





# فناوری پیشرانس راکت جامد

جلد اول

مؤلف:

آلن داواناس

مترجمان:

دکتر محمدرضا سویزی

مهندس مهدی میرزایی فرد

مهندس محمدمهدی کلیدری

دکتر نگار ذکری



۱۳۹۹

عنوان و نام پدیدآور: فناوری پیشرانش راکت جامد/مؤلف [صحيح : ویراستار] آلن داواناس ؛ مترجمان محمدرضا سویزی...[و دیگران].

مشخصات نشر: تهران: شرکت هوافضای برآ، انتشارات هوانورد، ۱۳۹۹  
مشخصات ظاهری: ج.

شابک: ج. ۱: 978-622-965025-7 ؛ ج. ۲: 978-622-965027-1

وضعیت فهرست نویسی: فیپا

یادداشت: عنوان اصلی: Technologie des propergols solides.

یادداشت: کتاب از نسخه انگلیسی با عنوان Solid rocket propulsion technology به فارسی ترجمه شده است.

یادداشت: مترجمان محمدرضا سویزی ، مهدی میرزایی فرد ، محمدمهدی کلیدری ، نگار ذکری.

یادداشت: چاپ قبلی: اندیشه‌گاه فناوری‌های نوین، انتشارات، ۱۳۹۶ -

موضوع: موشک‌های سوخت جامد

موضوع: Solid propellant rockets

شناسه افزوده: داونا، آلن، ویراستار

شناسه افزوده: Davenas, Alain

شناسه افزوده: سویزی، محمدرضا، ۱۳۵۰ - ، مترجم

رده بندی کنگره: ۳ / ۷۸۳ TL

رده بندی دیویی: ۲۶ / ۶۶۲

شماره کتابشناسی ملی: ۶۲۰۹۲۴۷



عنوان کتاب: فناوری پیشرانش راکت جامد (جلد اول)

تالیف: آلن داواناس

ترجمه: دکتر محمدرضا سویزی، مهندس مهدی میرزایی فرد

مهندس محمدمهدی کلیدری، دکتر نگار ذکری

ناشر: هوانورد

نوبت چاپ: اول

سال چاپ: ۱۳۹۹

شمارگان: ۵۰۰

شابک: ۷-۵-۹۶۵۰۲-۶۲۲-۹۷۸

شابک دوره: ۴-۶-۹۶۵۰۲-۶۲۲-۹۷۸

چاپ و صحافی: نوبخت

قیمت: ۶۴۰۰۰۰ ریال

◀ کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است. نقل مطالب فقط با ذکر مشخصات کامل کتاب و با اشاره به نام ناشر مجاز است.

◀ برای تهیه این کتاب می‌توانید به وبگاه [www.aeroshop.ir](http://www.aeroshop.ir) مراجعه کنید؛

یا با شماره تلفن ۷۷۸۵۰۲۵۹ - ۰۲۱ تماس حاصل فرمائید.

## فهرست مطالب

مقدمه .....	۱۱
فصل اول- تعاریف اولیه پیشرانش برای موتورهای موشک سوخت جامد .....	۱۳
۱- اصول پیشرانش .....	۱۴
۱-۱- مقدمه .....	۱۴
۲-۱- اجزاء اصلی یک موتور موشک .....	۱۴
۲- معادلات بنیادی بالستیک داخلی .....	۲۶
۱-۲- مقدمه .....	۲۶
۲-۲- سرعت جریان گرین پیشرانه .....	۲۶
۴-۲- نقطه عملیاتی موتور موشک؛ Klemmung (نسبت سطح سوزش به سطح گلوگاه) .....	۲۷
۵-۲- معادلات مورد استفاده .....	۲۹
۶-۲- ضرایب دمایی .....	۳۰
۳- تراست موتور موشک .....	۳۱
۱-۳- ثنوری عملکرد یک نازل .....	۳۱
۲-۳- تعیین تراست .....	۳۳
۳-۳- ضریب تراست .....	۳۴
۴- ایمپالس ویژه .....	۳۶
۱-۴- مقدمه .....	۳۶
۲-۴- تعاریف و رابطه‌ها .....	۳۶
۳-۴- کاربردهای عملی .....	۳۷
۴-۴- تعیین متوسط ایمپالس ویژه استاندارد .....	۳۹
۵-۴- متوسط ایمپالس ویژه یک موتور موشک .....	۴۱
۶-۴- کارایی .....	۴۳
۵- یک نمونه خاص: رم‌جت‌ها و رم‌راکت‌ها .....	۴۴
۱-۵- کلیات: موتورهای هواتنفسی .....	۴۴
۲-۵- توصیف یک رم‌جت .....	۴۵
۳-۵- اصول عملکرد .....	۴۶
۴-۵- تعادل مسدودکننده‌های مکانیکی و حرارتی .....	۴۸
۵-۵- معادلات پیشرانش .....	۴۸
فصل دوم- طراحی گرین پیشرانه جامد .....	۵۳
۱- مقدمه .....	۵۵

۵۷	۲- بررسی هندسه گرین و پیشرانه‌های مربوطه .....
۵۷	۱-۲- پیکره بندی‌های گرین .....
۶۳	۲-۲- انتخاب پیشرانه‌ها .....
۶۹	۳- نیازمندی‌های گرین پیشرانه جامد .....
۷۱	۱-۳- نیازمندی‌های مرتبط با ویژگی‌های اصلی .....
۷۱	۲-۳- نیازمندی‌های مرتبط با شرایط عملیاتی .....
۷۲	۳-۳- خصوصیات محیط پیرامونی گرین .....
۷۵	۴- روش‌های طراحی بالستیکی و ساختاری گرین .....
۷۵	۱-۴- اطلاعات ورودی .....
۷۵	۲-۴- دستورالعمل .....
۷۷	۳-۴- آنالیز طراحی بالستیکی .....
۹۰	۴-۴- تحلیل طراحی ساختار .....
۹۸	۵-۴- طراحی اولیه گرین‌های پیشرانه با کمک کامپیوتر .....
۱۰۳	۵- سطح اطمینان گرین پیشرانه طراحی شده .....
۱۰۳	۱-۵- شیوه تحلیلی .....
۱۰۵	۲-۵- روش تجربی .....
۱۰۷	۶- موارد خاص .....
۱۰۷	۱-۶- گرین‌های پیشرانه قطعه قطعه برای پرتابه‌های فضایی .....
۱۰۹	۲-۶- بوسترهای بدون نازل .....
۱۱۱	۳-۶- گرین انتهاسوز سیم دار .....
۱۱۵	فصل سوم- پیش‌بینی و اندازه‌گیری ایمپالس ویژه .....
۱۱۶	۱- مقدمه .....
۱۱۷	۲- مدل فیزیکی .....
۱۱۷	۱-۲- توصیف مدل .....
۱۲۱	۲-۲- محدودیت‌های مدل .....
۱۲۷	۳- پیش‌بینی‌ها یا محاسبات .....
۱۲۷	۱-۳- تحقیق فرمولاسیون جدید .....
۱۲۷	۲-۳- تعیین کارایی تئوری یک موتور موشک .....
۱۲۹	۴- اندازه‌گیری ایمپالس ویژه .....
۱۲۹	۱-۴- مقدمه .....
۱۲۹	۲-۴- وسیله اندازه‌گیری تراست .....
۱۳۰	۳-۴- موتور استاندارد و موتور جدار ضخیم .....
۱۳۲	۴-۴- میدل‌های فشار .....
۱۳۲	۵-۴- گرین پیشرانه .....
۱۳۴	۶-۴- ابزارهای اندازه‌گیری .....

۱۳۵	۷-۴- تعیین پارامترهای آزمون شلیک استاتیک (تست گرم) .....
۱۳۶	۸-۴- تحلیل نتایج حاصل شده .....
۱۳۸	۹-۴- صحت اندازه‌گیری‌ها .....
۱۳۹	۵- سوخت‌های جامد برای سیستم‌های تنفسی .....
۱۳۹	۱-۵- پدیده فیزیکی .....
۱۳۹	۲-۵- مرتب کردن محاسبات .....
۱۴۰	۳-۵- انجام محاسبه .....
۱۴۱	۴-۵- روش اندازه‌گیری .....
۱۴۵	فصل چهارم- احتراق پیشرانه جامد و بالستیک داخلی موتورها .....
۱۴۶	۱- مقدمه .....
۱۴۷	۲- احتراق پیشرانه جامد .....
۱۴۷	۱-۲- سرعت سوزش .....
۱۵۲	۲-۲- مکانیسم‌های احتراق .....
۱۷۱	۳- احتراق حالت پایدار در یک موتور موشک پیشرانه جامد .....
۱۷۱	۱-۳- اصلاحات قانون سرعت سوزش مستقل از میدان آیرودینامیکی داخلی .....
۱۷۷	۲-۳- تعیین میدان جریان .....
۱۹۶	۳-۳- تغییرات بالستیک مرتبط با میدان آیرودینامیک داخلی .....
۲۰۶	۴- پدیده احتراق ناپایدار و گذرا .....
۲۰۶	۱-۴- سوزش گذرا .....
۲۰۸	۲-۴- اشتعال .....
۲۱۴	۳-۴- ناپایداری‌ها در موتورهای موشک جامد .....
۲۳۷	فصل پنجم- شعله انتهایی، تداخل با علامت (سیگنال) و اثر شعله انتهایی .....
۲۳۸	۱- مقدمه .....
۲۴۰	۲- شرح خروج جریان از یک نازل .....
۲۴۰	۱-۲- زمینه .....
۲۴۱	۲-۲- محصولات گازی .....
۲۴۲	۳-۲- دود اولیه .....
۲۴۳	۴-۲- دود ثانویه .....
۲۴۵	۵-۲- عملیات پس از سوزش شعله انتهایی .....
۲۴۷	۳- شرح روش‌های استفاده شده برای اندازه‌گیری خصوصیات شعله انتهایی و دود .....
۲۴۷	۱-۳- اندازه‌گیری تضعیف (میرائی) امواج رادار .....
۲۴۸	۲-۳- انتقال نوری در محدوده‌های مرئی و مادون قرمز .....
۲۵۰	۳-۳- اندازه‌گیری نشر مادون قرمز توسط یک شعله انتهایی .....
۲۵۱	۴- شرح روش‌های تحلیل .....

۲۵۱	۱-۴- برنامه‌های جریان .....
۲۵۳	۲-۴- برنامه‌های نوری .....
۲۵۶	۳-۴- مدل پیش بینی وجود دود ثانویه .....
۲۵۸	۵- اثر فرمولاسیون پیشرانه روی شفافیت و علامت ضعیف .....
۲۵۸	۱-۵- فرونشاندن‌های برق ناگهانی .....
۲۵۸	۲-۵- پارامترهای اثرگذاری روی انتقال رادار .....
۲۵۹	۳-۵- پارامترهای موثر بر دود اولیه .....
۲۶۱	۴-۵- پارامترهای موثر بر روی دود ثانویه .....
۲۶۵	فصل ششم- تحلیل ساختاری گرین‌های پیشرانه .....
۲۶۶	۱- مقدمه .....
۲۶۶	۱-۱- شکست ساختاری پیشرانه .....
۲۶۶	۲-۱- جدایش پیوند .....
۲۷۰	۲- توصیف بارهای مکانیکی .....
۲۷۰	۱-۲- گرین‌های متصل به بدنه .....
۲۷۴	۲-۲- گرین‌های آزاد .....
۲۷۸	۳- برخی از کلیات و تعاریف .....
۲۷۸	۱-۳- تنش‌ها و کرنش‌ها .....
۲۸۰	۲-۳- قانون رفتار: ضرایبی که باید تعیین شوند .....
۲۸۲	۳-۳- آزمونهای طراحی شده برای تعیین ضرایب .....
۲۸۷	۴-۳- انواع مختلف رفتارهای مواد .....
۲۹۰	۴- خواص ساختاری پیشرانه‌ها و پیوندهای آنها .....
۲۹۰	۱-۴- توصیف فیزیکی پیشرانه .....
۲۹۲	۲-۴- رفتار مکانیکی پیشرانه‌ها .....
۳۲۰	۳-۴- اتصالات (پیوند آستر و پیشرانه) .....
۳۲۷	۵- تعیین تنش- کرنش القاء شده .....
۳۲۷	۱-۵- خلاصه .....
۳۲۸	۲-۵- روش‌های آزمایشگاهی .....
۳۳۰	۳-۵- روش‌های عددی .....
۳۳۲	۴-۵- روش‌های تحلیلی ساده .....
۳۳۸	۵-۵- نکاتی در خصوص ضرورت تحلیل‌های تراکم‌ناپذیر .....
۳۴۵	۶- تعیین فاکتور ایمنی .....
۳۴۶	۱-۶- فاکتور ایمنی گرین‌های پیشرانه .....
۳۵۲	۲-۶- فاکتور ایمنی پیوند .....
۳۵۴	۳-۶- بررسی و اصلاح روش‌های مختلف تحلیل فاکتورهای ایمنی .....
۳۵۵	۴-۶- تعیین نیمه آزمایشگاهی فاکتور ایمنی .....



- ۳۵۷ ..... ۷- رفتار پیشرانه تحت بارهای دینامیکی
- ۳۵۷ ..... ۷-۱- دامنه‌های پایین
- ۳۵۸ ..... ۷-۲- دامنه‌های بالا
- ۳۶۰ ..... ۸- نتیجه‌گیری و آینده‌نگری



## مقدمه

در دنیای صنعتی حاضر، هر روز ما شاهد پرتاب انواع مختلفی از راکت‌ها با اهداف و کارآیی‌های گوناگون می‌باشیم. اهداف بشر از آزمایش و یا پرتاب این راکت‌ها دامنه وسیعی دارد این اهداف ممکن هست در راستای ارتقاء زندگی بشری از جمله پرتاب ماهواره‌های مخابراتی و هواشناسی و سفر به سیاره‌های دیگر و یا در راستای اهداف نظامی، دفاعی و یا تجاوزگرانه باشد. نیروی پیشرانشی این راکت‌ها در قسمت موتور آن‌ها تامین می‌شود و انرژی این موتورها با مکانیزم‌ها و تکنولوژی‌های مختلفی تامین می‌گردد. یکی از پرستفاده‌ترین تکنولوژی‌ها، استفاده از پیشراندهای جامد می‌باشد. در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی در این حوزه در دنیا و از جمله کشور ما در حال انجام می‌باشد. وجود منابع علمی قوی در این حوزه به محققین کمک خواهد نمود تا در تحقیقات مربوطه موفق‌تر عمل نمایند. یکی از منابع مهم در این حوزه کتاب *Solid Rocket Propulsion Technology* نوشته Alain Davenas می‌باشد. این کتاب را می‌توان به عنوان یکی از مراجع اساسی و کامل در حوزه موتورهای راکت جامد در نظر گرفت. روند بیان مطالب در این کتاب به گونه‌ای می‌باشد که مطالب کامل و جامعی را در انواع حوزه‌های تخصصی لازم برای طراحی و ساخت موتور راکت جامد در دسترس خوانندگان خود قرار می‌دهد. از طرفی هر متخصص می‌تواند با مراجعه به فصل(های) مربوطه و با مطالعه بخشی از کتاب نیازهای علمی و تخصصی خود را مرتفع نماید. این کتاب در دو جلد و شامل پانزده فصل ترجمه و تقدیم خوانندگان عزیز و گرامی می‌شود.

جلد اول شامل شش فصل می‌باشد. در فصل اول به بیان تعاریف اولیه پیشرانش برای موتورهای موشک سوخت جامد پرداخته می‌شود. در فصل دوم اصول طراحی گرین پیشرانده جامد بیان و در فصل سوم روش‌های پیش‌بینی و اندازه‌گیری ایمپالس ویژه موتورهای جامد بیان می‌شود. احتراق پیشرانده جامد و بالاستیک داخلی موتورهای جامد در فصل چهارم کتاب مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار می‌گیرد. اثر دود و سیگنال و همچنین اثر شعله انتهای موتور راکت جامد در رهگیری و شناسایی پرتابه‌های موتور جامد در فصل پنجم بیان می‌شود و در فصل انتهایی (فصل ششم) ساختارهای گرین‌های پیشراندهای جامد از جهت شکست، تغییرات دمایی، خواص مکانیکی و... مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جلد دوم کتاب شامل ۸ فصل می‌باشد. در فصل هفتم خصوصیات ایمنی پیشراندهای جامد و خطرات موتورهای موشک جامد مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در فصل هشتم گروه‌های اصلی پیشراندهای جامد و کاربردهای آن‌ها بیان می‌شود و هرکدام از این گروه‌ها با جزئیات

بیشتری از جمله ترکیبات و مواد اولیه، فرآیندهای تولید، خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، ایمنی و عملیاتی به همراه پایداری شیمیایی و کهولت و طول عمر آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل دهم فرمولاسیون‌های پیشراندهای کامپوزیتی به همراه روش‌های ساخت و کنترل کیفیت آنها و خصوصیات عملکردی آنها مورد بررسی قرار می‌گیرند. فصل یازدهم به بررسی پیشراندهای پیشرفته حاوی بایندر پر انرژی شامل مواد اولیه، روش‌های ساخت و تعیین خصوصیات آنها می‌پردازد. در فصل دوازدهم پیشراندهای مورد استفاده در سیستم‌های رمجت مورد بررسی قرار می‌گیرد و در فصل سیزدهم عایق‌های حرارتی، آسترها و بازدارنده‌ها بیان می‌شوند. در انتهای کتاب و در فصل چهاردهم به بررسی پیشرفت‌های متصور در آینده پیشرانش راکت‌های جامد و آینده‌نگری در این حوزه پرداخته می‌شود.

مترجمان امیدوارند که این اثر برای کلیه دانشجویان و متخصصین فعال در حوزه پیشرانش راکت‌ها یا تخصص‌های شیمی، مهندسی شیمی، مکانیک، هوافضا، مواد و... مفید واقع شود و از تمامی خوانندگان گرامی بابت وجود هرگونه کوتاهی و اشتباه عذرخواهی نموده و آماده دریافت انتقادات و پیشنهادات دوستان در جهت اصلاح و ارتقاء متن کتاب در چاپ‌های آینده می‌باشند.

با آرزوی توفیق

مترجمان

mrsovizi@mut.ac.ir

# فصل اول

## تعاريف اوليه پيشرانش

### برای موتورهای موشک سوخت جامد

## ۱- اصول پیشرانش

### ۱-۱- مقدمه

پرتاب‌های موشکی به یک نمایش برای خودنمایی تبدیل شده است. بطوریکه روزانه در روزنامه‌ها، فیلم‌ها و تلویزیون بارها تصاویر لحظات اولیه پرتاب موشک را نشان می‌دهند. یک بیننده مطلع با دیدن مقادیر زیاد گازهای آزاد شده هنگام بلند شدن موشک، رابطه بین عمل و عکس‌العمل را درک می‌کند بطوریکه این بیننده به اساس پیشرانش که رابطه بین نیروی عمل و خروج جرم است پی می‌برد.

با بیان یک رابطه و استفاده از آن برای موشک‌ها، این اصل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F = q \cdot Ve$$

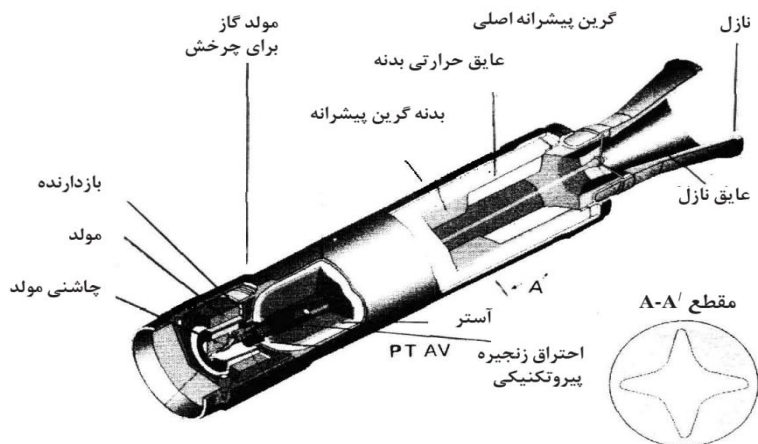
در این رابطه  $F$  نیروی عمل می‌باشد که آن را نیروی پیشران<sup>۱</sup> می‌نامند،  $q$  دبی جرمی جریان گاز و  $Ve$  سرعت خارج شدن گازها می‌باشد. منبعی که می‌تواند حجم زیادی از گاز را در طی زمان پرتاب موشک تولید کند هر بیننده‌ای را شگفت زده خواهد کرد. با کمی دقت می‌توان مفهوم موشک‌های سوخت جامد را با در نظر گرفتن سوزش یک توده جامد درون موشک متصور شد.

### ۱-۲- اجزاء اصلی یک موتور موشک

موتور موشک (شکل ۱-۱) برای تامین احتراق تحت فشار، گرین پیشرانه‌ای که حمل می‌کند طراحی می‌شود. گازهای تولید شده از طریق یک نازل منبسط می‌شوند که وظیفه آن تبدیل فشار به خروجی مافوق صوت است. در حالت کلی، چنین موتور موشکی دارای ۵ جزء اصلی است.

---

1 Thrust



شکل ۱-۱- نمونه‌ای از موتور موشک

### ۱-۲-۱- بدنه

معمولاً بدنه از فلز (فولادهای مقاوم) یا از مواد کامپوزیتی با پیچش الیاف (شیشه Kevlar، کربن) ساخته می‌شود، بدنه باید فشار داخلی در حدود ۲۵-۳ MPa، حاصل از عملکرد موتور را با ضریب اطمینان کافی که در اغلب موارد ۴ است تحمل کند.

### ۱-۲-۱-۱- موشک‌های بالستیک و پرتاب‌کننده‌های فضایی

در مورد موشک‌های بالستیک و پرتاب‌کننده‌های فضایی فناوری‌های صنعتی ویژه‌ای برای ساخت بدنه‌هایی با حجم داخلی بیش از ۱۰ متر مکعب توسعه یافته‌اند.

### الف) بدنه‌های فلزی

انواع مختلفی از فولاد برای بدنه‌های فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرند (مثال AMS 6487 یا AMS 6520) که ویژگی اصلی آنها مقاومت مکانیکی بالا به طور معمول بیش از ۱۰۰۰ MPa و سهولت شکل‌دهی آنها می‌باشد.

در مورد بدنه سیلندری، دو روش تولیدی استفاده می‌شود:

- روش رول - جوش : این روش در ورقه‌های فولادی بلند که نیازمند جوشکاری طولی هستند استفاده می‌شود.
- تراشکاری فولاد خام فورج شده (flow turning): این روش برای جلوگیری از معایب جوش و ارائه امکان افزایش ضخامت استفاده می‌شود.

روش استفاده شده در تولید بدنه‌های ته بند شامل ماشین کاری فولاد فورج عملیات حرارتی شده است. برای جابجایی و برای اتصال بین بخش‌های مختلف یک قطعه فولادی سخت از روش شیپار زنی استفاده می‌شود. بدنه‌های ته بند و استوانه‌ای به یکدیگر جوش داده