مقاله

# موتورهای انفجار ضربه‌ای و بررسی مباحث مهم در طراحی بهینه

محمدهادی حامدی *
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا
دانشگاه صنعتی مالک اشتر
hadihamedi20@gmail.com

جابر نورالله‌زاده
دانشجوی دکتری مهندسی هوافضا
دانشگاه علوم و تحقیقات

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۳۱

## چکیده

بیش از چند دهه است که پژوهش‌های قابل توجهی دربارهٔ موتورهای انفجار ضربه‌ای[1]، باهدف جایگزینی سیستم‌های پیشرانش موجود در هواپیما با سیستم‌هایی با قابلیت ایجاد سرعت در بازه‌های فروصوت تا فراصوت، انجام شده است. موتورهای انفجار ضربه‌ای نوعی از سیستم‌های پیشرانش‌اند که در آنها از امواج انفجاری برای سوختن اکسیدکننده و مادهٔ سوختنی استفاده می‌شود. بیش از هفتاد سال است که این دسته از موتورها به‌عنوان سیستم پیشرانش مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما تاکنون توجه چندانی به تولید قدرت الکتریکی با به‌کارگیری امواج انفجاری نشده است. در ایران نیز فعالیت چشم‌گیری دربارهٔ طراحی و ساخت موتورهای انفجار ضربه‌ای گزارش نشده است. هدف این مقاله، معرفی موتورهای انفجار ضربه‌ای، نحوهٔ عملکرد و مزایای آن و همچنین بررسی مباحث مهم در طراحی بهینهٔ این دسته از موتورهاست. همچنین مباحثی چون بررسی فرایند انتقال امواج احتراقی به امواج انفجاری، معرفی و ارزیابی عملکرد ابزارهای رایج گذار از احتراق به انفجار و مزایای استفاده از این ابزارها در موتورهای انفجاری ضربه‌ای نیز مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

**واژگان کلیدی:** موتور انفجار ضربه‌ای، امواج انفجاری فراصوت، فرایند انتقال احتراق به انفجار، طراحی بهینه

## ۱. مقدمه

سال‌هاست که تحقیقات گسترده‌ای دربارهٔ موتورهای انفجار ضربه‌ای باهدف جایگزینی سیستم پیشرانش موجود در هواپیما با سیستم‌هایی با قابلیت ایجاد سرعت در بازه‌های فروصوت تا رژیم‌های فراصوت انجام شده است. موتورهای انفجار ضربه‌ای نوعی از سیستم‌های پیشرانس محسوب می‌شوند که در آنها از امواج انفجاری برای احتراق اکسیدکننده و مادهٔ سوختنی استفاده می‌شود. در بین هر موج انفجاری، مخلوط پس از اشتعال در محفظهٔ احتراق منفجر می‌شود و تولید ضربه می‌کند. از دیدگاه نظری، این موتورها در بازهٔ سرعت‌های فروصوت تا فراصوت (ماخ ۶) عمل می‌کنند. در طراحی ایده‌آل، بازدهی ترمودینامیکی آنها از موتورهای توربوجت و توربوفن بیشتر است؛ چون

امواج انفجاری به‌سرعت مخلوط را متراکم کرده و در حجم ثابت به آن گرما می‌دهند، لذا در این موتورها به قطعات متحرکی چون توربین و کمپرسور نیاز نیست و در نتیجه آن از وزن و هزینهٔ این موتورها کاسته می‌شود.

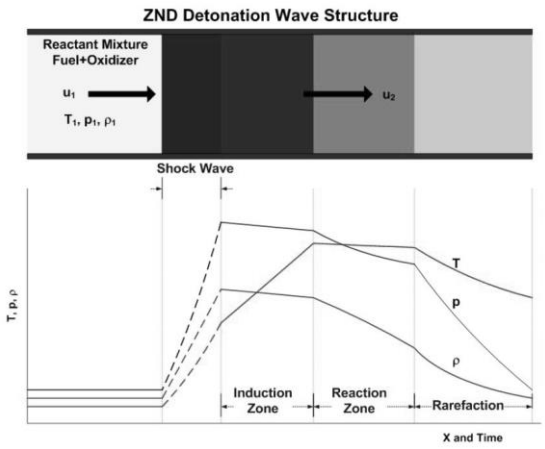
بیش از هفتاد سال است که این موتورها به‌عنوان سیستم پیشرانش مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله مباحث کلیدی برای توسعهٔ این موتورها افزایش سرعت و بازدهی فرایند اختلاط اکسیدکننده و سوخت، یکپارچگی ورودی و نازل، همچنین جلوگیری از خوداشتعالی در مخلوط است. امروزه موتورهای انفجار ضربه‌ای تولید نمی‌شوند، اما در سال ۲۰۰۸ م در حمایت از قدرت این موتورها چندین موتور آزمایشی ساخته و در نمونه‌هایی از انواع هواپیما استفاده شد و با موفقیت در سرعت پایین به پرواز درآمد. در ژوئن ۲۰۰۸، آژانس پروژه‌های تحقیقاتی پیشرفتهٔ دفاعی[۲] از بلک‌سوئیفت[۳] - که برای دستیابی به ماخ ۶ طراحی شده بود - رونمایی کرد؛ اگرچه در اکتبر همان سال، این پروژه لغو شد. مبنای عملکرد موتورهای انفجار ضربه‌ای همانند موتورهای پالس جت است. در موتورهای پالس جت هوا با سوخت مخلوط می‌شود و یک مخلوط قابل اشتعال تشکیل می‌دهد و در محفظهٔ بازی مشتعل می‌شود. در نتیجه سبب افزایش فشار مخلوط تا حدود ۱۰۰ اتمسفر می‌شود که در نازل منبسط شده و نیروی تراست ایجاد می‌کند [۱]. امواج انفجاری سیال را متراکم می‌کنند و فشار و چگالی آن را افزایش می‌دهند و در نتیجه سبب افزایش دما و انجام واکنش شیمیایی می‌شوند. انرژیی که از واکنش شیمیایی آزاد می‌شود منجر به انتقال امواج شوک در چرخه می‌شود [۲]. توصیف ذکرشده از امواج انفجاری، تعریف ساده‌ای است؛ حال آنکه مفهوم امواج انفجاری کاملاً پیچیده است و پدیده‌ای نوسانی و سه‌بعدی وابسته به زمان می‌باشد. احتراق به‌معنای انرژی شیمیایی تولیدی در موتورهای احتراق داخلی معمولی، موتورهای توربین گاز و راکت‌هاست. نمونه‌ای از افزایش نیروی تراست در سیستم‌های پیشرانش تبدیل امواج احتراقی به موج انفجاری[۴] است که در بخش‌های بعد به تفصیل مورد بررسی قرار خواهد گرفت [۳-۵]. پدیدهٔ انفجار برای نخستین‌بار به‌طور همزمان توسط برتهولت و وییله [۶-۷] و مالارد و چاتلیر [۸] در اواخر سال ۱۸۸۰ م مورد بررسی قرار گرفت. برتهولت و وییله بر انفجار زغال سنگ و تعیین وجود امواج انفجاری در مخلوط‌های گازی قابل احتراق مطالعه کردند. مالارد و چاتلیر نیز همان تحقیقات را روی انتشار شعله انجام دادند [۸] و اثبات کردند که امواج احتراقی می‌توانند درون یک مخلوط گازی قابل احتراق به امواج انفجاری تبدیل شوند [۹]. آنها معتقدند که انتشار امواج انفجاری مانند یک موج تراکمی آدیاباتیک‌اند و سرعت انتشار آنها به سرعت صوت محصولات احتراق وابسته است. همچنین دریافتند که سرعت امواج انفجاری مستقل از منبع جرقه (چه منبع جرقهٔ قابل اشتعال و چه غیرقابل اشتعال)، قطر لوله و ترکیب مخلوط قابل اشتعال اولیه می‌باشد [۱۰]. طولی نکشید چاپمن [۱۱] نظریهٔ کلاسیک چاپمن - جوگوت[۵] را برای انتشار پایای صفحه‌ای امواج انفجاری در مخلوط گازی ارائه داد [۱۲-۱۳]. او نشان داد کمترین مقدار سرعت محصولات احتراق برابر سرعت صوت در همان گاز است.

در اوائل دههٔ ۱۹۴۰ م، زلدوویچ [۱۴-۱۵] وان نیومن [۱۶] و دورینگ [۱۷] هریک به‌طور مستقل مدل‌هایی مشابه برای ساختار یک‌بعدی امواج انفجاری با نرخ شیمی محدود به‌صورت فرمول ارائه کردند که به مدل ZND[۶] مشهور شد. امواج انفجاری، گاز را از حالت اولیه در طول خط رایلی به‌حالت پرفشار متراکم کرده که در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این شکل تشکیل نواحی مختلف در عرض یک موج انفجاری و توزیع فشار، دما و چگالی برای امواج یک‌بعدی نمایش داده شده است.

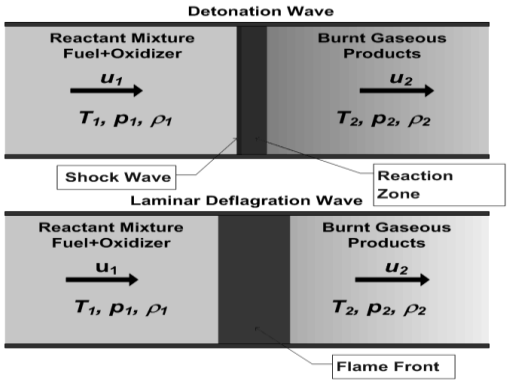
## ۲. مقایسهٔ امواج احتراقی و انفجاری

احتراق یا تشکیل امواج احتراقی[۷]، فرایند سوختن به‌صورت فروصوت است که در آن شعله با سرعت حدود چند متر بر

ثانیه منتشر می‌شود و اختلاف فشار کوچکی ایجاد می‌کند. مشخصه‌های احتراق در موتورهای رم‌جت و توربوجت از این قبیل می‌باشد. از دیگر خصوصیات امواج احتراقی این است که در عرض موج احتراقی فشار کاهش و حجم افزایش می‌یابد. در حالی‌که امواج انفجاری[8] فرایند احتراق فراصوت‌اند که سرعت انتشار امواج آنها در حدود ۲۰۰۰ متر بر ثانیه (عدد ماخ حدود ۴ تا ۸) می‌باشد. در عوض، یک موج انفجاری فشار افزایش یافته (برای نسبت استوکیومتریک و سوخت هیدروکربنی، فشار حدود ۲۰ برابر می‌شود)، در حالی‌که حجم کاهش می‌یابد [۱۹]. در شکل ۲ مقایسه‌ای شماتیمک میان امواج احتراقی و انفجاری با جریان واکنشی عبوری از امواج ساکن نمایش داده شده و در جدول ۱ خواص امواج انفجاری با خواص امواج احتراقی مقایسه شده است.




شکل ۱. توزیع فشار برای امواج یک‌بعدی [۱۸]

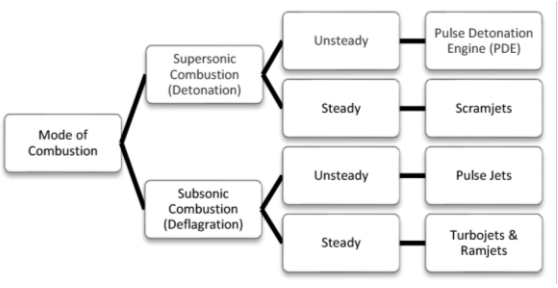



شکل ۲. مقایسهٔ امواج انفجاری با احتراقی [۱۸]

جدول ۱. مقایسهٔ خواص امواج انفجاری با امواج احتراقی [۲۰]

| Property | Detonation | Deflagration |
|---|---|---|
| U1/C1 | 5-10 | 0.0001-0.03 |
| U2/U1 | 0.4-0.7 | 4-6 |
| P2/P1 | 13-55 | 0.98 |
| T2/T1 | 8-21 | 4-16 |
| ρ2/ρ1 | 1.7-2.6 | 0.06-0.25 |

از جمله عوامل اثرگذار در دشواربودن به‌کارگیری عملی موتورهای انفجار ضربه‌ای، رسیدن به امواج انفجاری در محفظهٔ احتراق و کوتاه‌بودن طول لولهٔ موتور است. شروع فرایند انفجار در مخلوط سوخت و هوا درون لوله‌های کوتاه، که نیازمند افزودن مقدار زیادی انرژی است، غالباً کار دشواری است. شروع سوختن احتراقی و سپس تبدیل امواج احتراقی به امواج انفجاری به‌وسیلهٔ ایجاد مانع در مسیری که اختلاط آشفته همچنین افزایش سرعت رخ می‌دهد یک روش کاربردی برای حل این مشکل است. فرایند شتاب‌دادن به امواج، درون یک موج انفجاری با نام گذار از احتراق به انفجار (DDT) شناخته می‌شود [۲۱]. در شکل ۳ دسته‌بندی انواع احتراق و تفاوت امواج احتراقی و انفجاری به‌صورت نمودار نشان داده شده است. در این شکل جایگاه موتورهای انفجاری ضربه‌ای نیز مشخص شده است.

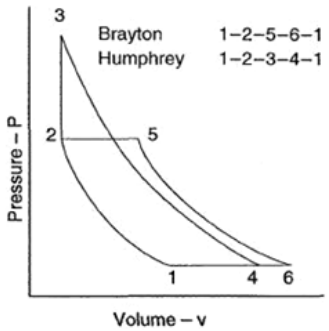



شکل ۳. نمودار دسته‌بندی انواع احتراق [۲۰]

## ۳. مقایسهٔ سیکل هومفری با سیکل برایتون

در تحلیل ترمودینامیکی سیستم‌های پیشرانشی معمولی (که در آنها احتراق ساده رخ می‌دهد) از سیکل برایتون[9]

استفاده می‌شود، حال آنکه در موتورهای انفجار ضربه‌ای، سیکل هومفری[10] مورد استفاده قرار می‌گیرد. در یک سیکل برایتون، افزودن گرما به سیستم در فرایند فشار ثابت انجام می‌شود، حال آنکه در سیکل هومفری، این عمل در فرایند حجم ثابت انجام می‌شود. در شکل ۴ نمودار حجم فشار برای سیکل‌های برایتون و هومفری نمایش داده شده است [۲۲].




شکل ٤. مقایسه سیکل‌های برایتون و هومفری [۲۲]

## ٤. سیکل موتور انفجار ضربه‌ای

در شکل ۵ نمایی شماتیک از موتور انفجار ضربه‌ای ساده به‌همراه شیرهای ورودی و نازل در مقطع خروجی نمایش داده شده است.

شکل ۵. نمایش شماتیک یک موتور انفجار ضربه‌ای ساده [۱۸]

موتورهای انفجار ضربه‌ای دارای دو سیکل مختلف چهارزمانه و سه‌زمانه می‌باشند. در موتورهای چهارزمانه دورهٔ تناوب کل یک سیکل با رابطهٔ ۱ بیان می‌شود:

$$\tau = t_f + t_c + t_b + t_p \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که در این رابطه $t_f$ بیانگر زمان پرسازی، $t_c$ بیانگر زمان تراکم و تشکیل امواج انفجاری، $t_b$ بیانگر زمان رسیدن امواج به انتهای موتور و نهایتاً $t_p$ زمان فراگیری کامل درون محفظه از هوای اتمسفر می‌باشد. در شکل ۶ سیکل چهارزمانهٔ موتورهای احتراق ضربه‌ای به‌صورت کلی نمایش داده شده است. جزئیات دقیق فرایندهای انجام‌شده در یک سیکل موتورهای انفجاری ضربه‌ای به شرح ذیل است [۲۳]:

۱. درابتدای این سیکل، سوخت با اکسیدکننده مخلوط و در اثر جرقه باعث ایجاد شعله می‌شود. این شعله‌ها یکدیگر را تقویت می‌کنند و سبب ایجاد موج حاصل از انفجار می‌شوند. مخلوطی از واکنش‌دهنده‌ها داخل لولهٔ محفظهٔ احتراق پخش می‌شوند و محصولات احتراق در پشت موج حاصل از انفجار باقی می‌مانند.

۲. موج انفجاری به قسمت خروجی موتور می‌رسد. موج انفجاری از موتور خارج و وارد محیط اطراف می‌شود و در اثر این فرایند موج‌های انبساطی برگشتی به داخل موتور برمی‌گردند. وقتی موج انبساطی به دیوارهٔ ابتدایی موتور برخورد می‌کند، شروع به بازگشت می‌کند. چون فشار پشت دچار افت زیادی می‌شود، موج‌های انبساطی به‌وسیلهٔ سوخت و اکسیدکننده به‌سمت بیرون هدایت می‌شوند.

۳. موج‌های انبساطی به انتهای محفظهٔ احتراق موتور برای خروج می‌رسند. لازم به‌ذکر است که محصولات احتراق به‌طورکامل از محفظهٔ احتراق خارج می‌شوند.

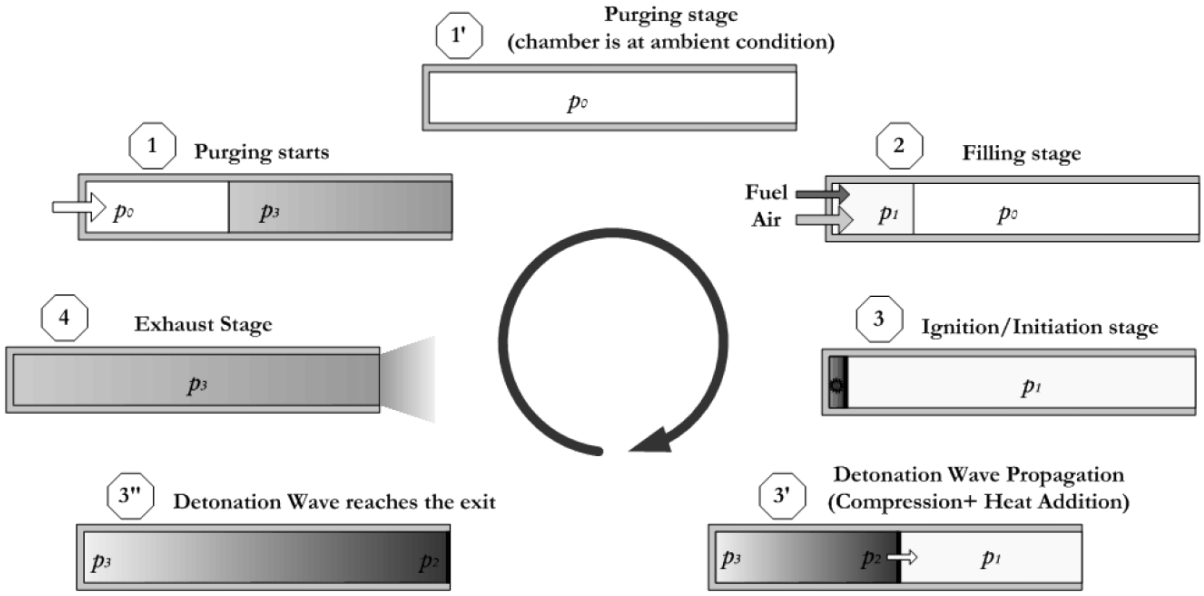
۴. موج‌های انبساطی از انتهای موتور وارد محیط شده و موج‌های برگشتی تراکمی به‌همراه واکنشگرها به داخل موتور برمی‌گردند.

۵. موج برگشتی به دیواره برخورد می‌کند و نیروی پیشران را به‌وسیلهٔ پرنده انتقال می‌دهد و همچنین موج ضربه‌ای اجازه می‌دهد که واکنشگرهای احتراق با یکدیگر ترکیب شده، جرقه زده شود تا باعث انتقال موج انفجاری دیگری گردد.

## ۵. مزایای موتور انفجار ضربه‌ای

فشار متراکم‌شده در قسمت ورودی موتور نیاز به کمپرسور، توربین و اجزای سنگین برای نگه‌داری سوخت مایع را از

بین می‌برد. در طراحی موتورهای انفجار ضربه‌ای به کمپرسورهای پیچیده و یا ماشین‌آلات قطعات متحرک نیاز نیست. در این موتورها، از قطعات به‌هم پیوسته و کم‌وزن به‌جای قسمت‌های متحرک و جداشونده استفاده می‌شود. سیستم مکانیکی سادهٔ موتورهای انفجار ضربه‌ای از جمله مزایای این موتور نسبت به سایر سیستم‌های پیشرانش است. تعداد قطعات کم در داخل موتور انفجار ضربه‌ای نیز سبب کاهش هزینهٔ نگه‌داری و تعمیر موتورها می‌شود.




شکل ٦. نمایش سیکل چهارزمانهٔ موتور احتراق ضربه‌ای [۱۸]

از دیگر عواملی که سبب تعمیر سادهٔ موتور انفجار ضربه‌ای و کاهش قیمت آن نسبت به دیگر سیستم‌های جلوبرنده می‌شود، کم‌بودن قطعات درگیر با هم آنهاست. سبکی این موتور که ناشی از سازوکار بسیار سادهٔ آن است باعث بهترشدن نسبت نیروی پیشرانش به جرم موتور می‌شود. یکی دیگر از مزیت‌های موتور انفجار ضربه‌ای بازده بالای ترمودینامیکی این موتورها و قدرت زیاد جلوبرندگی آن است. نیروی پیشرانش تولیدشده توسط موتور انفجار ضربه‌ای سرعت پرنده را تا شش ماخ افزایش می‌دهد. در نمودار شکل ۷ مقایسهٔ عملکرد موتورهای مختلف براساس افزایش عدد ماخ برحسب ضربهٔ ویژه برای پیشرانه‌های مختلف نمایش داده شده است. در این شکل به‌خوبی مشهود است که ضربهٔ ویژهٔ پیشرانه‌های هیدروژنی به‌مراتب بیشتر از پیشرانه‌های هیدروکربنی است. همچنین موتورهای انفجار ضربه‌ای نسبت به دیگر موتورها مانند توربوجت، رم‌جت و اسکرم‌جت دارای ضربهٔ ویژهٔ بیشتری می‌باشند. اما نکتهٔ قابل توجه این است که موتورهای اسکرم‌جت در محدودهٔ وسیع‌تری از عدد ماخ نسبت به دیگر موتورها توانایی پرواز دارند. متوسط ضربهٔ مخصوص برای موتورهای انفجار ضربه‌ای با پیشرانه‌های هیدروژنی در حدود ۹۰۰۰ ثانیه و برای پیشرانه‌های هیدروکربنی حدود ۴۰۰۰ ثانیه می‌باشد [۱۸-۲۲].

## ۶. دسته‌بندی موتورهای انفجاری ضربه‌ای

سیستم‌های پیشرانش مبتنی بر انفجار ضربه‌ای را می‌توان به سه دستهٔ عمده طبقه‌بندی کرد:

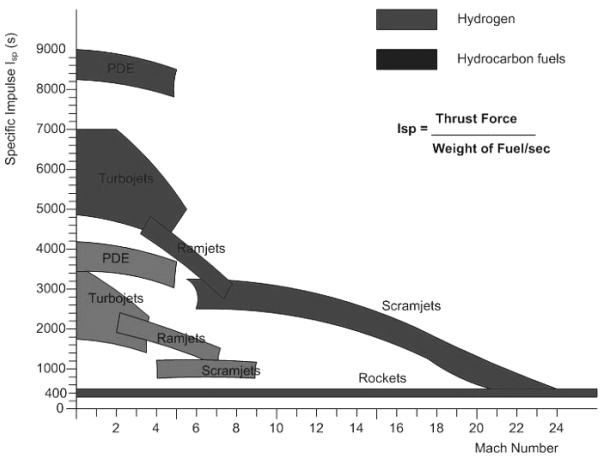
۱. موتورهای انفجاری ضربه‌ای خالص[11] با مجموعه‌ای از لوله‌های انفجار، ورودی، و نازل

۲. موتورهای انفجاری ضربه‌ای سیکل ترکیبی[12]، متشکل از موتورهای انفجاری ضربه‌ای ترکیب‌شده با

سیستم‌های رم‌جت و اسکرم‌جت و یا دیگر سیستم‌های پیشرانش، که به‌منظور بهینه‌سازی بازدهی کلی سیستم، هر چرخه در بازهٔ سرعت مختلف عمل می‌کند.

۳. موتورهای انفجاری ضربه‌ای هیبریدی[۱۳]، که با استفاده از احتراق قابل تبدیل به انفجار، در فرایند فشار ثابت کار می‌کنند و معمولاً با یک توربوماشین ترکیب می‌شوند.

برای هریک از این سیستم‌ها الزامات مورد نیاز برای قطعات جانبی و لوله‌های انفجار به‌خوبی شناخته نشده است. عملکرد کلی سیستم نیز به‌دلیل ناشناخته‌ماندن عملکرد اجزای آن به‌خوبی مشخص نیست.



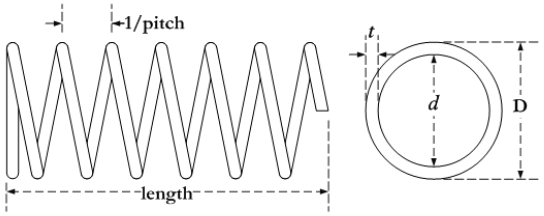

شکل ۷. مقایسهٔ ضربهٔ مخصوص موتورهای مختلف [۱۸]

## ۷. آزمایش ابزارهای فرایند انتقال از احتراق به انفجار

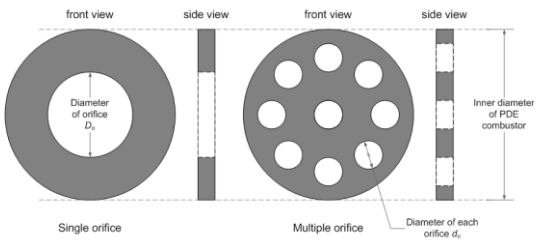
همان‌طور که در بخش قبل نیز اشاره شد، انتقال از احتراق به انفجار فرایندی است که در آن جبههٔ شعلهٔ ناشی از احتراق شتاب می‌گیرد و به امواج انفجاری فراصوت تبدیل می‌شود. یکی از ابزارهای رایج مورد استفاده در این فرایند فنر شلخین است که به نام مخترع آن - که در دههٔ ۱۹۳۰ م دربارهٔ تأثیر زبری دیواره بر امواج انفجاری مطالعه کرده است - نام‌گذاری شده است. فنر شلخین فنری حلزونی است که با سیم سخت و ضخیم ساخته می‌شود. این فنر در شکل ۸ نمایش داده شده است. پارامترهای مارپیچی شامل طول، نسبت انسداد[۱۴] و گام فنر است. نسبت انسداد فنر یا هر ابزار گذار از احتراق به انفجار دیگر برحسب قطر داخلی، خارجی و ضخامت با رابطهٔ ۲ بیان می‌شود:

$$BR = \frac{D^2 - d^2}{D^2} = \frac{4t(D-d)}{D^2} \qquad (۲)$$

از دیگر ابزارهای گذار از احتراق به انفجار (DDT) می‌توان به صفحات اوریفیس، نازل‌های همگرا - واگرا، مجرای شیاردار جانبی و شیاردار حلقوی اشاره کرد. در شکل ۹ دو نوع از صفحات اوریفیس استفاده‌شده در این آزمایش، یکی اوریفییس تکی و دیگری اوریفیس چندتایی نمایش داده شده است.




شکل ۸ نمایی شماتیک از فنر شلخین [۱۸]




شکل ۹. نمای شماتیک صفحات اوریفیس [۱۸]

پانیکر و همکاران [۲۴]، در سال ۲۰۰۹ م، در دانشگاه تگزاس روش‌های کاهش طول فرایند انتقال امواج احتراقی به انفجاری را بررسی کرده‌اند. آنها این مطالعات را روی موتور انفجار ضربه‌ای با یک لولهٔ انفجاری انجام داده‌اند. همچنین ابزارهای مختلف برای انجام فرایند DDT روی یک موتور واقعی در شرایط محیطی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتیجهٔ آزمایشات نشان می‌دهد که فنر شلخین به‌عنوان ابزار تقویت DDT اگر درپی یک شیار و یا نازل

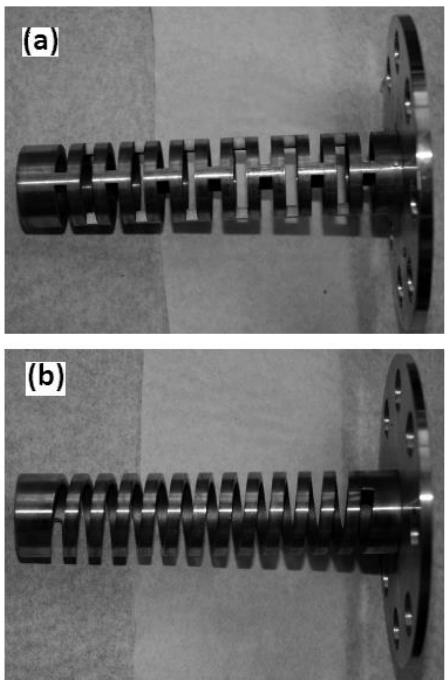
همگرا – واگرا قرار بگیرد، بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد. اگر فرایند خنک‌کاری روی فنر شلخین انجام شود، عملکرد این ابزار همچون نازل همگرا - واگرا و شیار می‌شود که همهٔ آنها توانایی نگه‌داشتن عملکرد موتور را در شرایط بدخیم محیطی خواهند داشت. برای محاسبهٔ نسبت انسداد صفحات اوریفیس، سطح پوشیده‌شده از اوریفیس برابر با فاصلهٔ بین کل سطح مقطع عرضی داخلی لولهٔ محفظهٔ احتراق و مجموع سطوح اوریفیس‌های موجود در صفحه است. از جمله مزایای استفاده از صفحهٔ اوریفیس عبارت است از:

۱. در مقایسه با فنرهای سیمی بسیار قوی‌تر و بادوام‌ترند.
۲. ساخت و نصب آنها بسیار ساده‌تر از دیگر وسائل DDT است.
۳. دستیابی به نسبت انسدادهای بالا از این طریق ممکن است.
۴. از یک یا دو صفحهٔ اوریفیس به‌عنوان ابزار DDT در یک فاصلهٔ کوتاه می‌توان استفاده کرد.

در شکل ۱۰ مجرای شیاردار جانبی (الف) و شیاردار حلقوی (ب) مورد استفاده در فرایند DDT نمایش داده شده است.

## ۸. مباحث اصلی در طراحی موتورهای احتراق ضربه‌ای

اگرچه نخستین پرواز هواپیما با موتور احتراق ضربه‌ای ثبت‌شده به اوائل سال ۲۰۰۸ م برمی‌گردد، اما بیش از شش دهه است که مطالعه روی مفاهیم موتور احتراق ضربه‌ای در حال انجام است و هنوز جنبه‌های متنوعی از طراحی و عملکرد این دسته از موتورها وجود دارد که نیازمند بازشناسی و بهبود می‌باشند. مخلوط‌های ساکن به‌راحتی جرقه می‌زنند و مقدار انرژی کمی نیز از خود تولید می‌کنند. مخلوط سوخت با اکسیژن بدون تلاش زیادی جرقه می‌زند و تولید انفجار می‌کند. اگر شرایط صحیحی شامل نسبت معادل مناسب، کم‌بودن قطر لوله و کافی‌بودن طول لوله برای انجام فرایند انتقال احتراق به انفجار فراصوت اعمال شود، مخلوط‌های پیش‌مخلوط‌شده با هوا و سوخت به‌راحتی به انفجار می‌رسند. دست‌یابی به انفجار فراصوت در موتورهای چندسیکلی دشوار است. نرسیدن ناکافی مخلوط سوخت و اکسیدکننده، همچنین اختلاط نامناسب منجر به تشکیل‌نشدن امواج انفجاری فراصوت می‌شود. برخی از مباحث مهم برای دستیابی به طراحی بهینه، قبل از اینکه موتور انفجار ضربه‌ای از مرحلهٔ نظری به کاربرد واقعی برسد به شرح ذیل می‌باشد [۱۸]:



شکل ۱۰. شماتیک ابزارهای مختلف گذار از احتراق به انفجار [۱۸]

الف: دستیابی به امواج انفجاری مکرر[۱۵]: امواج انفجاری می‌بایست کاملاً کنترل‌پذیر و در نرخ بالا به منظور برآوردن تقاضای سیستم پیشرانش مبتنی بر موتور انفجار ضربه‌ای تکرارپذیر باشد. به‌عبارت دیگر، انتشار امواج احتراقی درون یک لوله با سطح مقطع ثابت و پرشآده از مخلـوط سوخـت - اکسیدکننده که به‌طور طبیعی به امواج انفجاری انتقال یابد، می‌بایست به‌مقدار کافی بلند باشد که نوعاً از ۱ تا ۱۰ متر بوده و به حساسیت و محتوای انرژی مخلوط سوخت - اکسیدکننده بستگی دارد.

ب: مکرر نگه‌داشتن امواج انفجاری: بعد از ایجاد هر موج انفجاری، عملکرد ناپایای طبیعی موتور انفجار ضربه‌ای سبب از بین رفتن امواج انفجاری می‌شود. دلیل اصلی این اتفاق ترکیب نامناسب سوخت و اکسیدکننده است؛ بنابراین برخی نواحی که تمرکز واکنشگرهای کمتری دارند درون لوله به‌وجود می‌آیند، در حالی‌که در بیشتر نواحی مقدار زیادی از سوخت وجود دارد. وقتی امواج انفجاری به مناطقی دارای سوخت کمتر می‌رسند، ضعیف و از هم جدا می‌شوند. یکی از مشخصه‌های مخلوط سوخت - هوا، کمیت اندازهٔ سلول است که ترکیبات مختلف، اندازهٔ سلول‌های مختلفی ایجاد می‌کند که با آزمایش به‌دست می‌آیند. در مأخذ [۲۵] فهرست سوخت‌های استفاده‌شده در موتور انفجار ضربه‌ای و اندازهٔ سلول‌های ایجادشده در شرایط استوکیومتریک ذکر شده است. اندازهٔ سلول به تمرکز سوخت بسیار حساس است که در شرایط استوکیومتریک یا شرایط غنی از سوخت دارای کمترین مقدار است. اگر اندازهٔ سلول سوخت برحسب تغییر در نرخ معادل افزایش یابد، از مقدار واحد دورتر و سرانجام از قطر لوله بزرگتر شده، منجر به شکست امواج انفجاری می‌شود.

ج: حمایت از سازهٔ اجزای موتور انفجار ضربه‌ای: نگه‌داشتن فرایندهای احتراق در شرایط بسیار ناپایا در زمان طولانی، برای موتور انفجار ضربه‌ای مطلوب نیست و برای بقای قطعات کلیدی همچون شمع، تجهیزات DDT، بست‌ها و اتصالات و جز این‌ها مضر است. آزمایش‌های متعددی روی موتور انفجار ضربه‌ای سیکل ترکیبی برای افزایش تحمل لولهٔ محفظهٔ احتراق و دیگر مؤلفه‌های موتور در برابر پدیده‌های مخرب انجام شده است [۲۶].

د: طراحی ورودی و نازل خروجی: اگر موتور انفجار ضربه‌ای در محفظهٔ احتراق موتور راکت عمل کند، سنگینی جریان خارجی بر دینامیک موتور اثر می‌گذارد. به‌عبارت دیگر، جریان آزاد، بدون بالارفتن دمای استاتیکی تا نقطهٔ خوداشتعالی سوخت، به‌طور مؤثری پخش می‌شود و سپس به‌طور صحیحی بدون داشتن نقطهٔ مرگ تا محفظهٔ احتراق واگرا می‌شود. در سرعت‌های فراصوت، امواج ضربه درون ورودی و شیرهایی که به‌طور ناگهانی دریچهٔ ورودی را می‌بندند، تغییر شکل خواهند داد. موتورهای انفجار ضربه‌ای ترکیبی یا معمولی با جریان کنارگذر دارای طراحی پیچیده‌ای برای اطمینان از هموار‌بودن جریان درون موتور با پرسازی و تخلیهٔ مناسب محفظهٔ احتراق می‌باشند.

ه: طراحی شیرها: سرعت و برآیند تراست موتور انفجار ضربه‌ای به‌کمک شیرها به‌طور مؤثر می‌توانند کنترل شوند. کنترل تراست از جمله اساسی‌ترین الزامات برای هواپیما در حین بلندشدن، فرودآمدن و مانوردادن است. در موتورهای انفجار ضربه‌ای دارای چند محفظه، برهم‌کنش آکوستیکی ورودی و خروجی جریان بین محفظه‌های مختلف، پیچیدگی بیشتری را در سیستم به‌وجود می‌آورد. بنابراین پروازهای با سرعت فراصوت، شیرها و دیگر مؤلفه‌های کنترل نقش یک مانع را ایفا کرده که منجر به تولید نیروی درگ و یا سبب تغییر شکل در امواج ضربه می‌شوند.

و: سیستم جرقه‌زنی: آغازگری امواج انفجاری با انتقال مقدار زیادی از انرژی به مخلوط سوخت - اکسیدکننده به‌دست می‌یابد همانند سیستم جرقه‌زنی لیزری یا تخلیهٔ قوس الکتریکی. در قرن اخیر، سیستم جرقه‌زنی با ولتاژ بالا و انرژی کم در وسائل نقلیه و موتور هواپیماها استفاده می‌شود. از جمله نگرانی‌ها این است که شمع‌ها امواج انفجاری ضخیمی را به محیط زیست منتقل می‌کنند.

ز: انتخاب سوخت: موتورهای انفجار ضربه‌ای همانند موتورهای توربین گاز، به‌طور نظری می‌توانند با استفاده از سوخت‌های معمولی رایج گاز و مایع عمل کنند. همچنین ذرات زغال سنگ با ابعاد ۱۰میکرومتر، مخلوط‌هایی با قابلیت انفجار بالا با هوا ایجاد می‌کنند و معمولاً برای تولید توان در موتورهای زمینی مبتنی بر موتورهای انفجار ضربه‌ای استفاده می‌شوند. سیستم تحویل‌دهندهٔ سوخت نیز می‌تواند برای سوخت‌های ویژه توسعه پیدا کند. اندازهٔ موتور به اندازهٔ سلول سوخت وابسته است.

ح: کاهش آلایندگی‌های محصولات خروجی: با اینکه می‌توان مطمئن بود که با تشکیل امواج انفجاری در سوختن سوخت‌ها از ایجاد مونوکسید کربن و یا دوده جلوگیری می‌شود، اما دماهای بالا منجر به تشکیل $NO_X$ می‌شود. تحقیقات بیشتر درمورد کاربرد مبدل‌های کاتالیستی نیازمند حل‌کردن موضوع نامطلوب محصولات فرعی می‌باشد.

ت: ارتعاشات و سروصدا: موتور انفجار ضربه‌ای به‌طور صحیحی با سیستم‌های پیشرانش جفت می‌شود و می‌تواند انتخاب مناسبی برای به‌کاربردن در پروازهای ویژه باشد. مثلاً ارتعاشات، شامل ضربه یا گرمای تولیدی، نباید تأثیر مخربی بر تجهیزات موتور وارد کند. سروصداهای الکتریکی تولیدشده به‌وسیلهٔ سیستم جرقه‌زنی، باید در بازهٔ قابل قبولی از سیستم‌های ارتباطات یا راداری باشد. همچنین سروصداهای قابل شنود برای مأموریت‌های بحرانی، که بازهٔ شنوایی یکی از مباحث مهم آن است، نباید زیاد گوش‌خراش باشند.

ی: سیستم‌های کنترل، تشخیص و داده‌برداری: امواج انفجاری فرایند بسیار ناپایا بوده و اگر شرایط درون محفظه مناسب نباشد، این امواج مستعد شکست می‌باشند. بنابراین شرایط کنترل و داده‌برداری باید با سیستم حلقه‌بستهٔ پس‌خور[16] استفاده شود. یکی از سازه‌های فیزیکی که با کل هندسه موتور ساخته شده است، ابزارهای DDT و کابل‌های ورودی کنترل محفظه که پر می‌شوند (که می‌تواند دبی جرمی ورودی، نرخ سوخت - اکسیدکننده، اختلاط، زمان‌بندی شیرها، انتخاب محفظهٔ احتراق و جز این‌ها باشد) و سیستم جرقه‌زنی (زمان‌بندی و انرژی) روی آن قرار گرفته‌اند. اما شرایط محفظه، موقعیت و سرعت امواج انفجاری باید تعیین شوند. بنابراین حسگرهایی نیاز است که درون محفظهٔ احتراق بتوانند در دما و فشار زیادی که از امواج انفجاری حاصل می‌شود، باقی بمانند. حسگرها به سیستم کنترل اجازه می‌دهند که زمان‌بندی شیر و نرخ جریان و جرقه‌زنی را تنظیم کنند تا موتور بتواند تراست و سرعت مورد نیاز را تأمین کند.

## ۹. جمع‌بندی

برخی از مهم‌ترین نتایج حاصل از مرور مطالعات، شبیه‌سازی‌ها و آزمایشات انجام‌شده درمورد موتورهای انفجار ضربه‌ای در ادامه اشاره شده است تا شرایط طراحی، ساخت، تولید و آزمایش موتورهای انفجار ضربه‌ای را آشکارتر و مسیر تولید و بومی‌سازی آنها را هموارتر کند.

الف: استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و توسعهٔ آن در حل مسائل عددی مربوط به موتورهای انفجار ضربه‌ای منجر به پیشرفت‌های زیادی در حل جریان‌های دمابالا و غیرتعادلی شده است.

ب: مقدار قابل توجهی از انرژی در موج شوک قوی موجود در لولهٔ انفجاری ذخیره شده است. اگر نازل در انتهای خروجی لوله وجود نداشته باشد این انرژی به محیط بیرون تخلیه و تلف می‌شود. افزودن نازل در انتهای لولهٔ انفجاری سبب افزایش بهره‌وری موتور و افزایش تراست تولیدی می‌شود.

ج: اگر طول لوله به اندازهٔ کافی بلند باشد، یک موج احتراقی درون مخلوط واکنشی به‌طور طبیعی می‌تواند به یک موج انفجاری منتقل شود که منجر به افزایش فشار و دما در پشت جبهه شعله می‌شود. نوعاً طول مورد نیاز برای لوله در مرتبه‌ای از ۱تا ۲ متر می‌باشد تا اینکه امواج احتراقی جبههٔ شعله به موج ضربه تغییر شکل دهند و سپس از آن جدا شوند. مخلوط‌های کم‌انرژی برای برای انجام فرایند DDT به طول ۱۰ متری نیاز دارند [۲۵].

د: پروپان به‌دلیل مزایای بسیارش، به‌عنوان سوختی ایده‌آل برای موتورهای انفجار ضربه‌ای شناخته می‌شود. از جمله مزایای این سوخت پاک‌بودن و روان‌بودن آن است. این حقیقت که پروپان مایع به سهولت در دسترس است و قابلیت ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل آن دشوار نیست، منجر شده است تا امروزه پروپان یک سوخت ایده‌آل برای استفاده در

موتور می‌باشد. پروپان به‌دلیل داشتن چگالی انرژی بالا به‌عنوان سوخت بهینه به‌شمار می‌رود [۱۸]. ابزارهای مختلف مورد استفاده در فرایند گذار از احتراق به انفجار (DDT) با یکدیگر مقایسه شده و نتیجهٔ حاصل به این شرح می‌باشد که صفحهٔ اوریفیس و فنر شلخین بهینه‌ترین ابزار برای انجام فرایند DDT می‌باشند.

## ۱۰. مآخذ


[1] Wikipedia, online encyclopedia, https://www.wikipedia.org (accessed November 20, 2014)

[2] Belini, R., "Ideal Cycle Analysis of a Regenerative Pulse Detonation Engine for Power Production", PHD Thesis, Texas, 2010.

[3] Kuo, K. K., *Principles of combustion*, New York: Wiley, 1986.

[4] Fickett, W., W. C. Davis, *Detonation: Theory and Experiment*, New York: Dover Publications, 1979.

[5] Nettleton, M.A. *Gaseous detonations: Their Nature, Effects and Control*, New York: Chapman and Hall, 1987.

[6] Berthelot, M., P. "Vieille. On the velocity of propagation of explosive processes in gases." *C. R. Hebd. Sceances Acad*. Sci., vol. 93, no. 2, 1881, pp. 18-21.

[7] Berthelot, M., P. Vieille. "On explosive waves." *C. R. Hebd. Sceances Acad. Sci.*, vol. 94, no. 2, pp. 149–152,882, 1882.

[8] Mallard, E., H.L. Chatelier. "Sur la vitesse de propagation de l'inflammationdans les m´elangesgazeuxexplosifs." *ComptesRendusAcad´emie des Sciences*. vol. 93, 1881, pp. 145-148.

[9] Mallard, E., H.L. Chatelier. "Recherches de paulvieille `a la connaissance des d´etonations et des ondes de choc.' in Annales des Mines, ser. 8th, vol. 4, 1883, pp. 274–568, 10 Plates/VIIIXVII.

[10] Roy, G.D., S.M. Frolov, A.A. Borisov, D.W. Netzer. "Pulse detonationpropulsion: challenges, current status, and future perspective." *Progress in Energyand Combustion Science*, vol. 30, 2004, pp. 545-672.

[11] Chapman, D.L. "On the rate of explosion in gases." *Philos. Magazine*, vol. 47, 1899, pp. 90–104.

[12] Rankine, W.J.M. "On the thermodynamic theory of finite longitudinal disturbance." *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 160, 1870, pp. 277-288.

[13] Hugoniot, H. "Propagation des mouvementsdans les corps et sp´ecialmentdans lesgaz parfaits (propagations of movements in bodies and especially in ideal gases)." *J. Del'Ecole Polytechn*., vol. 57, 1887, pp. 1–97.

[14] Zeldovich, J.B., K teoriraspostraneniadetonazi v gasoobrasnikhsystemakh (On the theory of the propagation of detonation in gaseous systems), ZhurnalExperimentalnoi i TeoritiskeskoiFiziki, vol. 10, pp. 543–568, 1940, English translation: NACA TM 1261, 1960.

[15] Zeldovich, J.B., Teoriagorenia i detonaziigasov (Theory of combustion and detonation of gases), Academy of Sciences, 1944, English translation: TR GDAM, Ag-T-45, Air Material Command.

[16] von Neumann, J. Progress report on the theory of detonation wave, O.S.R.D. Rept., vol. 549, 1942.

[17] D¨oring, W. “Uber dendetonationsvorgang in gasen (On thedetonation process in gases),” Annalender Physik, 5e Folge, vol. 43, 1943, pp. 421-436.

[18] Panicker, P.K. “The Development and Testing of Pulsed Detonation Engine Ground Demonstrators”, PhD. Thesis, The University of Texas at Arlington, 2008.

[19] Wintenberger, E., J.E. Shepherd. Detonation Waves and Pulse Detonation Engines, California Inistitute of Technology, Pasadena, CA91125, 2004.

[20] Kuo, K.K., *Principles of Combustion*, 2nd Ed., John Wiley and Sons, Inc., 2005.

[21] Aerodynamics Research Center, university of Texas Arlington, Website.

[22] Hekiri, H., Parametric Cycle Analysis for Pulse Detonation Engines. University of Texas at Arlington, 2005.

[۲۳] ظهیری، فؤاد، مجید سروش. "ترکیب موتور انفجار ضربه‌ای با موتور توربوفن در هواپیماها برای افزایش نیروی پیشران." دانشگاه تربیت مدرس.

[24] Panicker, P.K., K.Lu. Frank, R.D. Wilson, “Practical Methods for Reducing the Deflagration-to-Detonation Transition Length for Pulse Detonation Engines.” University of Texas Arlington, 2009.

[25] Kaneshige, M., J.E. Shepherd, “Detonation Database. Technical Report FM97-8.” GALCIT, Jul. 1997, http://www.galcit.caltech.edu/detn_db/html (accessed May 2008)

[26] Panicker P.K., D.R. Wilson, F.K. Lu, “Operational Issues Affecting the Practical Implementation of Pulse Detonation Engines, AIAA-2006-7959,” 14th AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Canberra, Australia, 6-9 Nov. 2006.

## پی‌نوشت

1. Pulse Detonation Engine (PDE)
2. Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)
3. Blackswift
4. Deflagration to Detonation Transition (DDT)
5. Chapman-Jouguet (CJ)
6. Zeldovich, von Neumann and Doring (ZND)
7. Deflagration
8. Detonation
9. Brayton Cycle
10. Homphery Cycle
11. Pure Pulse Detonation
12. Combined Cycle Pulse Detonation
13. Hybrid Pulse Detonation
14. Blockage Ratio (BR)
15. Repeatedly
16. Feedback