای خروجی موتور افزایش و سپس به تدریج شروع به کاهش می‌کند.	نشریه علمی پژوهشی مهندسی هوانوردی	۱۴۰۳	سید داود موسویان، امیر مهدوی	طراحی، ساخت و آزمایش موتور پالس دتونیشن	۸
--	-----------------------------------	------	------------------------------	---	---

پیشرفت قابل توجهی در تحقیق و توسعه موتور انفجار چرخشی در سال‌های اخیر حاصل شده است [36] [37]. مطالعات تجربی و محاسباتی اثرات ترکیبات سوخت و اکسیدکننده [13] [14]، فشار سکون و فشارهای معکوس [16] [15]، هندسه‌های تزریق سوخت [17] [18]، هندسه کانال انفجار [19]، انحنای نازل‌های خروجی (اگزوز) در میدان جریان [20] و ارزیابی عملکرد موتورهای انفجار چرخشی‌ها [21] [22]، مطالعات تجربی بر روی دستیابی به فشارهای استاتیکی وابسته به میانگین زمان [23] [24] و رانش [25] متمرکز بوده است. مطالعات محاسباتی معمولاً معادلات اوپلر را در دو یا سه بعدی با واکنش‌های مدل‌سازی شده با استفاده از شیمی دقیق [26]، واکنش تک مرحله‌ای [27] یا یک سرعت محدود را بررسی کرده‌اند [28]. مدل‌های ترمودینامیکی مبتنی بر تئوری انفجار زلدویچ-فون نویمان-دورینگ برای تجزیه و تحلیل میدان جریان و عملکرد متناظر استفاده شده‌اند [29] [30].

یوان و همکاران [41] در سال ۲۰۱۹ شبیه‌سازی‌های عددی برای مطالعه بازتاب موج انفجار پایدار با الگوهای سلولی منظم بر روی یک گوه مقعر استوانه‌ای انجام دادند. دینامیک این پدیده انعکاسی توسط معادلات اوپلر واکنشی دو بعدی با یک مدل جنبشی واکنش القایی دو مرحله‌ای توصیف و با استفاده از کد

^{۱۳} Adaptive mesh refinement code AMROC.

^{۱۴} deflagration to detonation transitions (DDTs)

در برابر شرایط شدید موتور مقاومت کنند. این مواد باید سبک و همچنین دارای خواص حرارتی بالا باشند.

چالش‌ها: ساخت موادی که علاوه بر مقاومت حرارتی، دارای وزن کم و خواص مکانیکی مناسب برای کاربردهای هوافضایی باشند.

۴. سیستم‌های خنک‌کاری پیشرفته

هدف تحقیق: مدیریت حرارت در موتورهای انفجار چرخشی بسیار مهم است، زیرا انفجارهای مداوم و مافوق صوت باعث ایجاد حرارت شدید در موتور می‌شود.

تحقیقات جاری: توسعه سیستم‌های خنک‌کاری فعال و غیرفعال که بتوانند به صورت کارآمد حرارت ناشی از انفجارهای مافوق صوت را مدیریت کنند. استفاده از جریان‌های خنک‌کننده داخلی و طراحی‌های هوشمندانه برای توزیع حرارت از جمله مواردی است که در حال بررسی است.

چالش‌ها: طراحی سیستم‌های خنک‌کاری که بتوانند با حداقل وزن و مصرف انرژی، حرارت تولید شده را کاهش دهند بدون آنکه کارایی موتور را کاهش دهند.

۵. مدل‌سازی آکوستیکی و انتشار نویز

هدف تحقیق: موج‌های انفجاری چرخشی علاوه بر ایجاد حرارت زیاد، نویز آکوستیکی شدیدی نیز تولید می‌کنند که باید مدیریت شود.

تحقیقات جاری: تحقیقات آکوستیکی به منظور درک نحوه انتشار موج‌های انفجاری و طراحی سیستم‌های کاهش نویز. مدل‌سازی و شبیه‌سازی آکوستیکی به منظور پیش‌بینی رفتار نویز در محیط‌های مختلف.

چالش‌ها: طراحی مواد و سیستم‌های کاهش نویز که بتوانند بدون تأثیر بر عملکرد موتور، سطح نویز را کاهش دهند.

۶. استخراج انرژی از موج‌های انفجاری

هدف تحقیق: یکی از مهم‌ترین کاربردهای موتورهای انفجار چرخشی، استفاده از موج‌های انفجاری برای تولید نیروی پیش‌رانشی است. بهبود در استخراج انرژی از موج‌های انفجاری به بهبود کارایی کلی سیستم منجر خواهد شد.

تحقیقات جاری: طراحی سیستم‌های توربین و پره‌هایی که بتوانند انرژی موج‌های انفجاری را به انرژی مکانیکی تبدیل کنند. بهبود در طراحی پره‌ها و روش‌های استخراج انرژی مکانیکی از موج‌های انفجاری.

تحقیقات و توسعه در حوزه موتورهای انفجار چرخشی به منظور بهینه‌سازی عملکرد این موتورها و رسیدن به کاربردهای عملی و صنعتی گسترده در حال انجام است. این تحقیقات شامل حوزه‌های متعددی می‌شود که هر کدام از جنبه‌های مختلف موتورهای انفجار چرخشی را مورد بررسی قرار می‌دهند. در زیر به توضیحاتی درباره مهم‌ترین حوزه‌های تحقیقاتی و توسعه‌ای در این زمینه می‌پردازیم:

۱. پایداری موج‌های انفجاری

هدف تحقیق: یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در موتورهای انفجار چرخشی، پایداری و کنترل دقیق موج‌های انفجاری است. در این نوع موتورها، انفجار به صورت مداوم و چرخشی رخ می‌دهد که ممکن است منجر به ناپایداری‌های شدید شود.

تحقیقات جاری: مدل‌سازی‌های پیشرفته و شبیه‌سازی‌های عددی در تلاش هستند تا رفتار دقیق موج‌های انفجاری را تحلیل کنند و شرایط پایداری آن‌ها را مشخص سازند. تحقیقات به دنبال بهبود درک ما از دینامیک جریان‌ها و رفتار پیچیده گازها در جریان‌های مافوق صوت هستند.

چالش‌ها: مدیریت تغییرات ناگهانی فشار و دما، جلوگیری از شکست موج انفجار، و کنترل دقیق فرآیند به‌ویژه در تغییر بار موتور.

۲. تزریق سوخت و مدیریت احتراق

هدف تحقیق: یکی دیگر از جنبه‌های مهم موتورهای انفجار چرخشی، سیستم‌های تزریق سوخت است. تزریق دقیق و به‌موقع سوخت نقش مهمی در موفقیت و پایداری موج انفجار ایفا می‌کند.

تحقیقات جاری: تلاش‌ها برای توسعه فناوری‌هایی که بتوانند سوخت را به سرعت و با دقت بالا تزریق کنند. بهبود در نازل‌های تزریق سوخت و سیستم‌های کنترل فشار تزریق نیز از مهم‌ترین حوزه‌های تحقیقاتی است.

چالش‌ها: هماهنگی کامل میان تزریق سوخت و پایداری موج‌های انفجاری. همچنین چگونگی حفظ دمای بالا و جلوگیری از خرابی اجزا در اثر حرارت زیاد.

۳. مواد مقاوم در برابر حرارت

هدف تحقیق: دماهای بسیار بالا در اثر موج‌های انفجاری باعث می‌شوند که نیاز به مواد جدید و پیشرفته برای مقاومت در برابر این دماها و فشارها وجود داشته باشد.

تحقیقات جاری: تحقیقات برای توسعه و استفاده از مواد پیشرفته مانند سرامیک‌ها و آلیاژهای مقاوم به دما، که می‌توانند

۱-۵- TRL فناوری‌های مرتبط با موتورهای انفجار چرخشی

جدول زیر نشان‌دهنده سطح بلوغ فناوری مربوط به فناوری‌های مختلف مرتبط با موتورهای انفجار چرخشی است. هر یک از این فناوری‌ها به صورت مستقل مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا سطح بلوغ فعلی آن‌ها (از TRL ۱ تا ۹) مشخص شود.

جدول ۲- سطح بلوغ فناوری (TRL) در حوزه فناوری‌های مرتبط با موتورهای انفجار چرخشی

فناوری	توضیحات	TRL فعلی	توضیحات TRL
موج‌های انفجاری چرخشی	توسعه مفاهیم پایداری و شبیه‌سازی‌های عددی جهت تحلیل موج‌های انفجاری در محیط‌های چرخشی	TRL 3 - 4	تحقیقات مفهومی انجام شده و برخی شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی اثبات مفهومی را نشان داده‌اند، اما هنوز در محیط عملیاتی آزمایش نشده‌اند.
سیستم‌های تزریق سوخت برای انفجار چرخشی	طراحی و توسعه سیستم‌های تزریق سوخت که بتوانند با سرعت بالا و دقیق در محفظه انفجاری چرخشی کار کنند	TRL 4 - 5	نمونه‌های اولیه مدل‌های شبیه‌سازی شده در مقیاس کوچک توسعه یافته‌اند، اما هنوز به مرحله آزمایش در مقیاس صنعتی نرسیده‌اند.
کنترل پایداری انفجار	فناوری‌های مرتبط با پایداری موج انفجار در RDE و جلوگیری از ناپایداری‌های مخرب	TRL 3	در این مرحله مطالعات اولیه و شبیه‌سازی‌ها انجام شده‌اند، اما هنوز چالش‌های زیادی برای پیاده‌سازی در محیط‌های عملیاتی وجود دارد.
مواد مقاوم به حرارت	توسعه مواد جدید برای مقاومت در برابر دماهای بالا و فشارهای ناشی از موج انفجاری	TRL 5	برخی مواد پیشرفته با مقاومت بالا در محیط‌های شبیه‌سازی شده و آزمایش‌های عملکرد آزمایشگاهی عملکرد خوبی داشته‌اند.
سیستم‌های خنک‌کاری	توسعه فناوری‌های خنک‌کاری پیشرفته برای مدیریت حرارت زیاد ناشی از انفجار	TRL 4 - 5	مدل‌های اولیه خنک‌کاری در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما برای محیط‌های

چالش‌ها: طراحی سیستم‌های مقاوم در برابر شرایط شدید فشار و دما، به طوری که بهره‌وری بالایی در استخراج انرژی داشته باشند.

۷. کاربردهای موتورهای انفجار چرخشی در صنایع هوافضا و دفاعی

هدف تحقیق: موتورهای انفجار چرخشی پتانسیل استفاده در طیف وسیعی از صنایع، به ویژه صنایع هوافضا و دفاعی را دارند. به دلیل تراست بالاتر و بازدهی بیشتر نسبت به سیستم‌های احتراق معمولی، این موتورها می‌توانند به عنوان پیشران‌های موشک‌ها و فضاپیماها مورد استفاده قرار گیرند.

تحقیقات جاری: آزمایش‌های عملی در مقیاس‌های کوچک بر روی نمونه‌های اولیه موتورهای انفجار چرخشی در کاربردهای هوافضایی. همچنین تلاش برای بهینه‌سازی سیستم‌ها برای کاربردهای تجاری و نظامی.

چالش‌ها: نیاز به آزمایش‌های واقعی در محیط‌های عملیاتی و اصلاحات لازم برای رسیدن به سطح عملیاتی کامل (TRL ۸ - ۹).

۸. بهینه‌سازی طراحی و معماری موتور

هدف تحقیق: یکی از حوزه‌های مهم در توسعه موتورهای انفجار چرخشی، بهینه‌سازی طراحی و معماری موتور است که بتواند عملکرد بهتری در شرایط عملیاتی داشته باشد.

تحقیقات جاری: مدل‌سازی‌های پیشرفته و شبیه‌سازی‌های CAD برای بهبود طراحی موتور و اجزای داخلی آن. تلاش‌ها برای به حداقل رساندن وزن و افزایش مقاومت و کارایی.

چالش‌ها: طراحی موتوری که هم سبک و مقاوم باشد و هم بتواند به طور پایدار و مؤثر در شرایط عملیاتی مختلف کار کند.

۵- سطح آمادگی فناوری در موتورهای انفجار چرخشی

سطح آمادگی فناوری^{۱۵} معیاری است که برای ارزیابی مراحل مختلف توسعه فناوری از ایده اولیه تا ورود به بازار استفاده می‌شود. در این قسمت، سطح آمادگی فناوری فناوری‌های مرتبط با موتورهای انفجار چرخشی ارائه می‌شود. این ارزیابی نشان می‌دهد که هر فناوری در چه مرحله‌ای از توسعه قرار دارد.

^{۱۵} Technology Readiness Level

ناسا را نمایش می‌دهد. این واکنش ترکیبی و موج شوک ایجاد شده گرما و فشار بسیار زیادی را ایجاد خواهد کرد [33]. در صورت پایداری این موتور ناسا می‌تواند بازدهی بسیار زیادی با نیروی تراست بالا تولید نماید. آزمایش جدید این احتراق به دلیل داشتن قدرت و زمان مناسب می‌تواند در آینده برای فرود سفینه ماه نشین یا احتراق در خلأ در ماموریت‌های ماه یا مریخ مورد استفاده قرار گیرد. این تکنولوژی به زمان زیادی برای استفاده به صورت واقعی نیاز خواهد داشت. همچنین آزمایش‌های احتراق باید در مقیاس موتورهای بزرگ‌تر انجام شده و نیروهای مختلفی را در دست‌بندی‌های گوناگون در بر گیرد [33].



شکل ۴- تصویری از آزمایش گرم موتور انفجار چرخشی در مرکز فضایی مارشال ناسا [39]

۶-۲- جنرال دینامیکس

بخش هوافضای جنرال الکتریک آزمایش موتور مافوق صوت را با موفقیت انجام داده است و ادعا می‌کند سرعت ۴۰۰۰ مایل (۶۴۳۶ کیلومتر) در ساعت قابل دستیابی است، این موتور نوآورانه پتانسیل بکارگیری در سلاح‌ها و وسایل نقلیه مافوق صوت را دارد. جنرال الکتریک و سایر شرکت‌ها مانند ریتون که روی این موتور کار می‌کنند، معتقدند که می‌توان پرواز سریع‌تر و دوربرد را با افزایش کارایی در پیش‌رانه‌های مافوق صوت انجام داد (سریعتر، دوربردتر و کارآمدتر). این آزمایش در یک جریان مافوق صوت در مرکز تحقیقات جهانی در نیسکایونا، نیویورک انجام شد و این موتور قابلیت دستیابی به سرعت‌های بیش از ۵ ماخ (۴۰۰۰ مایل در ساعت) امکان کارایی بیشتر و برد طولانی‌تر را فراهم می‌کند. یک موتور انفجاری چرخشی شبیه موتور انفجار پالس است، مانند موتور معروفی که در بمب‌های پرنده آلمانی Doodlebug-v1 از جنگ جهانی دوم استفاده شده است و پس از هر انفجار پالسی، در یک موتور انفجاری چرخشی، امواج در اطراف محفظه احتراق می‌چرخند و این فرآیند را خودپایدار می‌کند. حل این مشکل مهندسی تا حد زیادی بر عهده

عملیاتی واقعی نیاز به بهبود دارند.	مافوق صوت	
شبیه‌سازی‌های پیشرفته و مدل‌سازی‌های آکوستیکی برای تحلیل انتشار موج‌های انفجاری به نتایج خوبی در محیط‌های شبیه‌سازی شده رسیده‌اند.	شبیه‌سازی دینامیک انفجارهای چرخشی و مدل‌سازی آکوستیکی آن‌ها جهت پیش‌بینی عملکرد	TRL 6
تحقیقات در این زمینه هنوز در مرحله مفهومی و آزمایشگاهی است و سیستم‌های عملیاتی توسعه نیافته‌اند.	طراحی توربین‌ها یا پره‌هایی که بتوانند انرژی موج‌های انفجاری را به حرکت مکانیکی تبدیل کنند	TRL 3 - 4
برخی نمونه‌های اولیه در محیط‌های آزمایشگاهی و شرایط شبیه‌سازی شده آزمایش شده، اما هنوز به مرحله آزمایش عملیاتی کامل نرسیده‌اند.	استفاده از RDE به عنوان موتورهای پیش‌رانشی برای کاربردهای هوایی و فضایی	TRL 5 - 6
سیستم‌های اولیه در محیط‌های کنترل شده توسعه یافته‌اند اما نیاز به بهبود و آزمایش‌های بیشتر دارند.	توسعه سیستم‌هایی برای مدیریت ارتعاشات و نویز ناشی از انفجارهای مداوم در موتور	TRL 4

۶- سابقه‌ی از فعالیت‌های سازمانی و مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی در حوزه موتورهای انفجار چرخشی

۶-۱- ناسا

ناسا موفق شد در رکورد جدیدی، تکنولوژی موتور انفجار چرخشی را در مرکز پرواز فضایی مارشال یک گام به جلو ببرد. در این مرکز محققان موفق به تولید موتور راکت انفجار چرخشی از طریق چاپگرهای سه بعدی شده و آن را برای ۲۵۱ ثانیه با امکان تولید نیروی ۲۶۳۱ کیلوگرم روشن نگه دارند. ناسا قصد دارد با تولید موتورهای جدید طراحی موتور راکت‌ها را تغییر داده و در آن به جای یک محفظه احتراق، از سوخت و اکسیژن در یک موتور و یک شکاف بین دو استوانه به صورت هم محور استفاده کند [32]، شکل ۴ تصویری از موتور ساخته شده توسط

کارآمد می‌تواند بطور قابل توجهی هزینه‌ها را کاهش دهد. توربین‌های گازی در مقیاس کوچک می‌توانند قدرت بالایی تولید کنند و همچنین تعمیر و نگهداری آن‌ها نیز نسبتاً آسان می‌باشد. توربین‌های گازی امروزی عمدتاً بر پایه چرخه ترمودینامیکی برایتون کار می‌کنند که در این چرخه، هوای فشرده شده با سوخت ترکیب شده و در یک فشار ثابت عمل احتراق صورت می‌گیرد و انرژی مکانیکی لازم برای تولید نیروی محرکه و یا تولید الکتریسیته فراهم می‌شود. به همین منظور برای کارآمدتر کردن چرخه تولید قدرت در توربین‌های گازی محققان بر روی چرخه‌های دیگر برای دستیابی به عملکرد بهتر کار می‌کنند که یکی از این چرخه‌های مورد مطالعه، چرخه انفجاری می‌باشد. آزمایشگاه تحقیقات نیروی دریایی از دهه گذشته بر روی این پروژه در حال مطالعه بوده و موتورهای انفجاری پالسی را ارائه داده است. موتورهای انفجاری چرخشی می‌توانند در چرخه انفجاری، راندمان سوخت بهتری داشته باشند. موتورهای انفجاری چرخشی در واقع ترکیب موتورهای انفجاری ضربه‌ای با توربین‌های گازی می‌باشد که یک از این طریق هوای کنارگذر موتور وارد لوله‌های انفجار شده و با احتراق، تولید نیروی پیشران می‌کند. ترکیب موتور انفجاری با توربین گازی علاوه بر کاهش مصرف سوخت بدلیل تولید نیروی پیشران بیشتر، این امکان را به هواپیما می‌دهد که بتواند با سرعت‌های بالاتری نیز پرواز کنند. محققان آزمایشگاه تحقیقات نیروی دریایی ارتش آمریکا در حال مطالعه بر روی موتورهای انفجاری چرخشی تا بتوانند راه‌هایی برای کاهش مصرف سوخت در توربین‌های گازی ارائه دهند [34]. مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد با جایگزینی چرخه انفجاری به جای چرخه برایتون در توربین گازی می‌توان بطور قابل توجهی مصرف سوخت را کاهش داد [35] سیستم موتورهای انفجاری ضربه‌ای ساده‌تر از توربین‌های گازی بوده و در آن موج انفجار جایگزین شعله در محفظه احتراق می‌شود. همچنین تعداد قطعات مکانیکی در این موتورهای کمتر می‌باشد، چرا که فشار متراکم شده در قسمت ورودی موتور، نیاز به کمپرسور، توربین و سایر اجزای سنگین را از بین می‌برد و در طراحی آن‌ها نیاز به ماشین‌آلات متحرک نمی‌باشد و تنها قطعات و اجزای بهم پیوسته با وزن کم مورد نیاز است [36]. همچنین دانشکده تحصیلات تکمیلی نیروی دریایی بر روی پارامترهای موثر و تاثیرگذار بر عملکرد موتور انفجار چرخشی هواتنفسی مطالعاتی را انجام داده است. این مطالعات شامل

سازندگان هواپیما مانند لاکهید، نورثروپ یا بوئینگ خواهد بود و آن‌ها برای ابداع راه‌هایی برای ادغام دو سیستم محرکه کاملاً متفاوت با الزامات منحصر به فرد ورودی هوا به چالش کشیده خواهند شد.

۳-۶- مرکز تحقیقات ملی و دانشگاه پواتیه کشور فرانسه

در فرانسه، مرکز تحقیقات ملی^{۱۶} و دانشگاه پواتیه^{۱۷} بر روی اندازه‌های مختلف استوانه‌های هم مرکز و بررسی بیشترین کارایی آن‌ها و بهینه سازی عملکرد انژکتور در موتورهای انفجار چرخشی مطالعاتی را انجام داده‌اند. آن‌ها با مشارکت شرکت MBDA در حال پیاده سازی آزمایشات زمینی در مقیاس کامل بر روی یک نوع موتور انفجار چرخشی با رویکرد نظامی می‌باشند [40].

۴-۶- آزمایشگاه تحقیقات نیروی هوایی ارتش آمریکا

آزمایشگاه تحقیقات نیروی هوایی ایالات متحده یک موتور انفجار چرخشی هوا تنفسی که بدنه خارجی آن با استفاده از کامپوزیت‌های سرامیکی پوشانده شده را توسعه دادند. همچنین آن‌ها در یک آزمایش مجزا عملکرد یکپارچه یک موتور انفجار چرخشی را با یک توربین گاز T63 مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که نیتروژن با اکسید کم و راندمان احتراق بسیار مطلوبی دارد و این نویدی برای آینده این فناوری است [41].

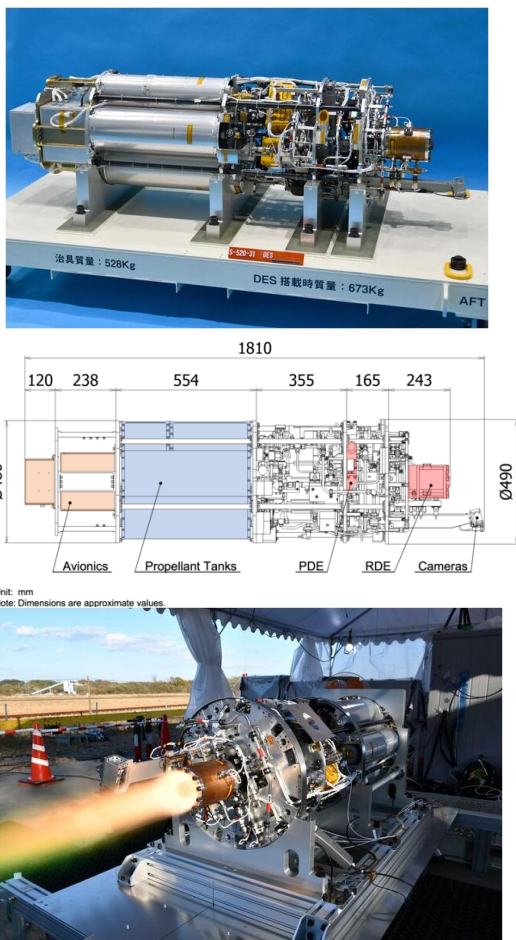
۵-۶- آزمایشگاه تحقیقات نیروی دریایی ارتش آمریکا

بسیاری از هواپیماها از موتورهای توربینی در سیستم پیشران خود استفاده می‌کنند، همچنین از این موتورها در شناورها و ناوهای نیروی دریایی نیز استفاده می‌شود که همانند موتور هواپیماهای تجاری می‌باشند. نیروی دریایی ایالات متحده برای تامین نیروی پیشران سامانه‌های خود به توربین‌های گازی وابسته بوده و از طرفی مطالعاتی بر روی سامانه‌های تمام الکتریکی نیز دارد که این سامانه‌ها نیز برای تامین نیروی و سایر سامانه‌های حساس و مهم به توربین‌های گازی نیاز خواهند داشت. به همین دلیل ساخت توربین‌های گازی اقتصادی و

^{۱۶} national research center CNRS

^{۱۷} University of Poitiers

اگر چه موتور انفجار چرخشی در مراحل اولیه توسعه است، ولی آزمایش موفقیت آمیز آن در فضا ثابت می‌کند که چنین موتورهایی می‌توانند این امکان را بدهند که با استفاده از سوخت و وزن کمتر به کاوش میان‌سیاره‌ای برسیم که بسیار مهم خواهد بود [41]. محققان ژاپنی امیدوارند که بتوانند این فناوری را در پنج سال آینده به طور عملی مورد استفاده قرار دهد [42]. شکل ۶ تصویری و شماتیکی از این موتور انفجار چرخشی را نشان می‌دهد.



شکل ۶- شماتیکی از آزمایش گرم سیستم موتور انفجاری چرخشی در سایت شیراوی^{۱۹} موسسه فناوری موروران^{۲۰} (دانشگاه ناگویا) [47] [49] [39] [1]

۶-۷- شرکت ان‌پی‌او انرگوماش - روسیه

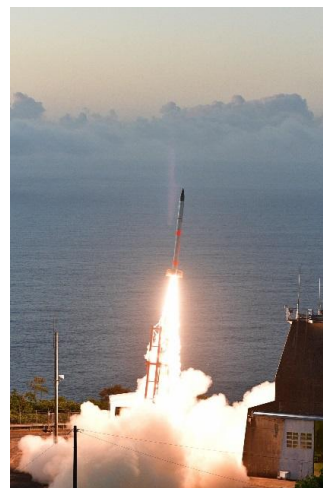
شرکت ان‌پی‌او انرگوماش^{۲۱} یک تولید کننده بزرگ موتور موشک روسی است. این شرکت از دفتر طراحی OKB-456 که در سال ۱۹۴۶ در جماهیر شوروی تاسیس شد منشعب شده است،

آزمایش‌های گرم، تصویربرداری از منطقه انفجار در محفظه احتراق، شناسایی صوت و نورهای حاصل از انفجار و تلاش‌های محاسباتی به منظور شناسایی بیشتر تحولات در حین انفجار در یک موتور انفجاری چرخشی بوده است [9].

۶-۶- آژانس اکتشافات هوافضای ژاپن (JAXA)

آژانس اکتشافات هوافضای ژاپن^{۱۸} برای نخستین بار موتور انفجار چرخشی را در فضا با این هدف که در آینده این روش را در سفرهای عمیق فضایی گسترش دهد، آزمایش کرده است. این موتور از انفجارهای چرخشی درون یک کانال حلقوی استفاده می‌کند [37]. این روش مقدار زیادی رانش فوق کارآمد را در یک موتور بسیار کوچک تولید می‌کند که از سوخت کمتری نیز استفاده می‌کند و این پتانسیل را دارد که روند سفرها و کاوش‌های فضایی را تغییر دهد [37] [39].

این فناوری جدید بر روی موشک S-520-31 (راکت‌های کاوش) نصب شد که یک موشک تک مرحله‌ای است و قادر به حمل بار ۱۰۰ کیلوگرمی تا ارتفاع بیش از ۳۰۰ کیلومتر است که از مرکز فضایی اوچینورا به فضا پرتاب شد و این موتور را با موفقیت آزمایش کرده است [40]، شکل ۵ تصویری از این راکت را نشان می‌دهد. مرحله اول این موشک پس از جدا شدن، آزمایشات خود را آغاز کرد و موتور انفجار چرخشی را به مدت شش ثانیه روشن کرد [39]. هنگامی که موشک پس از انجام این آزمایش از اقیانوس خارج و بازیابی شد، مشخص شد که موتور انفجار چرخشی حدود ۵۰۰ نیوتن رانش تولید کرده است.



شکل ۵- شماتیکی از راکت کاوش موشک S-520-31 [41]

^{۱۹} Shiraoi

^{۲۰} Muroran

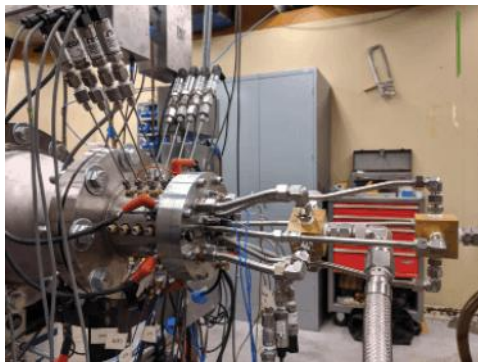
^{۲۱} NPO Energomash

^{۱۸} Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

پالس جت نوعی موتور جت هوادمشی است که در آن هوا به‌طور متناوب و ضربان‌گونه وارد محفظه احتراق می‌شود و پس از درآمیختن با سوخت مشتعل می‌شود. اکنون موتور انفجاری چرخشی این ایده را یک قدم جلوتر برده است.

یک موتور انفجاری چرخشی روش دیگری را برای چگونگی احتراق در پیش می‌گیرد. این موتور از استوانه‌های متحد‌المرکز ساخته شده است. سوخت در شکاف بین استوانه‌ها جریان می‌یابد و پس از احتراق، انتشار سریع گرما موج شوک را ایجاد می‌کند و یک ضربه قوی از گاز با فشار و درجه حرارت قابل توجهی که سرعت بیشتری نسبت به سرعت صوت دارد، موج را به حرکت در می‌آورد [36][35].

نکته جالب این است که انفجارهایی که موج شوک را تشکیل می‌دهند و حفظ می‌کنند، بسیار پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی هستند. به همین منظور برای درک بهتر آنچه در جریان است، محققان دانشگاه واشنگتن یک موتور انفجار چرخشی آزمایشی ساختند تا نحوه عملکرد آن و نقش پارامترهای مختلف را در یکسری آزمایشات که توسط یک دوربین پرسرعت با سرعت ۲۴۰ هزار فریم در ثانیه ضبط می‌کند، بررسی کنند. [36] داده‌های این بررسی به محققان کمک می‌کند تا یک مدل ریاضی را برای تعیین اینکه آیا موتور از نظر مکانیزم انفجار و یا احتراق پایدار است، را بررسی کنند [35]. شکل ۷ تصویری از موتور انفجاری چرخشی آزمایشی که توسط دانشگاه واشنگتن توسعه داده شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷- شماتیکی از پیشران انفجار چرخشی مورد مطالعه در دانشگاه واشنگتن [37]

۶-۱۰- سایر دانشگاه‌های کشور چین

در چین، چندین دانشگاه در حال مطالعه و تحقیق بر روی برای توسعه فناوری موتور انفجار چرخشی هستند. دانشگاه پکن^{۲۵} بر

فعالیت اصلی شرکت ان‌پی‌او انرگوماش طراحی، توسعه و ساخت موشک با پیشران سوخت مایع است. این شرکت به دلیل سابقه طولانی در توسعه موتورهای اکسیژن مایع و نفت سفید در مقیاس بزرگ مطرح است و در توسعه پروژه‌های از قبیل انرژیا^{۲۲}، زینیت و اطلس ۵ و توسعه موتورهای فضایی از قبیل RD-170, RD-171 180 مشارکت موثر داشته است. این شرکت یک موتور موشک با سوخت اکسیژن مایع و نفت سفید را با موتور انفجار چرخشی برای مدت طولانی آزمایش کرده است [30].

۸-۶- انستیتوی فیزیک شیمیایی سمونوف و انستیتوی مکانیک نظری و کاربردی روسیه

انستیتوی فیزیک شیمیایی سمونوف^{۲۳} و انستیتوی مکانیک نظری و کاربردی روسیه با موفقیت یک موتور انفجار چرخشی و یک موتور انفجار پالسی را در تونل باد در محدوده سرعت ۴-۸ ماخ آزمایش کردند. این آزمایش بر روی یک موتور اسکرام جت (طول ۱,۰۵ متر و قطر ۰,۳۱ متر) با سوخت هیدروژن انجام شده است. در این آزمایش موتور ضربه ویژه^{۲۴} به اندازه ۳۶۰۰ ثانیه را ثبت کرده است. [35]

۹-۶- دانشگاه واشنگتن

محققان دانشگاه واشنگتن در حال کار بر روی نوع جدیدی از موتور موشک هستند که وعده ساخت موتورهای سبکتر، کارآمدتر و ساده‌تر را نسبت به موشک‌های رایج سوخت مایع کنونی می‌دهد. یکی از بزرگترین موانع عملی کردن این موتور ایجاد مدل‌های ریاضی است، که بتواند چگونگی طراحی بسیار غیرقابل پیش‌بینی موتور موشک را توصیف کند. موتور انفجاری چرخشی یک موتور شبیه به موتورهای پالس جت است که موشک کروزر آلمانی موسوم به V1 در جنگ جهانی دوم از آن بهره می‌برد. این موشک از یک محفظه احتراق ساده با لوله‌های آگزوز در انتها و میله‌های ارتجاعی نصب شده در قسمت جلویی استفاده می‌کرد. در حین کار، هوا از طریق شکاف‌ها وارد با سوخت مخلوط و پس از آن منفجر و تراست تولید می‌کند.

^{۲۲} engines

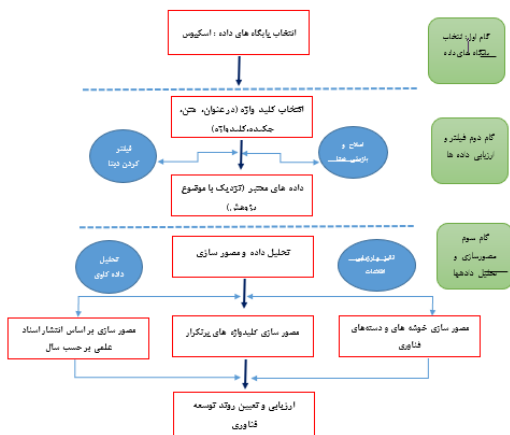
^{۲۳} Semenov Institute of Chemical Physics

^{۲۴} Specific Impulse

^{۲۵} Peking University

می‌رسد. علم‌سنجی یکی از متداول‌ترین روش‌های ارزیابی فعالیت‌های علمی و مدیریت پژوهش است. بررسی کمی تولیدات علمی، سیاست‌گذاری علمی، ارتباطات علمی دانش پژوهان و ترسیم نقشه علم، برخی از موضوعات این حوزه‌اند در علم‌سنجی، ارتباطات علمی و شیوه‌های تولید، اشاعه و بهره‌گیری از اطلاعات علمی به روش غیرمستقیم و با بررسی منابع و مآخذ آن‌ها ارزیابی می‌شود.

هدف اصلی از قسمت ارایه الگو علم‌سنجی جهت دستیابی سریع‌تر و کم هزینه‌تر به فناوری‌های موثر و درگیر در حوزه فناوری موتور انفجار چرخشی می‌باشد. شکل ۸ روند اجرایی این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۸- روند اجرایی پژوهش حاضر

جدول فهرستی از آخرین مقالات چاپ شده در این حوزه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- فهرستی از آخرین اسناد علمی منتشر شده در حوزه موتورهای

انفجار چرخشی

ردیف	عنوان مقاله	نام نویسندگان	سال انتشار	محل چاپ یا عنوان مجله	شاخص
۱	low mass-flow operation of small-scale rotating detonation engine	keller, pk; polanka, md; sell, bc	2024	applied thermal engineering	6.4
۲	simulation of liquid droplets combustion in a rotating detonation engine	salvadori, m; panchal, a and menon, s	2023	proceedings of the combustion institute	3.4
۳	experimental research on solid fuel pre-combustion rotating detonation engine	wu, wb; wang, yn; wang, jp	2023	acta astronautica	3.5
۴	operation characteristics of a disk-type rotating detonation engine	ishii, k; ohno, k; tsuboi, n	2023	shock waves	2.2
۵	effects of injector configuration on the detonation characteristics and propulsion performance of rotating detonation engine (rde)	koo, ih; lee, kh; choi, jy	2023	aerospace	2.6

روی زمان تأخیر در احتراق و پدیده پایداری احتراق ناشی از انفجار در حال مطالعه است. دانشگاه ملی و تکنولوژی دفاعی^{۲۶} آزمایش‌های بر روی یک نمونه از موتورهای انفجار چرخشی هواتنفسی انجام داده و محدودیت و الزامات عملکردی آن را استخراج نموده است. انستیتوی فناوری نانچینگ^{۲۷} در یک نمونه از موتورهای انفجار چرخشی بر پایه بنزین-اکسیژن را طراحی و ساخته است. دانشگاه تسینشونا^{۲۸} تحقیقات تجربی گسترده‌ای در حوزه ناپایداری در موتورهای انفجار چرخشی انجام داده است [1].

۱۱-۶- دانشگاه فناوری ورشو

دانشگاه فناوری ورشو در حوزه احتراق و انفجار ناشی از گاز متان و اکسیژن در یک موتور انفجار چرخشی با قطر درونی ۱۵۰ میلی‌متر و قطر بیرونی ۲۰۰ میلی‌متر در حال مطالعه است. این دانشگاه اولین کارگاه بین‌المللی حجم ثابت و احتراق انفجاری^{۲۹} را در سال ۲۰۱۷ برگزار کرده است [1].

۷- مطالعات علم‌سنجی در حوزه موتورهای انفجاری

چرخشی

بر اساس تعریف‌های بسیاری که از علم‌سنجی^{۳۰} مطرح شده است علم‌سنجی را می‌توان تجزیه و تحلیل کمی و تا حد امکان کیفی فرایند تولید، توزیع و استفاده از اطلاعات علمی و عوامل مؤثر بر آن و توصیف، تبیین و پیش‌بینی این فرآیند به منظور برنامه‌ریزی، سیاست‌گذاری، اعتلاء و آگاهی و آینده‌نگری علمی و پژوهشی در ابعاد فردی، گروهی، سازمانی و بین‌المللی دانست وجود واژه سنجشی در پایان حوزه‌های سنجشی نظیر علم‌سنجی از آن حاکی است که سنجش، بخشی از کارهای این حوزه را تشکیل می‌دهد، سنجش تنها بخش محدودی از فعالیت‌های علم سنجی را تشکیل می‌دهد در واقع این حوزه رسیدن به ارزیابی را دنبال می‌کند. امروزه تولید علم، اولویت توسعه هر کشور است و توسعه علمی مقدمه توسعه فناوری و به تبع آن افزایش رونق اقتصادی و رفاه اجتماعی است. به همین لحاظ دانشگاه‌ها به عنوان پایگاه‌های اصلی تولید علم، نقش اساسی در توسعه کشور دارند جهت بالا بردن سطح کیفی و کمی تولیدات علمی، ارزشیابی نظام پژوهشی در هر دانشگاه امری ضروری به نظر

^{۲۶} National University of Defense Technology

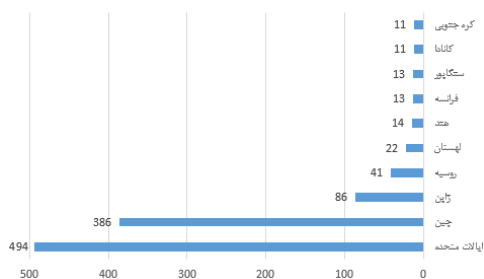
^{۲۷} Nanjing Institute of Technology

^{۲۸} Tsinghua University

^{۲۹} International Constant Volume and Detonation Combustion

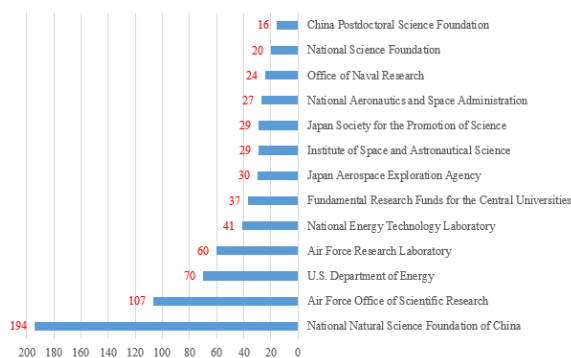
^{۳۰} Scientometrics

حال گسترش است و کشورهای مختلف به ویژه ایالات متحده و چین در این حوزه پیشرو هستند. نوآوری‌ها و همکاری‌های گسترده بین موسسات تحقیقاتی و دانشگاه‌ها نقش مهمی در پیشبرد این فناوری دارند. موتورهای انفجار چرخشی به عنوان یک نوآوری در فناوری پیشران‌ها، پتانسیل بالایی برای بهبود بازدهی سوخت و تولید نیروی پیشران بیشتر دارد.



شکل ۱۰- شماتیکی از انتشار اسناد علمی بر حسب کشور

شکل ۱۱ فهرست مهمترین مراکز حامی در حوزه پیشران‌های انفجاری چرخشی را نشان می‌دهد. این مراکز حمایت‌های از قبیل بورسیه تحصیلی (بورسیه تحصیلی عادی، جایزه، وام تحصیلی و کم هزینه، حذف شهریه و تحصیل رایگان)، فعالیت‌های مشترک، و توسعه زیرساخت آزمایشگاهی را در دستور کار دارند.



شکل ۱۱- شماتیکی از حامیان اصلی در حوزه پیشران‌های انفجاری چرخشی

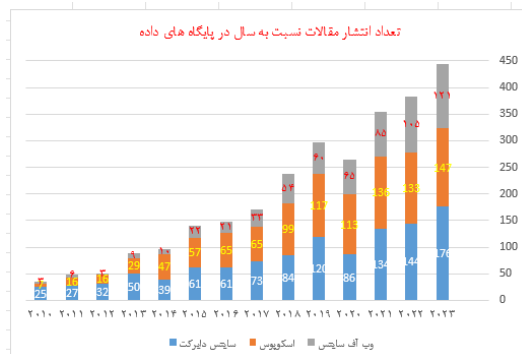
شکل ۱۲ گستردگی انتشار اسناد علمی را نشان می‌دهد. مقالات علمی پژوهشی، مقالات کنفرانسی در رتبه نخست و مقالات پژوهشی در رتبه دوم قرار دارد. با توجه به پیچیدگی این فناوری و نیازمند تحقیقات گسترده هنوز این فناوری در مرحله تحقیق و توسعه است، ولی مطالعات نشان می‌دهد که در سال‌های آتی این فناوری به عنوان یک فناوری بالغ در ماموریت‌های هوافضایی مورد استفاده قرار گیرد.

در این قسمت یک گزارش جامع علم‌سنجی در مورد موتورهای انفجار چرخشی ارائه می‌گردد. داده‌های مربوط به مقالات علمی، پتنت‌ها و همکاری‌های تحقیقاتی در این حوزه جمع‌آوری و تحلیل شده‌اند. این گزارش شامل تحلیل‌های کتاب‌سنجی، شبکه‌های همکاری، و تحلیل محتوایی خواهد بود.

۷-۱- جمع‌آوری داده‌ها

جمع‌آوری داده‌های علمی و مقالات مرتبط با موتورهای انفجاری چرخشی از پایگاه‌های داده‌ای مانند Scopus، Web of Science، و Sciencedirect انجام شده است.

شکل ۹ شماتیکی از روند انتشار اسناد علمی در حوزه موتورهای انفجار چرخشی را نمایش می‌دهد. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد روند انتشار اسناد علمی در این حوزه به شدت سیر صعودی دارد. در این حوزه فناوری و در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۴ در حدود ۲۸۷۷ سند علمی در پایگاه‌های معتبر علمی منتشر شده است. از این تعداد ۱۱۸۷ سند علمی در پایگاه داده ساینس دایرکت، ۶۰۸ سند در پایگاه داده وب آف ساینس و ۱۰۸۲ سند علمی در پایگاه داده اسکوپوس بوده است.



شکل ۹- روند انتشار اسناد علمی در حوزه پیشران‌های انفجاری چرخشی در پایگاه‌های داده معتبر در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۴

شکل ۱۰ روند انتشار اسناد علمی را بر حسب کشور نشان می‌دهد. کشورهای ایالات متحده، چین، ژاپن، روسیه و لهستان و هند در صدر بیشترین تولید کنندگان اسناد علمی در حوزه فناوری پیشران‌های انفجاری چرخشی قرار دارند. با توجه به شکل مشخص است که کشورهای ایالات متحده و چین فاصله زیادی با سایر کشورها در این حوزه فناوری دارند. این موضوع نشانگر سرمایه‌گذاری عظیم این دو کشور در حوزه پیشران‌های جدید هوافضایی می‌باشد. مطالعات علم‌سنجی نشان می‌دهد که تحقیق و توسعه در حوزه موتورهای انفجار چرخشی به سرعت در

- ❖ سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه: افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه مواد پیشرفته، سیستم‌های خنک‌کننده و تکنیک‌های کنترل هوشمند.
- ❖ پشتیبانی از پروژه‌های چندرشته‌ای: حمایت از پروژه‌های چندرشته‌ای که تخصص‌های مختلف را برای حل چالش‌های فنی موتورهای انفجار چرخشی ترکیب می‌کنند.
- ❖ توسعه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی: توسعه نرم‌افزارهای پیشرفته برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی دقیق‌تر فرآیندهای انفجاری و عملکرد موتور.
- ❖ انتشار نتایج پژوهش‌ها: انتشار نتایج پژوهش‌ها و گزارش‌های علمی برای افزایش شفافیت و ارتقای دانش عمومی در این حوزه.
- ### تعارض منافع
- "هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."
- ### مراجع
- [1] G. A.Q. Abdulrahman , N. A.A. Qasem , B. Imteyaz, and A. M. Abdallah, "A review of aircraft subsonic and supersonic combustors," *Aerospace Science and Technology*, vol. 132, pp. 1-38, 2023..
 - [2] T. Teasley, T. Fedotowsky, and P. Gradl, "Current State of NASA Continuously Rotating Detonation Cycle Engine Development," NASA Marshall Space Flight Center, Huntsville, AL, 35808, 2021.
 - [3] B. Ridgeway, "NASA's 3D-printed Rotating Detonation Rocket Engine Test a Success," NASA, 2023. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/marshall/nasas-3d-printed-rotating-detonation-rocket-engine-test-a-success/>.
 - [4] K. Matsuoka, M. Tanaka, T. Noda, A. Kawasaki, and J. Kasahara, "Experimental Investigation on a Rotating Detonation Cycle with Backflow of Burned Gas," *Combustion and Flame*, vol. 225, pp. 13-19, 2021.
 - [5] L. Blain, "NASA tests rotary detonation engine: it will revolutionize space travel," NASA, 2023. [Online]. Available: <https://www.aerospaceengineering.net/nasa-tests-rotary-detonation-engine-it-will-revolutionize-space-travel/>.
 - [6] D. Ferguson and J. Gray, "Expanding the potential benefits of rotating detonation engines," *Propulsion and Energy*, 2021.
 - [7] O. Ray , "NASA Validates Revolutionary Propulsion Design for Deep Space Missions," www.nasa.gov, 2023. [Online].
 - [8] R. D. Smith and S. B. Stanley, "Experimental Investigation of Rotating Detonation Rocket Engines for Space Propulsion," *PROPULSION AND POWER*, vol. 37, no. 3, 2021.
 - [9] L. S. Appalla, R. Joseph and V. R. Chari, "Investigations on Rotating Detonation Engines," in *AIP Conference Proceedings*, 2020
 - [10] Q. Wang and Sh. Zhang, "Thrust characteristics research on continuous rotating detonation engine," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 47, 2023.
- [11] M. Luan, Sh. Zhang, Zh. Xia, S. Yao and J.-P. Wang, "Analytical and numerical study of the expansion effect on the velocity deficit of rotating detonation waves," *Combustion Theory and Modelling*, 2020.
 - [12] J. Sun, J. Zhou, Sh. Liu and Zh. Lin, "Interaction between rotating detonation wave propagation and reactant," *Acta Astronautica*, vol. 164, pp. 197-203, 2019.
 - [13] B. A. Rankin, M. L. Fotia, A. G. Naples, Ch. A. Stevens, and J. L. Hoke, "Overview of Performance, Application, and Analysis of Rotating Detonation Engine Technologies," *Pressure Gain Combustion*, vol. 33, 2017.
 - [14] D. W. Zhai, N. B. Zhao, Sh. Jin, X. F. Shao, and H. T. Zheng, "Numerical study on the characteristics of rotating detonation wave with multicomponent mixtures," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 76, pp. 29786-29797, 2023.
 - [15] "The world's first space flight for the rotating detonation engine, and a glimpse at a new sample return capsule," ISAS, List, Research, Sounding Rockets, 2022.
 - [16] C. A. Nordeen, D. Schwer, F. Schauer, J. Hoke, Th. Barber, and B. Cetegen , "Thermodynamic model of a rotating detonation engine," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 50, p. 568–577, 2014.
 - [17] D. Quick, "U.S. Navy investigates use of fuel-saving Rotating Detonation Engines," U.S. Naval Research Laboratory, 4555 Overlook Ave., SW Washington, DC 20375, 2012.
 - [18] K. Kailasanath, "The Rotating-Detonation-Wave Engine Concept:A Brief Status Report," *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAAPaper 2011-0580*, 2011.
 - [19] R. Yokoo, K. Goto, J. Kim, and A. Kawasaki, "Propulsion Performance of Cylindrical Rotating Detonation Engine," *Special Section on Recent Progress on Rotating Detonation and Its Application(AIAAJ)*, vol. 58, 2020.
 - [20] J. Shaw and et. al, "A Theoretical Review of Rotating Detonation Engines," in *Direct Numerical Simulations - An Introduction and Applications*, IntechOpen Limited, 2019.
 - [21] J. Suchocki, Sh. T. Yu, J. Hoke, A. Naples, and F. Schauer, "Rotating Detonation Engine Operation," *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2012.
 - [22] J. W. Bennowitz and et. al, "Experimental validation of rotating detonation for rocket propulsion," *scientific reports 14204* , vol. 13, 2023.
 - [23] P. Wolański, "Detonative Propulsio," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 34, no. 1, p. 125–158, 2013.
 - [24] F. A. Bykovskii, S. A. Zhdan, and E. F. Vedernikov, "Continuous Spin Detonations," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 22, no. 6, p. 1204–1216, 2006.
 - [25] J. Kindracki, P., Wolanskiand, and Z. Gut, "Experimental Research on the Rotating Detonation in Gaseous Fuels–Oxygen Mixtures," *Shock Waves*, vol. 21, no. 2, p. 75–84, 2011.
 - [26] D. E. Paxson, "Numerical Analysis of a Rotating Detonation Engine in the Relative Reference Frame," *52nd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 2014-0284*, 2014.
 - [27] D. A. Schwerand, and K. Kailasanath, "Physics of Heat-Release in Rotating Detonation Engines," *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 2015-1602*, 2015.
 - [28] D. A. Schwer, and K. Kailasanath, "On Reducing Feedback Pressure inRotating Detonation Engines," *51st AIAA*

- Nozzle Computational Design Methodology Development and Application," in *AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum*, p. 3872, 2020.
- [43] I. A. Vaca, "Systematic Literature Review of Rotating Detonation Engines (RDE's) & Potential Scalability for Use in Non-Rocket Based Applications," Master of Science in Aerospace Engineering, Department of Aerospace Engineering San José State University, San José State, 2023.
- [44] J. A. Boening, J.D. Heath, T.J. Byrd, J.V. Koch, A.T. Mattick, R. E. Breidenthal, C. Knowlen, and M. Kurosaka, "Design and Experiments of a Continuous Rotating Detonation Engine: a Spinning Wave Generator and Modulated Fuel/ Oxidizer Mixing," *Abstract for AIAA Propulsion and Energy 2016*, 2016.
- [45] A. Koch, Mit. Kurosaka, C. Knowlen, and J. Nathan Kutz, "Multiscale physics of rotating detonation waves: Autosolitons and modulational instabilities," *Phys. Rev. E*, vol. 104, no. 2, 2021.
- [46] A. Mendible, J. Koch, H. Lange, S. L. Brunton, and J. N. Kutz, "Data-driven modeling of rotating detonation waves," *Phys. Rev. Fluids*, vol. 6, 2021.
- [47] "https://www.imeche.org/news/news-article/rotating-detonation-engines-could-harness-%27violent%27-combustion-for-rocket-propulsion," 2020. [Online].
- [48] "https://www.aa.washington.edu/",
https://www.aa.washington.edu/, 2018. [Online].
- [49] M. Jacobson, "Rotating detonation engine," aerospace manufacturing and design, 2020.
- [50] D. McKinney, "Navy Researchers Look to Rotating Detonation Engines to Power the Future," U.S. Naval Research Laboratory, 4555 Overlook Ave., SW Washington, DC 20375, 2012.
- [51] N. Kyle, "US Navy developing rotating detonation engine," *Physics Today*, doi:10.1063/PT.5.026505, 2012.
- [52] S. Sawada and et al., "Experimental Study of Torque Around the Axial Direction on Rotating Detonation Engines," *Journal of Propulsion and Power*, 2021.
- [53] D. Ozdemir, "Japan Tests Rotating Detonation Engine in Space for the First Time," *Interesting Engineering, Inc.*, 2021.
- [54] K. Goto and et. al, "Thrust Validation of Rotating Detonation Engine System by Moving Rocket Sled-Test," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 37, no. 3, pp. 419-425, 2021.
- [55] M. Yamaguchi, K. Matsuoka, A. Kawasaki, J. Kasahara, H. Watanabe, and A. Matsuo, "Investigation of combustion modes and pressure of reflective shuttling detonation combustor," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 38, no. 3, pp. 3615-3622, 2021. DOI: 10.1016/j.proci.2020.07.064
- [56] "https://global.jaxa.jp/projects/rockets/s_rockets/topics.html," [Online].
- [57] S. Heister and V. Tangirala, "Advances made toward rotating detonation engines," *Propulsion and Energy*, 2017. [Online]. Available: <https://aerospaceamerica.aiaa.org/year-in-review/advances-made-toward-rotating-detonation-engines/>.
- Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 2013-1178*, 2013.
- [29] D. A. chwer, and K. Kailasanath, "Feedback into Mixture Plenums in Rotating Detonation Engines," *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting AIAA Paper 2012-0617*, 2012.
- [30] T. H. Yi, J. Lou, C. Turangan, J. Y. Choi, and P. Wolanski, "Propulsive Performance of a Continuously Rotating Detonation Engine," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 27, no. 1, p. 171-181, 2011.
- [31] H. Nakayama, J. Kasahara, A. Matsuo, and I. Funaki, "Front Shock Behavior of Stable Curved Detonation Waves in Rectangular-Cross Section Curved Channels," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 34, no. 2, p. 1939-1947, 2013.
- [32] C. S. Oldenstein, C. A. Almodóvar, J. B. Jeffries, R. Hanson, and K. C. M. Brophy, "High-Bandwidth Scanned-Wavelength Modulation Spectroscopy Sensors for Temperature and H₂O in a Rotating Detonation Engine," *Measurement Science and Technology, Paper 105104.*, vol. 25, 2014.
- [33] M. L. Otia, F. Schauer, T. A. Kaemming, and J. Hoke, "Experimental Study of the Performance of a Rotating Detonation Engine with Nozzle," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 32, no. 3, p. 674-681, 2016.
- [34] B. A. Rankin, M. L. Fotia, D. E. Paxson, J. L. Hoke and F. Schauer, "Experimental and Numerical Evaluation of Pressure Gain Combustion in a Rotating Detonation Engine," *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 2015-0877*, 2015.
- [35] A. Naples, J. Hoke, J. Karnesky, and F. Schauer, "Flowfield Characterization of a Rotating Detonation Engine," *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 2013-0278*, 2013.
- [36] X. M. Tang, J. P. Wang, and Y. T. Shao, "Three-Dimensional Numerical Investigations of the Rotating Detonation Engine with a Hollow Combustor," *Combustion and Flame*, vol. 162, no. 4, p. 997-1008, 2015.
- [37] N. Tsuboi, Y. Watanabe, T. Kojima, and A. K. Hayashi, "Numerical Estimation of the Thrust Performance on a Rotating Detonation Engine for a Hydrogen-Oxygen Mixture," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 35, no. 2, p. 2005-2013, 2015.
- [38] Z. Rui, and W. Jian-Ping, "Numerical Investigation of Flow Particle Paths and Thermodynamic Performance of Continuously Rotating Detonation Engines," *Combustion and Flame*, vol. 159, no. 12, p. 3632-3645, 2012.
- [39] C. A. Nordeen, D. Schwer, F. Schauer, J. Hoke, and T. Barber, "Thermodynamic Model of a Rotating Detonation Engine," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 50, no. 5, p. 568-577, 2014.
- [40] K. Goto, J. Nishimura, A. Kawasaki, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, D. Nakata, M. Uchiumi, K. Higashino, "Experimental Propulsive Performance and Heating Environment of Rotating Detonation Engine with Various Throat Geometries," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 35, no. 1, pp. 213-223, 2019.
- [41] X. Yuan, J. Zhou, X. Mi, and H. Dick Ng, "Numerical study of cellular detonation wave reflection over a cylindrical concave wedge," *Combustion and Flame*, vol. 202, pp. 179-194, 2019.
- [42] K. Miki, D. E. Paxson, D. Perkins, and S. Yungster, "RDE



COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)