

طراحی موتور سوخت جامد آزمایشگاهی و مطالعه تجربی پراکندگی ضربه ویژه سوخت جامد دوپایه

نقی آقازاده علی بیگلر^{۱*}، علی اکبر شکریان^۲، بهروز رزاقی^۳، میثم باهنر^۴

تهران - سازمان صنایع دفاع - صنایع شهید باقری

*a_naqe@yahoo.com

چکیده

تعیین ضربه ویژه هر سوخت از اهمیت خاص خود برخوردار است به گونه‌ای که برای طراحی هر موتور، مشخص بودن مقدار ضربه ویژه بسیاری از پارامترهای طراحی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این مقاله به تعیین ضربه ویژه سوخت، با استفاده از آزمایش تجربی پرداخته شده است. با توجه به تجربه بدلیل تنوع طراحی موتور با یک نوع سوخت، مقادیر متفاوت ضربه ویژه بدست خواهد آمد. در این تحقیق موتوری با مشخصات معین و تعریف شده بنام موتور استاندارد طراحی و ساخته شده است. این موتور جهت تعیین ضربه ویژه یک نوع سوخت جامد دوپایه مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از این موتور برای مقایسه ضربه ویژه سوخت‌ها با یکدیگر قابل استفاده خواهد بود. در این مقاله مشخصات موتور آزمایشگاهی، تجهیزات اندازه‌گیری و نتایج تجربی ارائه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، با انجام چند آزمایش می‌توان ضربه ویژه سوخت و پراکندگی آنرا با دقت خوبی می‌شود بدست آورد. همچنین این مطالعه نشان می‌دهد پراکندگی ضربه ویژه سوخت سهم مهمی در پراکندگی نقاط اصابت راکت دارد.

واژه‌های کلیدی: ضربه ویژه - موتور استاندارد - سوخت جامد

۱- مقدمه

در طراحی موتورهای سوخت جامد داشتن خصوصیات ترموفیزیکی سوخت و بخصوص انرژی نهفته آن حائز اهمیت می‌باشد. در واقع انرژی نهفته در سوخت همان توانایی کار آن می‌باشد. البته لازم به ذکر است که نحوه آزاد سازی و مهار این انرژی نیز به نوبه خود از اهمیت خاصی برخوردار است به گونه‌ای که اگر سوخت در محیط سوزانده شود بجای آزادسازی مقداری گرما و نور مزیت دیگری نخواهد داشت. اما اگر به صورت هوشمند همان سوخت در موتوری با طرح مناسب قرار داده شود، انرژی سوخت به نیروی جلوبرندگی (تراست) قابل ملاحظه‌ای تبدیل خواهد شد بنابراین ضربه ویژه‌ی یک سوخت حاکی از ارزش تراست دهی آن سوخت می‌باشد به این صورت که هرچقدر ضربه ویژه‌ی سوخت بیشتر باشد یعنی اینکه با مقدار جرم سوخت کمتری می‌توان تراست بزرگ‌تری گرفت. البته مناسب یا نامناسب بودن طرح موتور بر مقدار توان مفید تحویلی در ازای مقدار معینی سوخت تاثیر گذار خواهد بود. لذا هدف از این تحقیق شناسایی انرژی نهفته در سوخت‌های جامد است.

۱- کارشناس ارشد هوافضا

۲- دانشجوی دکتری هوافضا

۳- کارشناس ارشد هوافضا

۴- کارشناس ارشد هوافضا

با انجام تعدادی آزمایش تجربی برای یک سوخت با ترکیبات ثابت و اندازه‌گیری توان مفید تحویلی، مقدار انرژی آن که بنام ضربه ویژه شناخته می‌شود محاسبه خواهد شد. مشکل عمده این روش وارد شدن واسطه‌هایی مانند موتور در تعیین این پارامتر خواهد بود که باعث تنوع مقادیر بدست آمده خواهد شد. لذا برای به حداقل رساندن اثر موتور در تعیین ضربه ویژه و استخراج مبنایی برای مقایسه موتورهای مختلف با یکدیگر لازم است که شرایط مورد توافق و برابری را برای تمامی اینگونه آزمایش‌ها تعریف شوند که این تعریف منجر به معرفی موتور استاندارد شده است. در واقع موتور استاندارد، موتوری با خصوصیات توافق شده است. شایان ذکر است که سوخت استفاده شده از نوع دویایه بوده و می‌توان همین روش را برای سوخت‌های مرکب نیز به کار برد.

۲- خصوصیات موتور استاندارد

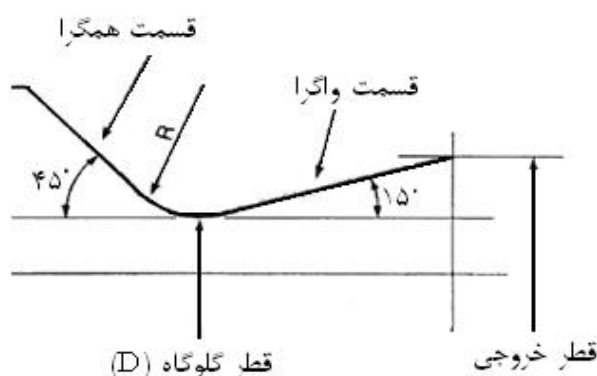
موتور استاندارد دارای ابعاد هندسی و شرایط مشخص و طراحی ویژه‌ای است و نحوه سوزش سوخت درون موتور نیز کنترل شده است. موتور استاندارد مانند یک موتور سوخت جامد از اجزای اصلی از جمله بدنه موتور، مجموعه نازل (همگرا، گلوگاه و واگرا) درپوش نازل، پایه نگهدارنده سوخت و آتش‌زنه تشکیل شده است. در طراحی هرکدام از اجزای موتور استاندارد باید ملاحظات مورد نظر قرار گیرد که در ذیل به آنها اشاره شده است [۱]:

ملاحظات همگرای نازل:

۱. از مواد مقاوم در برابر حرارت ساخته شود؛
 ۲. زاویه همگرایی آن ۴۵ درجه باشد؛
 ۳. در درون آن به ویژه در محل اتصال به گلوگاه هیچگونه ناپیوستگی وجود نداشته باشد؛
 ۴. سطح داخلی آن حتی‌المقدور صاف باشد.
- ملاحظات گلوگاه نازل:
۱. از مواد مقاوم در برابر خوردگی ساخته شود؛
 ۲. در محل اتصال نازل همگرا به گلوگاه، شعاع انحناء گلوگاه باید بزرگتر از قطر گلوگاه $R > D$ باشد (شکل ۱)؛
 ۳. قطر گلوگاه بر اساس ابعاد گرین، ترکیبات سوخت و فشار خواسته شده تعیین شود؛

ملاحظات واگرایی نازل:

۱. غالباً از مواد مرکب ساخته می‌شود؛
۲. زاویه واگرایی آن ۱۵ درجه باشد؛
۳. اندازه سطح مقطع خروجی نازل بگونه‌ای باشد تا انبساط در نازل بهینه باشد.

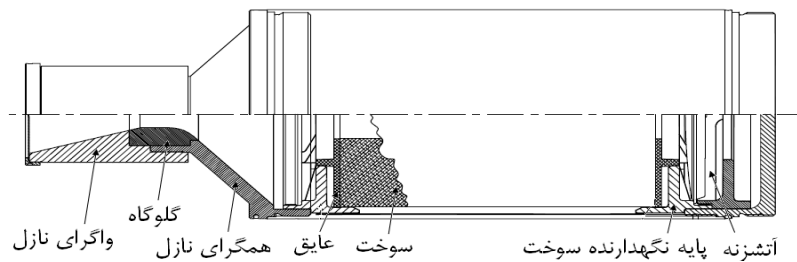


شکل ۱- پروفیل داخلی نازل موتور استاندارد

- در انتخاب شکل هندسی گرین و نحوه‌ی سوزش آن عوامل زیر در نظر گرفته می‌شود:
۱. سطح سوزش بایستی مستقل از زمان سوزش باشد؛ یعنی اینکه منحنی فشار-زمان به صورت یک تابع پله‌ای عمل کند (صعود سریع، مقدار ثابت تا انتهای سوزش، نزول سریع).
 ۲. سطح سوزش گرین باید در تمامی لحظات سوزش قابل محاسبه باشد.
- دما و فشار در اندازه‌گیری مشخصات موتور، اثر می‌گذارند. به همین دلیل آزمایش‌ها در دمای کنترل شده و فشار مشخص صورت می‌گیرند. فشار عملکرد موتور برابر ۷۰ بار (۱۰۰۰ psi) در دمای سوخت ۱۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است [۲].

۳- معرفی موتور استاندارد طراحی شده

هدف اصلی انجام پروژه فعلی ساخت موتوری برای اندازه‌گیری ضربه مخصوص یک نوع سوخت دوطایه است. این سوخت به روش اکسترودی تولید شده و بصورت کارتریجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در انتخاب ابعاد موتور، این نکته مهم است که اگر اندازه گرین کوچک باشد، اثر حجم خالی موتور افزایش یافته و از طرفی سطح زیر منحنی کاهش می‌یابد. این موارد موجب کاهش دقت در اندازه‌گیری می‌شود. از طرف دیگر با افزایش ابعاد گرین، هزینه آزمایشات بالا می‌رود. قبلاً تجربه موتورهای استاندارد با وزن‌های گرین ۱۰۰ گرم و یک کیلوگرم وجود داشته [۲] و با توجه به نتایج آنها و محدودیت‌ها و نوع مسئله تعریف شده، گرین با قطر نزدیک به ۳۰۰ و طول حدود ۴۴۰ میلیمتر انتخاب شد. این گرین به شکل استوانه بوده و سطوح ابتدا و انتهای عایق شده‌اند. موتور به گونه‌ای طراحی شده که تحمل فشار با ضریب اطمینان بالایی را داشته و در دفعات متعدد قابل استفاده باشد. این موضوع شامل نازل‌های همگرا و واگرا نیز می‌باشد. البته قسمت گلوگاه نازل به صورتی طراحی شد که پس از هر آزمایش قابل تعویض باشد تا خوردگی احتمالی بر نتیجه آزمایش اثر نگذارد. برای آنکه محصولات احتراق به صورت خالص‌تر در موتور جریان یابند و اثر مواد جانبی کمتر باشد، در طراحی موتور از عایق داخلی استفاده نشده است. آتش‌زنه موتور از نوع پیروتکنیک بوده و شامل باروت سیاه با دانه‌بندی‌های مختلف است که یک زنجیره آتش را تشکیل می‌دهند. شروع کننده این زنجیره نیز چاشنی از نوع پیل الکتریکی است. آتش‌زنه به گونه‌ای طراحی شده است که با کمترین اثرات شوک اضافی، موتور را روشن نماید. شکل ۲ نشان دهنده‌ی قطعات و نمای مونتاژی این موتور می‌باشد.



شکل ۲- موتور استاندارد طراحی شده

بنابراین موتور طراحی شده بر اساس فرضیات ذیل استوار است:

۱. سطح گلگاه نازل در طول آزمایش ثابت است؛
۲. گرین استوانه درون بیرونسوز بوده و از دو سر عایق بندی شده است؛
۳. ابعاد گرین طوری انتخاب می شود که سوزش فرسایشی بوجود نیاید [۳]؛
۴. تمام سطح گرین به طور یکنواخت مشتعل می شود؛
۵. گرین به صورت یک تکه تولید و به خوبی عایق کاری شده است. گرین باید بدون ترک، سوراخ، زبری و حباب ساخته شود تا در سطح سوزش اختلالی ایجاد ننماید.

۴- اندازه گیری جرم سوخت

دقت کمیت اندازه گیری شده تابع دقت اندازه گیری جرم سوخت و مقدار تراست موتور است. به همین دلیل میزان دقت از اهمیت بالایی برخوردار است. برای اندازه گیری جرم گرین های سوخت جامد از یک ترازوی دیجیتالی با ظرفیت کلی ۱۰۰ کیلوگرم استفاده شد. این ترازو قبل از اندازه گیری و در محل مورد نظر به دقت تراز شده و با استفاده از وزنه های استاندارد دقیق، کالیبره شد. دقت اندازه گیری جرم با این ترازو ۲۰ گرم می باشد.

۵- سیستم اخذ و ثبت اطلاعات

اطلاعات ثبت شده از عملکرد موتور عبارتند از فشار محفظه و تراست موتور. سیستم داده برداری شامل سنسور فشار، لودسل، تقویت کننده، کابل های انتقال، ترمینال خارجی و کارت آنالوگ به دیجیتال (A/D) داخلی است (شکل ۳).



شکل ۳- سیستم داده برداری

سنسور فشار از نوع دو سیم BD با دامنه ۱۶۰ بار است. لودسل مورد استفاده از نوع HBM-C2 با دامنه ۵ تن می باشد. مسیر مربوط به سنسور فشار نیازی به تقویت کننده نداشته و در مسیر مربوط به لوسل از تقویت کننده آدام ADAM-3016 مربوط به شرکت ادونتک (Advantech) استفاده شده است. ترمینال خارجی وظیفه دسته بندی و هدایت اطلاعات به کارت داده برداری را بر عهده دارد. کارت داده برداری مورد استفاده PCI-1713 مربوط به شرکت ادونتک بوده که به صورت داخلی و بر روی مادربرد کامپیوتر قرار می گیرد. کامپیوتر مورد استفاده یک پنتیوم ۴ است. نرم افزار مورد استفاده جهت کنترل کارت در محیط دلفی نوشته شده است.

نرم افزار به گونه ای نوشته شده است که قابلیت کالیبراسیون سنسورهای مختلف روی مسیرهای مختلف در آن وجود دارد. سیستم کالیبراسیون فشار، یک سیستم هیدرولیکی است که می تواند فشارهای استاتیکی تا ۴۰۰ بار را ایجاد کند. اندازه گیری فشار در این سیستم توسط فشارسنج های مرجع با دقت ۰/۲ بار انجام می شود. بنابراین عدم قطعیت اندازه گیری فشار در این آزمایش ها ۱/۵ بار می باشد. سیستم کالیبراسیون نیرو یک سیستم پرس هیدرولیکی دستی است که قابلیت ایجاد نیروی معادل ۱۰۰۰۰ کیلوگرم نیرو را داراست. اندازه گیری نیروی مرجع در این سیستم توسط یک لودسل مرجع که به نشان دهنده الکترونیکی متصل است انجام می شود. لودسل مرجع از رده C3 بوده و خود در آزمایشگاه استاندارد در مقایسه با یک مرجع رده C4 کالیبره می شود. بنابراین عدم قطعیت اندازه گیری نیرو ۱۵ گیلوگرم نیرو است.

۶- نحوه انجام آزمایش ها

دمای اولیه گرین در نرخ سوزش و در نتیجه در منحنی عملکرد موتور اثر می گذارد به همین دلیل برای انجام آزمایش ها، لازم است تا موتورها در شرایط دمایی دقیق و کنترل شده قرار گیرند. بدین منظور تمام موتورها از حدود ۲۴ ساعت قبل از انجام آزمایش در محفظه شرایط دمایی قرار گرفته و دمای محفظه برای دمای عملکرد مورد نظر تنظیم شدند. یکی از مسائل مهم در این قسمت، اطمینان از همدمای شدن تمام نقاط گرین است.

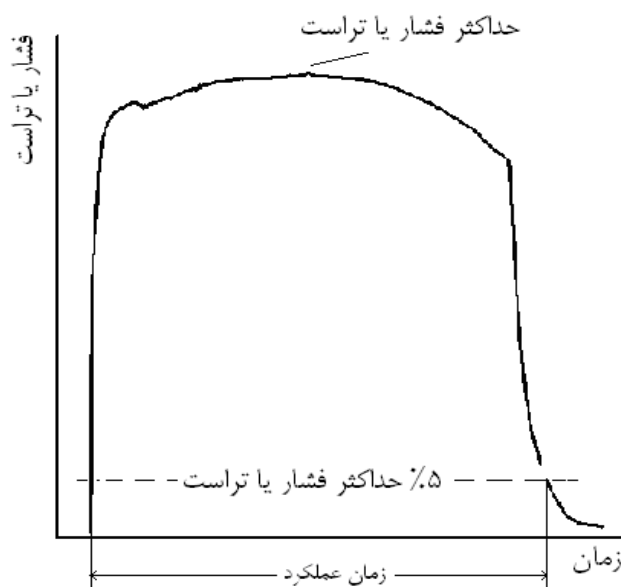
با خروج موتور از محفظه دما و انتقال به سکو، ممکن انتقال حرارت میان محیط و موتور صورت پذیرد. برای حل این مشکلات، یک موتور مشابه موتور اصلی (بدون آتش زنه) ساخته و مونتاژ شد. دو عدد ترموکوپل داخل موتور قرار گرفت. یکی از ترموکوپل ها داخل حفره ای در قسمت میانی گرین و دیگری در فضای داخلی موتور مستقر شدند. کابل ترموکوپل ها از درپوش نازل خارج شده و محل عبور کابل کاملاً آب بندی شد. این موتور همراه با موتور اصلی درون محفظه شرایط دمایی قرار گرفته و

در زمان انتقال به سکو، همراه آن حمل می‌گردد. بدین ترتیب در زمان خروج موتور از محفظه و لحظه قبل از تست، دمای فضای داخلی موتور و دمای عمق گرین اندازه‌گیری می‌شود.

هریک از موتورهای پس از کنترل دمایی اولیه از محفظه خارج شده و در سریع‌ترین زمان ممکن به سکو منتقل می‌شوند. نکته مهم در بارگذاری موتور در سکو، توجه به هم‌محوری موتور با لودسل است. برای این موضوع نیز تمهیدات خاصی از قبل در نظر گرفته شده است. برای این موتورها، فاصله زمانی خروج موتور از سکو تا انجام آزمایش حداکثر ۲۰ دقیقه در نظر گرفته شده است.

۷- بررسی نتایج آزمایش

نمودارهای تراست زمان و فشار زمان حاصل از آزمایش ایستای موتور باید هموارسازی اولیه شود و نویزهای موجود در نتایج خام حذف شود. با توجه به شکل ۴ فاصله بین زمانی که فشار به ۵ درصد فشار ماکزیمم در افزایش فشار اولیه می‌رسد، تا محل مشابه در زمان تخلیه، زمان عملکرد موتور نامیده می‌شود. با بررسی‌های گاز دینامیکی انجام شده اگر فشار کمتر از این فشار باشد گلوگاه نازل در حالت خفه نخواهد بود.



شکل ۴- نمودار فشار یا تراست - زمان موتور استاندارد

مقدار انتگرال تراست زمان در طی زمان عملکرد ضربه کل موتور تعریف می‌شود.

$$I_t = \int_{t_b}^{t_e} T dt \quad (1)$$

که t_b زمانی است که در ابتدای کار موتور فشار به ۰/۳۷ مگاپاسکال (۵ درصد فشار ماکزیمم) می‌رسد و t_e زمانی است که در انتهای کار موتور فشار به ۰/۳۷ مگاپاسکال مطابق شکل ۴ می‌رسد. فاصله زمانی بین دو زمان فوق به عنوان زمان عملکرد موتور t_a بیان می‌شود.

$$t_a = t_e - t_b \quad (2)$$

ضربه ویژه برابر ضربه کل بر واحد وزن سوخت تعریف می‌شود.

$$I_{sp} = \frac{I_t}{M} \quad (3)$$

فشار و تراست متوسط محفظه در طول زمان عملکرد موتور از رابطه زیر بدست می‌آیند.

$$P_{av} = \frac{\int_{t_b}^{t_e} P dt}{t_a} \quad (4)$$

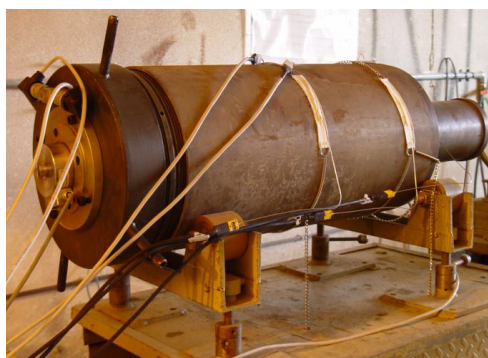
$$T_{av} = \frac{\int_{t_b}^{t_e} T dt}{t_a}$$

انحراف معیار مهمترین کمیت متداول در اندازه‌گیری پراکندگی می‌باشد. این پارامتر از دیدگاه عددی برابر مجذور مقدار واریانس است که در مورد یک نمونه آماری با s نشان داده می‌شود.

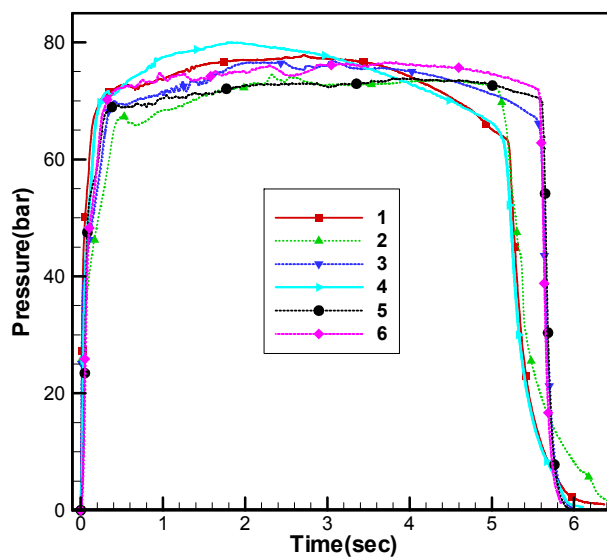
$$s = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

در این رابطه $\bar{x}$ میانگین نمونه آماری n تایی می‌باشد.

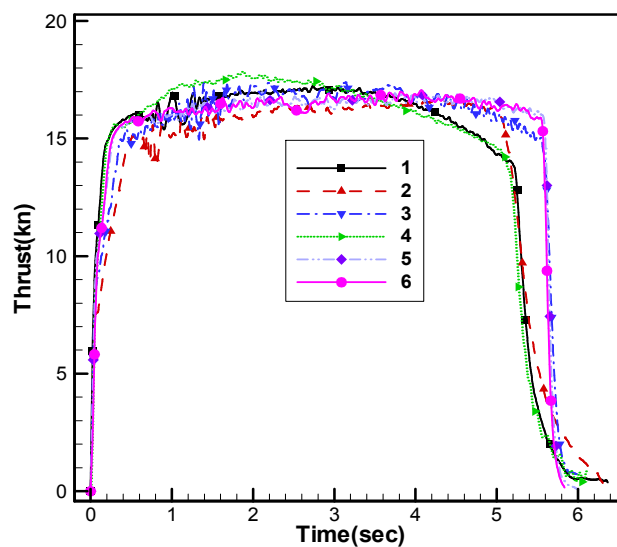
پس از ساخت و راه اندازی موتور تعدادی آزمایش انجام گرفت (شکل ۵) و براساس آنها مقدار ضربه ویژه سوخت به صورت تجربی محاسبه گردید در شکل‌های ۶ و ۷ نمودارهای آزمایش ایستا و جدول ۱ برخی از پارامترهای عملکردی موتور ارائه شده است. مقدار پراکندگی که از اندازه‌گیری ضربه ویژه سوخت جامد دوپایه استخراج شد، برابر ۲/۴ ثانیه می‌باشد. پراکندگی سایر پارامترهای عملکردی موتور نیز در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۵- موتور در حال آزمایش



شکل ۶- نمودار فشار - زمان آزمایش‌های ایستا



شکل ۷- نمودار تراست - زمان آزمایش‌های ایستا

جدول ۱- داده‌های استخراج شده از آزمایش چند موتور استاندارد

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	متوسط	انحراف معیار (پراکندگی)
ضربه کل (KN.S)	۸۶/۸۶	۸۴/۸۶	۹۱/۰۱	۸۷/۰۶	۹۱/۱۵	۹۰/۷۸	۸۸/۶۲	۲/۴۶
ضربه ویژه (S)	۲۰۳/۶	۲۰۱	۲۰۸/۱	۲۰۴/۳	۲۰۷/۱	۲۰۶/۴	۲۰۵/۹	۲/۴
فشار متوسط (bar)	۶۹/۱	۶۳/۵	۷۰/۹	۶۹/۶	۷۰/۱	۷۲/۶	۶۹/۳	۲/۸۱
تراست متوسط (KN)	۱۴/۹۵	۱۳/۷۲	۱۵/۵۶	۱۵	۱۵/۸۲	۱۵/۵۹	۱۵/۱۱	۰/۷

وزن سوخت (kg)	۴۳/۵	۴۳/۰۵	۴۴/۶	۴۳/۴۵	۴۴/۸۸	۴۴/۸۵	-
دمای عملکردی (°C)	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	-

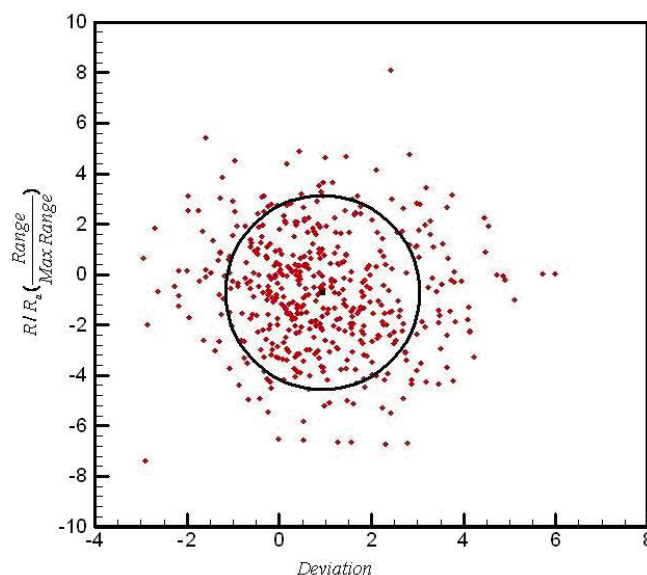
۸- بررسی اثر پراکندگی ضربه ویژه موتور در پراکندگی نقاط اصابت راکت

از مهمترین خطاهای تصادفی که باعث افزایش پراکندگی نقاط اصابت راکت می شود خطای (پراکندگی) ضربه ویژه می باشد. خطای ضربه ویژه با تغییر سرعت لحظه خاموشی موتور باعث ایجاد خطا در سرعت راکت و در نهایت منجر به پراکندگی نقاط اصابت راکت می شود. از جمله مواردی که باعث پراکندگی ضربه ویژه موتور می شود عبارتند از :

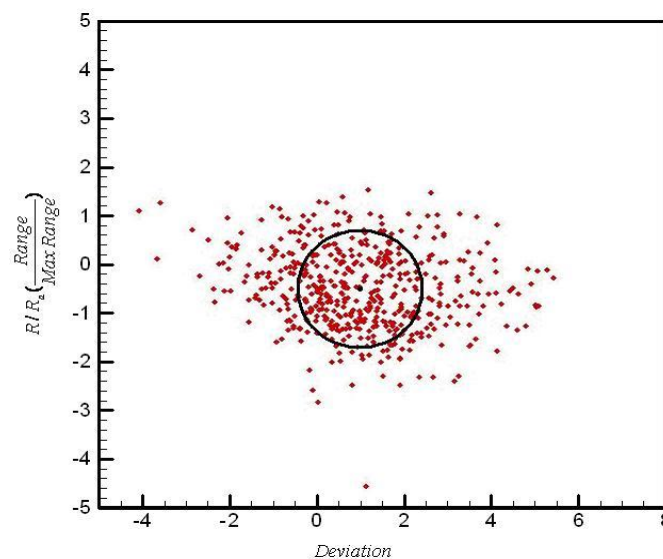
۱. تغییر ضربه ویژه سوخت بر اثر تغییر ترکیب شیمیایی سوخت و شرایط محیطی حاکم بر سوخت؛

۲. تغییر کمیت های هندسی نظیر قطر گلوگاه و خروجی نازل و غیره.

پراکندگی نقاط اصابت یک راکت با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو در شکل ۷ ارائه شده است [۴]. با حذف مقدار پراکندگی ضربه ویژه موتور (۲/۴ ثانیه) که از نتایج آزمایش موتور استاندارد بدست آمده است، پراکندگی نقاط اصابت این راکت در حدود ۱ درصد کاهش می یابد. مقایسه دو شکل ۷ و ۸ بیانگر اثر قابل توجه پراکندگی ضربه سوخت بر پراکندگی اصابت می باشد.



شکل ۷- پراکندگی نقاط اصابت راکت



شکل ۸- پراکندگی نقاط اصابت راکت در اثر حذف خطای ضربه ویژه

۹- نتیجه گیری

با استفاده از موتور استاندارد می‌توان ضربه ویژه سوخت و پراکندگی آن را با دقت خوبی بدست آورد. میزان دقت سیستم داده برداری، ترازو، شرایط دمایی سوخت، بارگذاری موتور در سکوی آزمایش ایستا و تثبیت ابعاد نازل اهمیت فراوانی در رسیدن به دقت قابل قبول برای اندازه‌گیری ضربه ویژه دارد. حداکثر پراکندگی ضربه ویژه‌ای که از این آزمایش‌ها برای سوخت دوپایه مورد نظر بدست آمد ۲/۴ ثانیه است.

مراجع

- 1- A. Davenas, "Solid Rocket Propulsion Technology", Frist Edition, 1993.
- ۲- سلمانیان، ع.، "موتور استاندارد سوخت جامد"، دومین کنفرانس علمی کاربردی صنایع هوافضا دی ۱۳۸۲.
- 3- M. Milos and V. Bozic, "Small Motor Measurement Method for Determining Burning Rate of Solid Rocket Propellants", AIAA-98-3390
- ۴- اسماعیل فیینی، م.، "حساسیت سنجی راکت نسبت به پارامتر خطا و تعیین CEP"، کد SR75-TR18، سازمان صنایع دفاع، تابستان ۸۷.