

# Experimental Analysis of Pyroshock Wave Propagation in Kavoshgar's Payload

M. Tahaye Abadi<sup>1\*</sup>, M. AlizadehYazdi<sup>2</sup>, M. A. Farsi<sup>3</sup> and M. Ebrahimi<sup>4</sup>

1- 4. Astronautics Research Institute, Iranian Space Research Center

\*Postal Code: 1465774111, Tehran, IRAN

**abadi@ari.ac.ir**

*The paper concerns with the experimental analysis of the pyroshock wave propagation in the structure of Kavoshgar's payload on the ground. The source of waves is the explosion of pyrotechnic material acting as the actuator of separation mechanism for the payload subsystems. The shock sensors are attached in different locations of structure to measure the acceleration amplitude along three orthogonal directions after the activation of pyrotechnic material. The experimental setup is used for measurement of the acceleration history as well as the evaluation of the shock response spectrum at specific locations during two-stage separation of payload subsystems. The experimental acceleration record is evaluated to eliminate the noise signals and incorrect data. The variations of shock response at different payload locations are evaluated to determine the amplitude attenuation of the wave passing through the structure body and joints. The measured data are also employed to determine the working condition and design criteria for the equipment of Kavoshgar payload.*

**Keywords:** Pyroshock, Experimental analysis, Pyrotechnic material, Shock response spectrum, Kavoshgar payload

---

1. Associate Professor (Corresponding Author)

2. M. Sc.

3. Assistant Professor

4. Assistant Professor

# تحلیل آزمایشگاهی انتشار امواج پیرو شوک در کاوشگر فضایی

محمد طاهای ابدی<sup>۱\*</sup>، مهدی عزیزاده یزدی<sup>۲</sup>، محمدعلی فارسی<sup>۳</sup> و محمد ابراهیمی<sup>۴</sup>

۱-۴- پژوهشکده سامانه‌های فضاوردی، پژوهشگاه فضایی ایران

\*تهران، کد پستی: ۱۴۶۵۷۷۴۱۱۱

abadi@ari.ac.ir

انتشار امواج پیرو شوک ناشی از انفجار مواد پیروتکنیک برای جداسازی سامانه‌های کاوشگر فضایی با انجام آزمایش‌هایی در سطح زمین بررسی می‌شود. حسگرهای شوک در نقاط مختلف سازه کاوشگر نصب می‌شود تا مقدار دامنه شتاب دریافتی در سه راستای عمود برهم پس از فعال‌سازی مواد پیروتکنیک اندازه‌گیری کنند. پس از معرفی تجهیزات لازم برای انجام آزمایش و بیان روش آزمایشگاهی، نتایج داده‌برداری حسگرهای شوک در نقاط مختلف در حوزه زمان و طیف پاسخ شوک در آزمایش‌های جدایش سامانه‌های کاوشگر با استفاده از انفجار مواد پیروتکنیک ارائه می‌شود. مقادیر ثبت‌شده در حسگرهای مختلف برای صحنه‌گذاری با سه معیار مختلف ارزیابی بررسی می‌شود. روند تغییرات شوک در نواحی مختلف سازه و در سامانه‌های مختلف کاوشگر براساس فاصله از محل انفجار و نوع اتصالات در مسیر انتشار امواج ارزیابی می‌شود. نتایج ثبت‌شده با حسگرهای شوک در محل نصب تجهیزات حساس کاوشگر برای استخراج شرایط کاری تجهیزات و عملکرد آنها با تعیین شتاب اعمالی و حداکثر شتاب مجاز اعمالی به این تجهیزات استفاده می‌شود تا به‌عنوان معیاری برای ارزیابی طرح و انتخاب اجزای کاوشگر فضایی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: پیرو شوک، تحلیل آزمایشگاهی، مواد پیروتکنیک، طیف پاسخ شوک، کاوشگر فضایی

## مقدمه

تجهیزات پیروتکنیک متعددی در وسایل فضایی به عنوان عملگر برای جداسازی برخی از زیرسامانه‌ها در مسیر حرکت و مستقر کردن تجهیزات جانبی در طول مسیر پرواز استفاده می‌شود. تحریک مواد پیروتکنیک امواجی در وسایل فضایی منتشر می‌کنند که در مدت زمان کمی حداکثر تا ۲۰ میلی‌ثانیه اعمالی می‌شود ولی دارای فرکانس بسیار بالا و تا مقدار ۲ مگاهرتز و شتاب تا مقدار ۳ میلیون متر بر مجذور ثانیه در نواحی نزدیک به محل انفجار است [۱-۳].

این امواج اصطلاحاً امواج پیرو شوک<sup>۵</sup> نامیده می‌شوند و بیانگر پاسخ سازه تحت اثر بارگذاری ناشی از انفجار مواد پیروتکنیک متصل به سازه است. شدت و فرکانس امواج پیرو شوک وابسته به نوع منبع شوک، اندازه و قدرت آن، هندسه و جنس مواد در مسیر انتقال شوک، پیکربندی و نوع اتصال تجهیزات در مسیر انتشار امواج و فاصله از منبع تا نقطه مورد نظر است [۴-۵]. بررسی علت شکست برخی از تجهیزات فضایی نشان داده است [۶] فرکانس و شدت بالای امواج پیرو شوک ممکن است موجب آسیب برخی از اجزای سخت‌افزاری و تجهیزات در مسیر انتشار امواج شوند، در حالی که همین اجزا می‌توانند در برابر تحریک‌های متناوب با دامنه و فرکانس پایین و ارتعاشات تصادفی عملکرد مناسبی داشته باشند. قبل از استفاده از تجهیزات در وسایل فضایی نیاز است آزمایش‌های

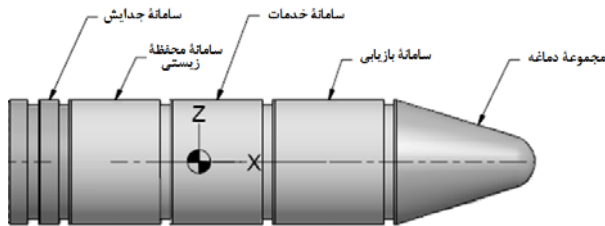
۱. دانشیار (نویسنده مخاطب)

۲. کارشناس ارشد

۳. استادیار

۴. استادیار

می‌شود تا سرعت کاوشگر در لحظه برخورد به زمین به مقدار زیادی کاهش یابد. شکل (۱) نقشه دید عمومی کاوشگر فضایی و قسمت‌های اصلی را نشان می‌دهد که از اتصال پنج قسمت اصلی شامل مجموعه دماغه، سامانه بازیابی، سامانه خدمات، سامانه زیستی و سامانه جدایش تشکیل شده است. دماغه در نوک کاوشگر برای ایجاد سطح آیرودینامیک مناسب نصب می‌شود و سامانه جدایش در انتهای کاوشگر برای جدایش کاوشگر از موتور در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- نقشه دید عمومی کاوشگر فضایی

دماغه کاوشگر فضایی مطابق با شکل (۱) به صورت مخروط ناقص است که قاعده کوچک آن مماس بر سطح کره و قاعده بزرگ آن به قسمت استوانه‌ای متصل است. مواد پیروتکنیک سیستم جدایش دماغه به صورت کمر بند انفجاری است که در داخل قسمت استوانه‌ای دماغه قرار داده می‌شود و با ارسال فرمان الکتریکی، مقطع کاملی از پوسته استوانه‌ای بریده می‌شود. در داخل دماغه فنرهایی قرار دارد که پیش‌بار اولیه دارند و قسمت مخروطی دماغه به وسیله نیروی پیش‌بار این فنرها پس از برش قسمت استوانه‌ای از کاوشگر دور می‌شود. سامانه جدایش مشابه با دماغه دارای کمر بند انفجاری است که در سطح داخل آن نصب می‌شود و با فرمان الکتریکی تحریک می‌شود. بدنه استوانه‌ای جدایش به وسیله انرژی احتراق مواد پیروتکنیک داخل کمر بند انفجاری بریده می‌شود و کاوشگر در اثر نیروی پیش‌بار فنرهای داخل سامانه جدایش از موتور دور می‌شود.

### هدف از آزمایش پیروشوک

انفجار مواد پیروتکنیک، شوک با سطح شتاب و فرکانسی بالایی را ایجاد می‌کند که در صورت توجه نکردن به این سطوح، ممکن است اثرات مخرب آن به شکست مأموریت پروازی منجر شود. امواج پیروشوک ممکن است اثرات مخرب بر تجهیزات حساس الکتریکی و مکانیکی داشته باشد و احتمال دارد موجب تخریب مکانیکی اجزای حساس، اختلال سخت‌افزاری در تجهیزات الکتریکی، یا عملکرد نامناسب تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی شود. انتشار

پیروشوک بر روی اجزای حساس انجام شود تا عملکرد آنها در شتاب و فرکانس بالا ارزیابی شود. تاکنون مدل‌های فراوانی برای تعیین یا برآورد اولیه پاسخ پیروشوک سازه‌های فضایی تحت اثر انفجار مواد پیروتکنیک توسعه داده شده است که مهم‌ترین آنها تحلیل اجزای محدود [۷-۸]، تحلیل انرژی آماری [۹-۱۱] و هیدروکدها [۱۲] است. فرکانس بالای امواج موجب پیچیدگی تحلیل و محاسبه پاسخ تجهیزات می‌شود و تاکنون روش تحلیلی خاصی برای تعیین پاسخ پیروشوک سازه در شرایط مختلف معرفی نشده است که نتایج آنها با مقادیر آزمایشگاهی مطابقت مناسبی داشته باشد. بنابراین، برای بررسی عملکرد تجهیزات از روش‌های تجربی استفاده می‌شود تا اطمینان لازم از عملکرد صحیح تجهیزات قبل از انجام مأموریت کسب شود.

هدف از این مقاله بررسی آزمایشگاهی انتشار امواج پیروشوک در کاوشگر فضایی است که برای جداسازی سامانه‌های کاوشگر از عملگرهای باکمر بندهای پیروتکنیک<sup>۶</sup> استفاده می‌شود. در بخش بعد، کاوشگر فضایی و نحوه جداسازی اجزای آن معرفی می‌شود. سپس هدف از انجام آزمایش پیروشوک و نحوه اجرای آن بیان می‌شود.

نتایج داده‌برداری حسگرهای شوک در نقاط مختلف در حوزه زمان و طیف پاسخ شوک برای هر یک از آزمایش‌های جداسازی سامانه‌های کاوشگر ارائه می‌شود. نتایج آزمایشگاهی با سه معیار صحت‌سنجی ارزیابی می‌شود تا از مقادیر اندازه‌گیری شده نامعتبر برای تحلیل استفاده نشود. روند تغییرات سطح شوک در نواحی مختلف سازه و در سامانه‌های مختلف کاوشگر تعیین می‌شود. شرایط انجام آزمایش‌های محیطی براساس نتایج آزمایش پیروشوک استخراج می‌شود تا به عنوان معیاری برای ارزیابی طرح و انتخاب اجزای کاوشگر فضایی استفاده شود.

### معرفی کاوشگر فضایی

کاوشگر فضایی توسط موتور سوخت جامد و با استفاده از پرتابگر کششی پرتاب می‌شود و پس از اتمام سوخت موتور، دماغه با ارسال فرمان الکتریکی از موتور جدا می‌شود و پس از مدت زمان معینی و قبل از رسیدن به نقطه اوج، کاوشگر از موتور جدا می‌شود. کاوشگر که به شکل قطعه استوانه‌ای طراحی شده است تا نقطه اوج پیش می‌رود و سطح انتهایی آن یا سطح جدایش از موتور در مسیر بازگشت مانند سطح مقاوم در برابر جریان عمل می‌کند. چترهای کمکی و اصلی کاوشگر پس از ورود به جو غلیظ به ترتیب باز

6. Hydrocodes  
7. Pyrotechnic chords

- کابل: حسگرهای شتاب با سیستم داده برداری با استفاده از کابل‌هایی ارتباط داده می‌شوند که با تعبیه پوشش مناسب از ورود اغتشاشات الکترومغناطیس جلوگیری می‌شود.
- محل استقرار سیستم داده برداری: کارشناسان آزمایش و سیستم داده برداری در اتاقکی با دیواره‌های بتونی در نزدیکی محل آزمایش قرار می‌گیرند تا شرایط ایمنی در برابر انفجار مواد پیروتکنیک مورد استفاده در آزمایش‌های جدایش و پرتاب ترکش‌های ناشی از جدایش تأمین شود.

### نحوه انتخاب حسگرهای شوک

سطح شوک در نزدیک به محل انفجار مواد پیروتکنیک بسیار بالاست و باید حسگر مناسبی برای اندازه‌گیری شوک در ناحیه نزدیک در نظر گرفته شود. اندازه‌گیری شوک در ناحیه نزدیک اهمیت زیادی دارد و از نتایج آن می‌توان به عنوان ورودی برای شبیه‌سازی پاسخ سازه‌های مختلف با روش‌های عددی یا آماری تحت اثر کمربند انفجاری یکسان استفاده کرد. سطح شوک در ناحیه نزدیک، نمادی از میزان انرژی ورودی به سازه بر اثر انفجار مواد پیروتکنیک است و هرچه فاصله حسگر از محل نصب کمربند کمتر باشد، مقدار اندازه‌گیری دقیق‌تر خواهد بود، زیرا اثر افت سطح شوک ناشی از عبور آن در سازه کمتر می‌شود. از طرف دیگر باید مطمئن شد ترکش‌های انفجار کمربند به حسگر برخورد نمی‌کند، زیرا علاوه بر آسیب به حسگر ممکن است نتایج غیرواقعی ایجاد کند. حداکثر شتاب ایجاد شده در این ناحیه برای انتخاب حسگر عامل مهمی است زیرا اگر مقدار مجاز سطح شتاب حسگر کم باشد حسگر معیوب یا اشباع می‌شود و اگر مقدار آن بیش از حد باشد دقت اندازه‌گیری مناسب نیست.

محیط‌های پیرو شوک به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند [۵]:

۱. محیط میدان نزدیک: این محیط تحت تأثیر انتشار امواج مستقیم از منبع و در شتاب‌های بیشتر از ۵۰۰۰ برابر شتاب گرانش (یا ۵۰۰۰ جی) و در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰ کیلوهرتز است. معمولاً در منابع پیرو شوک بسیار قوی مانند اکثر منابع پیروتکنیک خطی، میدان نزدیک شامل نواحی سازه‌ای تا فاصله ۱۵ سانتی‌متر از منبع می‌شود.
۲. محیط میدان میانی: این محیط تحت تأثیر ترکیبی از انتشار موج و تشدید ارتعاشات سازه است که منجر به تولید امواج با دامنه شتاب در محدوده ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ جی و فرکانس در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز می‌شود. معمولاً میدان میانی منابع بسیار قوی در فاصله بین ۱۵ تا ۶۰ سانتی‌متر از منبع است و در منابع با قدرت کمتر این میدان ممکن است در

امواج پیرو شوک ناشی از جدایش سامانه‌های کاوشگر با استفاده از مواد پیروتکنیک ممکن است به علت فاصله کم این مواد با محموله زیستی و تجهیزات الکتریکی موجب آسیب به موجود زنده یا تخریب تجهیزات الکتریکی شود. تجهیزات الکتریکی که قبل از فرامین جدایش فعال شدند و در شرایط عملیاتی هستند ممکن است کاملاً تخریب یا اشباع شود که اشباع آنها ممکن است بدون برگشت به حالت اولیه یا با برگشت به حالت اولیه باشد. در صورتی که تجهیزات پس از چند ثانیه به حالت اولیه برگردند، مأموریت پروازی با خطای ایجاد شده تا انتهای مسیر ادامه داده می‌شود و در صورت برگشتن به حالت اولیه، موجب اختلال در عملکرد کاوشگر پس از جدایش شود. بنابراین، شناخت و آگاهی از سطوح شتاب و فرکانس ایجاد شده بر اثر انفجار مواد پیروتکنیک ضروری است و با انجام آزمایش‌های جدایش در سطح زمین می‌توان سطح شتاب ایجاد شده در قسمت‌های مورد نظر سازه را تعیین کرد.

### تجهیزات آزمایش

- حسگرهای پیرو شوک: تعداد ۳۶ حسگر با سطح شتاب ۵۰-۱ هزار بر شتاب ثقل<sup>۱</sup> برای اندازه‌گیری شوک ایجاد شده در نقاط مختلف کاوشگر استفاده می‌شود که پهنای باند آنها حداقل ۱۰ کیلوهرتز است. حسگرها کالیبره شده و دارای برچسب نشان‌دهنده مدت اعتبار کالیبراسیون تا زمان انجام آزمایش است.
- سیستم داده برداری: برای جمع‌آوری و ذخیره داده‌های حسگرهای شتاب به صورت سنکرون از سیستم داده برداری استفاده می‌شود. نرخ داده برداری باید چند برابر پهنای باند حسگر انتخاب شود تا نتایج به دست آمده معتبر باشد [۱۳]. نرخ داده برداری در این تحلیل آزمایشگاهی ده برابر بیشتر از پهنای باند حسگرها و برابر با ۱۰۰ کیلوهرتز انتخاب می‌شود. سیستم داده برداری شامل منبع تغذیه، کاندیشنر مجهز به میدل آنالوگ به دیجیتال، تقویت کننده و ذخیره کننده مقادیر شتاب است. کالیبراسیون حسگرها با توجه به سیستم داده برداری انجام شده است و برچسب کالیبراسیون برای مجموعه حسگرها و سیستم داده برداری صادر شده است.
- بلوک‌های نصب حسگرهای شتاب: سه حسگر شتاب عمود بر هم در یک نقطه با استفاده از بلوکی نصب می‌شود تا مؤلفه‌های شتاب یک نقطه در سه راستای عمود بر هم اندازه‌گیری شود.

سازه کاهش می‌یابد و جنس و هندسه سازه بر میزان افت سطح شوک اثرگذار است. سازه کاوشگر از پوسته نازک با تقویت‌کننده محوری تشکیل شده است. مقدار افت سطح شتاب با استفاده از مستندات آزمایش‌های پیشین [۱۴] در سازه مشابه با تقریب تعیین می‌شود و حداکثر شتاب در محل‌های مختلف سازه تخمین زده می‌شود تا حسگر مناسب برای این نواحی انتخاب شود. علاوه بر فاصله محل مورد نظر تا محل انفجار مواد پیروتکنیک، اتصالات اثر قابل توجهی بر کاهش سطح شتاب دارند و هر نوع انحراف یا تقسیم مسیر موج باعث کاهش سطح موج ورودی می‌شود. در هنگام عبور موج پیروشوک از تقاطع دو سطح با ضخامت متفاوت ولی پیوسته براساس بررسی آزمایش‌های انجام‌شده [۱۴] افت ۷۰-۳۰ درصدی در سطح عمود بر جهت انتشار موج ایجاد می‌شود. بنابراین حسگرهایی با سطح شتاب مجاز مختلف برای نصب در کاوشگر با توجه به فاصله و نوع اتصالات در مسیر انتشار موج انتخاب می‌شوند. مقادیر حداکثر شتاب مجاز حسگرهای موجود برابر با ۵، ۲۰، ۵۰، و ۱ کیلوگرم است و حسگرهایی انتخاب می‌شوند که شتاب مجاز آنها بیشتر از مقادیر حداکثر شتاب تخمین‌زده در محل نصب آنها باشد.

### آرایش حسگرها

امواج ناشی از انفجار در کلیه جهات سازه منتشر می‌شود و اندازه‌گیری سطح شتاب در یک راستا برای بررسی سطح شوک کافی نیست. معمولاً در هر نقطه دلخواه در سه راستای اصلی حسگر نصب می‌شود. اولین راستای اصلی به‌صورت طولی و در راستای محور کاوشگر در نظر گرفته می‌شود و دو راستای دیگر در داخل صفحه عمود بر راستای اول و در جهت شعاعی و مماس بر سطح کاوشگر تعریف می‌شود که این دو راستا بر یکدیگر در داخل این صفحه عمود هستند. بلوک‌هایی از جنس آلومینیوم آلیاژی مطابق با شکل (۲) برای اندازه‌گیری سه راستای موج در یک نقطه دلخواه استفاده می‌شود که بر سطوح آن سه سوراخ عمود بر هم ایجاد شده است و این سوراخ‌ها مطابق با ابعاد حسگر رزوه شده‌اند. بلوک‌های آلومینیومی در نقاط مشخصی با استفاده از پیچ به بدنه سازه یا تجهیزات متصل می‌شوند و در نهایت برای جلوگیری از هرگونه لقی با چسب در محل نصب تثبیت می‌شوند. اتصال چسب و پیچ باعث کوپلینگ مناسبی بین سازه و بلوک می‌شود و دقت اندازه‌گیری شتاب در سازه را افزایش می‌دهد. اتصال چسبی پس از انجام آزمایش بازمینی می‌شود تا از اتصال کامل بین بلوک و بدنه سازه مطمئن شد. در صورتی که اتصال چسبی جدا شده باشد داده‌های ثبت‌شده در آن بلوک با دقت بیشتری تحلیل می‌شود و در صورت مشاهده خطا، از داده‌های ثبت‌شده این حسگرها صرف‌نظر می‌شود.

فاصله ۳ الی ۱۵ سانتی‌متر از منبع قرار داشته باشد. ۳ محیط میدان دور: در این محیط تشدید ارتعاشات سازه اثر غالب دارد که منجر به ایجاد امواج با شتاب‌هایی کمتر از ۱۰۰۰ جی و فرکانس کمتر از ۱۰ کیلوهرتز می‌شود. میدان دور در خارج از محدوده میدان میانی قرار دارد.

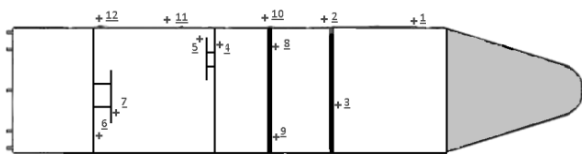
تاکنون آزمایش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری سطوح شوک در اثر انفجار کمرندهای پیروتکنیک انجام داده است [۱۴]. این نتایج برای انتخاب نوع حسگرهای شوک در آزمایش کاوشگر مفید است و فقط باید کمرند پیروتکنیک مورد استفاده در کاوشگر را با کمرندهای پیروتکنیک در آزمایش‌های پیشین معادل‌سازی کرد. مقطع کمرند پیروتکنیک مورد استفاده در کاوشگر و مقدار ماده پیروتکنیک کمرند انفجاری در واحد طول برای مقایسه نتایج این آزمایش با نتایج آزمایشگاهی پیشین استفاده می‌شود. قطر مقطع اولیه و مقدار مواد انفجاری در واحد طول کمرند مورد استفاده در کاوشگر با مشخصات کمرندهای مورد استفاده در آزمایش‌های پیشین یکسان نیست و از نتایج موجود برای تخمین محافظه‌کارانه سطح شوک استفاده می‌شود. در جدول (۱)، قطر، جرم در واحد طول مواد انفجاری سه کمرند مورد استفاده در آزمایش‌های پیشین و حداکثر شتاب اندازه‌گیری‌شده در میدان نزدیک آورده شده است که برای مقایسه با کمرند کاوشگر استفاده می‌شود.

جدول ۱- مشخصات برخی از کمرندهای انفجاری در آزمایش‌های پیروشوک پیشین [۱۴]

| مقدار جرم در واحد طول مواد انفجاری (گرم بر فوت) | قطر کمرند انفجاری (اینچ) | حداکثر شتاب اندازه‌گیری شده (کیلوگرم) |
|---|--------------------------|---------------------------------------|
| ۱۰  | ۰/۱۹                     | ۱۰/۵                                  |
| ۳۰  | ۰/۱۹                     | ۱۱                                    |
| ۵۰  | ۰/۱۷                     | ۴۲                                    |

حداکثر پاسخ شوک با استفاده از این سه کمرند انفجاری در میدان نزدیک ۴۲ کیلوگرم است. بنابراین، سطح شوک مجاز حسگرهای انتخابی در میدان نزدیک برای آزمایش جدایش موتور ۵۰ کیلوگرم انتخاب می‌شود که این حسگرها در سه راستای عمود برهم در سطح داخلی پوسته سامانه جدایش و در فاصله ۵۰ میلی‌متر از کمرند انفجاری سامانه جدایش نصب می‌شود. در آزمایش جدایش دماغه به علت محدودیت فضا در نصب حسگر در داخل دماغه و احتمال تخریب آنها، حسگرهای روی پوسته سامانه بازمینی نصب می‌شود که در این صورت فاصله حسگر میدان نزدیک تا منبع جدایش ۱۳۰ میلی‌متر است. سطح شوک ناشی از انفجار مواد پیروتکنیک با عبور امواج از

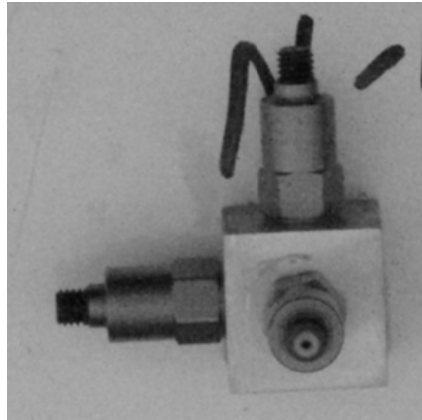
موقعیت نصب حسگرها در بررسی پیروشوک ناشی از عملکرد سامانه جدایش مجموعه دماغه در شکل (۴) نشان داده شده است. نرخ داده برداری کلیه حسگرها ۱۰۰ کیلوهرتز انتخاب شده است. داخل مجموعه دماغه فضای کافی برای نصب بلوک حسگرها وجود نداشت و به اجبار اولین بلوک در سطح داخلی بدنه بازبایی و تا حد امکان نزدیک به دماغه نصب شد که فاصله آن ۱۳ میلی متر از کمر بند انفجاری است. بلوک های دوم و سوم به سامانه بازبایی متصل می شود تا افت دامنه شتاب در بدنه آن و سینی تجهیزات رهگیری بررسی شود. حسگرهای بلوک یازدهم برای اندازه گیری شتاب منتقل شده به بدنه سامانه کپسول زیستی استفاده می شود. شتاب منتقل شده به عدسی فوقانی و تحتانی کپسول زیستی به ترتیب با بلوک چهارم و ششم اندازه گیری می شود و مقدار افت دامنه ناشی از نصب ایزولاتور دورین و تخت موجود زنده به ترتیب با حسگرهای بلوک های پنجم و هفتم ثبت می شود. بلوک دهم روی بدنه سامانه خدمات متصل می شود و بلوک های هشتم و نهم به سینی سامانه خدمات در نقاط نصب تجهیزات حساس قرار داده می شود. بلوک دوازدهم روی بدنه سامانه جدایش نصب می شود تا تأثیر شوک بر کمر بند انفجاری و اتصالات الکتریکی بررسی شود.



شکل ۴- نقاط نصب حسگر در آزمایش جدایش دماغه

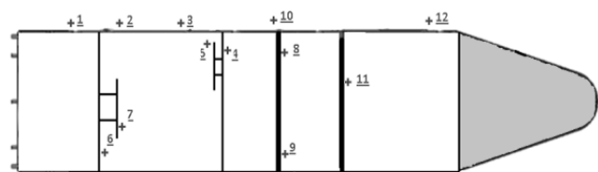
### شرح آزمایش

کاوشگر فضایی مشابه با شرایط پروازی مونتاژ می شود و جرم معادل موتور بر روی سامانه جدایش متصل می شود. این مجموعه با استفاده از کابل هایی معلق می شود تا شرایط مشابه با حالت آزاد کاوشگر و موتور در فضا شبیه سازی شود. کابل ها به چارچوب متصل است که این چارچوب بر روی زمین مهار شده است. دماغه با ارسال فرمان الکتریکی صادر شده از تجهیزات کنترل کاوشگر جدا می شود و این آزمایش در شرایطی انجام می شود که کلیه تجهیزات کاوشگر وارد شرایط عملیاتی شده است. جدایش جرم معادل از کاوشگر با تغییر آرایش حسگرهای شتاب و با ارسال فرمان الکتریکی صادر شده از تجهیزات کنترل کاوشگر انجام می شود. شکل (۵) تصویری از حالت معلق کاوشگر و جرم معادل موتور را در چارچوب متصل به زمین نشان می دهد.



شکل ۲- بلوک واسط برای اتصال حسگرهای شوک به سازه

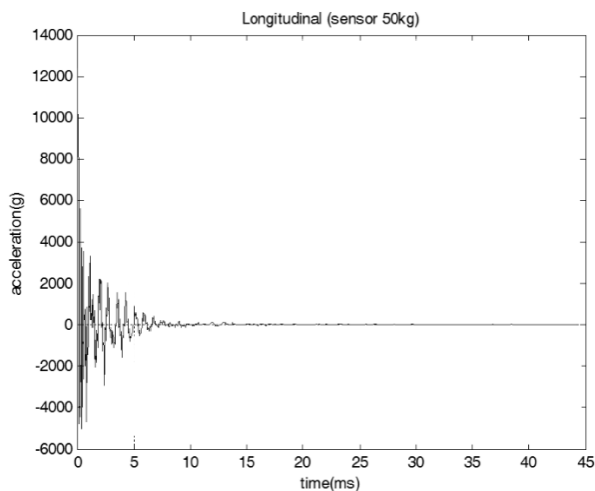
موقعیت نصب حسگرها در بررسی پیروشوک ناشی از عملکرد سامانه جدایش کاوشگر در شکل (۳) نشان داده شده است. اولین بلوک در داخل سامانه جدایش نصب شده است تا شوک در ناحیه نزدیک اندازه گیری شود. بلوک دوم و سوم روی بدنه کپسول زیستی و در دو فاصله مختلف از کمر بند انفجاری نصب شده است تا مقدار شوک منتقل شده به بدنه و مقدار افت آن در اثر عبور از بدنه اندازه گیری شود. مقدار شوک و روی به کپسول زیستی با استفاده از بلوک چهارم اندازه گیری می شود که بر روی سطح عدسی فوقانی کپسول نصب شده است. دورین و مدارهای الکترونیکی در داخل کپسول و در فضای فوقانی متصل می شود که با استفاده از ایزولاتور به عدسی فوقانی متصل است. بلوک پنجم برای بررسی عملکرد ایزولاتور با سه حسگر به پایه دورین متصل می شود. بلوک متصل به عدسی تحتانی کپسول زیستی نصب می شود تا کاهش دامنه شتاب در اثر عبور امواج در بدنه کپسول و شتاب ورودی به پایه تخت موجود زنده بررسی شود. تخت موجود زنده با استفاده از ایزولاتور به پایه آن متصل می شود که برای بررسی عملکرد ایزولاتور در برابر شوک اعمالی، بلوک هفتم به تخت موجود زنده متصل می شود. بلوک دهم روی بدنه سامانه خدمات متصل می شود و بلوک های هشتم و نهم به سینی سامانه خدمات در نقاط نصب تجهیزات حساس قرار داده می شود. بلوک های یازدهم و دوازدهم به سامانه بازبایی متصل می شود تا دامنه شتاب در بدنه آن و سینی تجهیزات رهگیری بررسی شود.



شکل ۳- نقاط نصب حسگر در آزمایش جدایش کاوشگر از جرم معادل موتور

## نتایج آزمایش

شتاب حسگرهای متصل شده به نقاط مختلف در آزمایش‌های جدایش سامانه‌های کاوشگر در کل بازه زمانی فعال‌سازی سیستم داده‌برداری ثبت می‌شود. شکل (۶) نمونه‌ای از نمودار شتاب محوری را نشان می‌دهد که توسط حسگر در فاصله ۵ سانتی‌متری از کمر بند انفجاری در آزمایش جدایش کاوشگر از جرم معادل موتور اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدت زمانی که شتاب اعمالی مقادیر چشمگیری است کمتر از ۳۰ میلی‌ثانیه است و شتاب اعمالی بیش از ۱۰۰۰۰ برابر شتاب ثقل است. ۳۶ حسگر در هر آزمایش برای اندازه‌گیری شوک استفاده شده است و برای دو آزمایش ۷۲ نمودار شتاب ثبت شده است که برای تحلیل آزمایشگاهی پیرو شوک در کاوشگر فضایی استفاده می‌شود.



شکل ۶- شتاب محوری اندازه‌گیری شده در حسگر شتاب در فاصله ۵۰ میلی‌متر از مواد پیروتکنیک در آزمایش جدایش موتور

## بحث و بررسی

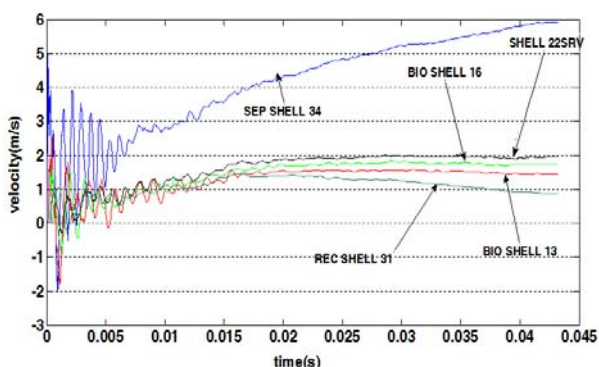
انجام آزمایش پیرو شوک در شرایط واقعی و با استفاده از مواد پیروتکنیک هزینه زیادی دارد و نیاز است شرایط ایجاد شده در آزمایش پیرو شوک شبیه‌سازی شود. سطح شتاب اعمالی به مجموعه‌های مختلف از آزمایش پیرو شوک تعیین می‌شود که علاوه بر تعیین معیار طراحی تجهیزات در پرتاب‌های بعدی، شرایط آزمایشگاهی برای پذیرش تجهیزات موجود را در شبیه‌سازها تعیین می‌کند. البته باید توجه داشت در حالت عملیاتی کاوشگر فضایی که جدایش در ارتفاعات زیاد و در محیط با چگالی بسیار کم هوای اطراف کاوشگر انجام می‌شود انتقال امواج پیرو شوک از طریق محیط اطراف ناچیز است در صورتی که در آزمایش پیرو شوک در



شکل ۵- تصویری از کاوشگر و جرم معادل موتور در حالت معلق قبل از جدایش دماغه و جرم معادل

حسگرهای پیرو شوک و شتاب روی رزوه داخل بلوک‌ها بسته می‌شود و بلوک با استفاده از چسب و پیچ در نقاط مورد نظر مطابق با شکل (۳) و شکل (۴) نصب می‌شود. سپس حسگرها با کابل‌هایی به سیستم اندازه‌گیری مستقر در اتاقک ایمن متصل می‌شود. ضریب حساسیت حسگرها که توسط کارخانه سازنده مقدار آن ارائه شده است در سیستم داده‌برداری وارد می‌شود و فرکانس ۳۰ کیلوهرتز برای فیلتر و حذف نویزهای فرکانس بالا تنظیم می‌شود. سیستم داده‌برداری قبل از انجام آزمایش پایدار شده و انحراف از مقدار صفر<sup>۱</sup> داده‌ها به حداقل مقدار ممکن کاهش داده شود. سپس قسمت‌های مختلف کاوشگر شامل مجموعه دماغه، سامانه بازیابی، سامانه خدمات، کپسول زیستی بر روی جرم معادل موتور مونتاژ می‌شود. از آنجا که زیرسیستم‌های کاوشگر و سیستم تله‌متری قبل از انفجار مواد پیروتکنیک راه‌اندازی می‌شود و اندازه‌گیری پیرو شوک به صورت مستقل انجام می‌شود برای حذف نویز حاصل از الکتریسیته ساکن در اندازه‌گیری داده‌های شوک، اتصال کوتاه برقرار می‌شود. چاشنی‌های تحریک کمر بندهای انفجاری برای رعایت مسائل ایمنی بعد از نصب حسگرهای شتاب و کابل‌کشی آنها بر روی مجموعه نصب می‌شوند. فرمان جدایش توسط تجهیزات صدور فرامین کاوشگر صادر می‌شود و تجهیزات الکتریکی کاوشگر به وضعیت حالت عملیاتی می‌روند تا اطمینان شود انفجار کمر بندها خللی در عملکرد آنها ایجاد نمی‌کند. به علت نرخ داده‌برداری بالا و ظرفیت بالای حافظه مورد نیاز برای ذخیره داده‌های پیرو شوک، راه‌اندازی سیستم داده‌برداری ۱۰ ثانیه قبل از ارسال فرمان انفجار مواد پیروتکنیک انجام می‌شود. فرمان چاشنی‌های کمر بندهای پیروتکنیک با استفاده از مجموعه صدور فرامین محموله انجام می‌شود و سیستم داده‌برداری حدود ۵ ثانیه بعد از فرمان جدایش متوقف می‌شود.

صحت‌سنجی مقایسه شود. به علت عملکرد فنرهای جدایش که شتاب نسبتاً زیادی به مجموعه اعمال می‌کند و عملکرد کابل‌های سیستم تعلیق سازه پس از جدایش، جابه‌جایی و تغییر سرعت پس از جدایش در سازه وجود دارد که در سیگنال سرعت حاصل از انتگرال‌گیری مقادیر اندازه‌گیری شده با حسگرهای شتاب‌سنج مشاهده می‌شود. بنابراین، پیش‌بینی می‌شود سیگنال‌های سرعت پس از جدایش مقادیر مخالف با صفر را نشان دهند و در محدوده سرعت مطلق سازه در لحظه داده‌برداری نوسان کند. شکل (۷) نمودار سرعت برای نقاط مختلف بدنه را در آزمایش جدایش موتور نشان می‌دهد. حسگر بخش سامانه جدایش در فاصله تقریبی ۵ سانتی‌متر از منبع پیروتکنیک در میدان نزدیک پیرو شوک قرار دارد که در لحظه جدایش مطابق شکل تغییر سرعت ناگهانی قابل توجهی ثبت کرده است که این از مشخصه‌های شرایط میدان نزدیک پیرو شوک است [۱۳] زیرا پاسخ موضعی سازه در محل نصب حسگر نزدیک به حلقه انفجاری تأثیر زیادی بر سیگنال سرعت دارد. اما پاسخ سیگنال سرعت حسگرهایی که از منبع پیروتکنیک فاصله زیادی دارند بیشتر تحت تأثیر پاسخ کلی سازه است. سرعت سازه در راستای طولی پس از جدایش با توجه به منحنی شکل (۷) در محدوده ۱-۲ متر بر ثانیه است که با مقادیر محاسبه شده مطابقت دارد.



شکل ۷- نمودار سرعت در نقاط مختلف بدنه در آزمایش جدایش موتور در راستای طولی

نمودارهای سرعت برای حسگرهای روی پوسته بدنه در آزمایش جدایش دماغه در شکل (۸) آورده شده است. تغییر سرعت ناگهانی در زمان تقریبی ۵ و ۳۵ میلی‌ثانیه پس از جدایش دماغه در حسگر متصل به انتهای بدنه بازبایی در فاصله ۲۹ سانتی‌متری از حلقه انفجاری مشاهده می‌شود. شایان ذکر است، در سیگنال شتاب، این حسگر نیز در همین لحظات نوسانات غیرطبیعی دارد. بنابراین، نتایجی که از این حسگر پس از زمان ۵ میلی‌ثانیه به دست می‌آید، اعتبار ندارد. شکل (۵) وضعیت محموله را در حالت تعلیق نشان می‌دهد که یکی از کابل‌های تعلیق به سیستم بازبایی از طریق قلابی متصل شده است. تغییر ناگهانی در سرعت ممکن است

سطح زمین کولپینگ موج انفجار با اتمسفر می‌تواند منجر به ایجاد شرایط سخت‌گیرانه‌تر نسبت به شرایط واقعی شود. بنابراین، سطح موج اندازه‌گیری شده مطمئناً از سطح عملیاتی بالاتر خواهد بود.

قبل از استفاده از اندازه‌گیری سطح شتاب توسط حسگرهای مختلف در نقاط مختلف سازه باید اطمینان حاصل شود نتایج به دست آمده از آزمایش معتبر است و اثرات مانند نویزهای امواج محیطی یا اشباع سخت‌افزاری تجهیزات داده‌برداری موجب خطا در اندازه‌گیری نشده است. در این بخش روش‌های بررسی صحت نتایج اندازه‌گیری پیرو شوک توضیح داده می‌شود. پس از اثبات صحت نتایج اندازه‌گیری شده، عملکرد سازه و ایزولاتورها در تضعیف امواج پیرو شوک بررسی می‌شود و شرایط محیطی برای آزمایش تجهیزات حساس محموله آزمایشگاه فضایی استخراج می‌شود.

## صحت‌سنجی

امواج پیرو شوک فرکانس بالایی دارند و باید نرخ داده‌برداری در آزمایش پیرو شوک بسیار بالا انتخاب شود که این خود عاملی برای وجود نویزهای بیشتر در داده‌ها می‌شود. نتایج به دست آمده از آزمایش پیرو شوک بر اساس سیگنال شتاب، سرعت و طیف پاسخ شوک ارزیابی می‌شود که جزئیات هر یک از آنها در ادامه توضیح داده می‌شود.

### صحت‌سنجی داده‌ها بر اساس شتاب

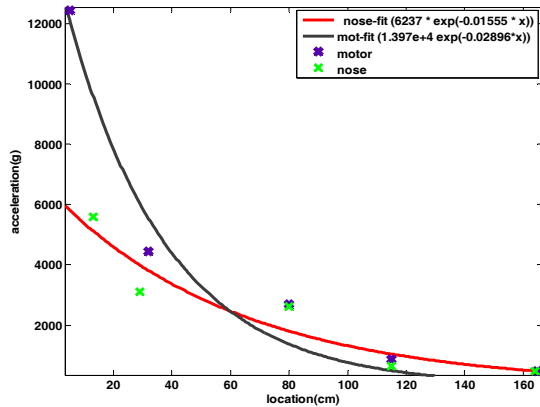
مقادیر شتاب اندازه‌گیری شده با حسگرهای شوک در زمان‌های مختلف باید قبل از تحلیل و محاسبه طیف پاسخ شوک بررسی شود تا از ناچیز بودن خطاهای اندازه‌گیری مطمئن شد. نمودار شتاب به دست آمده از حسگرهای پیرو شوک روند خوبی در هر دو آزمایش جدایش سامانه‌های کاوشگر دارند و پدیده بریدگی داده‌ها، افزایش ناگهانی نقطه‌ای یا افت غیرمنطقی نمودارهای شتاب، نویزهای رندوم با دامنه قابل توجه و خطاهای داده‌برداری کلی در هیچ کدام از داده‌های شتاب دیده نشد و فقط در چندین مورد حداکثر مقدار داده‌های مثبت و منفی تقارن نسبی نداشتند. مشکل داده‌برداری فقط در حسگر سینی سامانه خدمات و در کنار باتری در آزمایش جدایش موتور بود که مقدار میانگین داده حسگر پس از افزایش شتاب ناشی از پیروتکنیک دچار انحراف از صفر شد که به نظر می‌رسد بر اثر شل شدن کانکتور پیچی حسگر بوده است.

### صحت‌سنجی داده‌ها بر اساس سرعت

علاوه بر بررسی کیفی نمودار شتاب، نیاز است سیگنال‌های پیرو شوک با انتگرال‌گیری به سیگنال سرعت لحظه‌ای تبدیل شود تا مقادیر سرعت کلی سازه با مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده توسط حسگرها برای



اندازه‌گیری شتاب در ناحیه نزدیک به کمربند انفجاری در آزمایش جدایش دماغه امکان‌پذیر نبود، سطح شتاب کمتری در نقطه ابتدایی مربوط به نمودار جدایش دماغه نشان داده شده است. از مقادیر سطح شتاب در چند نقطه سازه استفاده می‌شود و دو منحنی برازش می‌شود تا بتوان مقادیر سطح شتاب در نقاط مختلف سازه را میان‌یابی کرد.

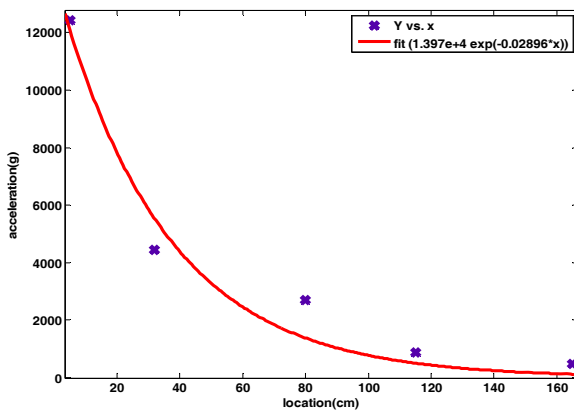


شکل ۹- تغییرات سطح شتاب در بدنه در آزمایش‌های جدایش موتور و دماغه

از آنجا که کمربند انفجاری مورد استفاده در جدایش سامانه‌های کاوشگر یکسان است با تقریب مناسبی می‌توان از مقادیر شتاب در نقاط مختلف استفاده کرد و منحنی تغییرات شتاب در نقاط مختلف سازه را با استفاده از سطح شتاب اندازه‌گیری شده در برخی از نقاط بدنه در دو آزمایش به‌دست آورد. منحنی نشان‌داده‌شده در شکل (۱۰) برای برآورد سطح شتاب در هر دو آزمایش جدایش مناسب است که معادله سطح شتاب برحسب شتاب گرانش را می‌توان بدین صورت بیان کرد:

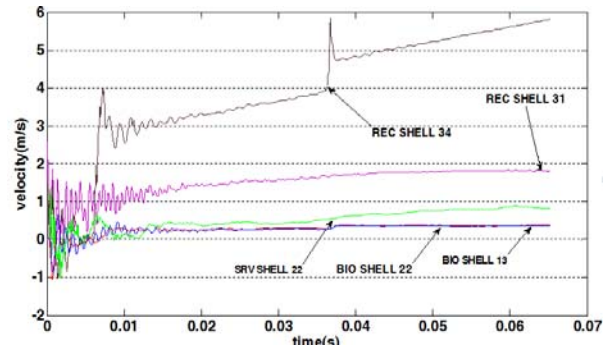
$$a = 13970e^{-0.02896X} \quad (1)$$

که X فاصله از کمربند انفجاری بر حسب متر است.



شکل ۱۰- منحنی میان‌یابی سطح شتاب در بدنه در آزمایش جدایش سامانه‌های کاوشگر فضایی

جدایش لحظه‌ای محموله از قلاب باشد. نتایج حسگرهای دیگر معتبر است زیرا تغییر سرعتی محوری سازه پس از جدایش را کمتر از یک متر بر ثانیه مطابق شکل (۸) برآورد می‌کند.



شکل ۸- نمودار سرعت در نقاط مختلف بدنه در آزمایش جدایش دماغه در راستای طولی

### صحت‌سنجی داده‌ها براساس طیف پاسخ شوک

نمودار طیف پاسخ شوک را می‌توان با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده در حسگرهای شوک در راستای سه محور عمود بر هم به‌دست آورد و مقدار حداکثر شتاب مثبت و منفی را در سیستم‌های یک درجه آزادی با فرکانس‌های مختلف تعیین کرد. بررسی سطح طیف پاسخ شوک مثبت و منفی نشان می‌دهد در هر دو آزمایش اختلاف بین دو نمودار طیف پاسخ شوک مثبت و منفی در مقایسه با دامنه شتاب ناچیز است و اختلاف نتایج طیف پاسخ شوک در کلیه فرکانس‌ها نسبت به طیف پاسخ شوک نویز پیش‌زمینه<sup>۱۱</sup> کمتر از ۶ دسی‌بل است. بنابراین، مقادیر شتاب اندازه‌گیری شده با دقت مناسبی پذیرفتنی است.

### بررسی اثر فاصله از منبع پیروتکنیک

دامنه امواج پیروشوک بر اثر عبور از بدنه و اتصالات مختلف کاهش می‌یابد که میزان کاهش به جنس و هندسه بدنه و نوع اتصالات وابسته است. تاکنون حل کاملی از مدل ریاضی برای تعیین میزان کاهش دامنه امواج پیروشوک ارائه نشده است و از نتایج آزمایشگاهی برای برآورد میزان کاهش دامنه شتاب در فرکانس‌های مختلف استفاده می‌شود. مقدار حداکثر شتاب اندازه‌گیری شده در حوزه زمان در آزمایش‌های جدایش سامانه‌های کاوشگر فضایی در شکل (۹) نشان داده شده است که محور افقی، فاصله از محل کمربند انفجاری است. مقدار شتاب در ناحیه نزدیک در آزمایش جدایش موتور بیشترین مقدار است که دامنه آن با انتشار امواج در بدنه سازه و عبور از اتصالات بین سامانه‌ها افت می‌کند. از آنجا که

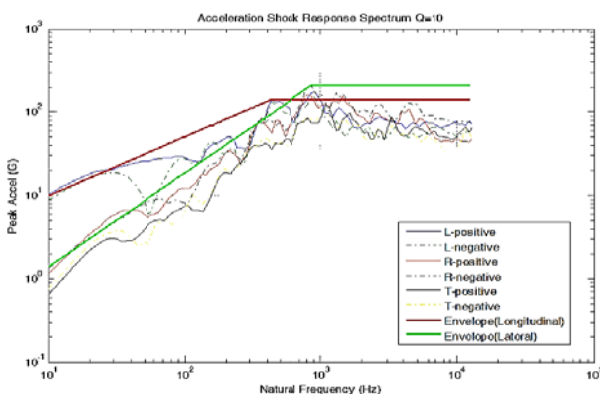
## بررسی اثر اتصالات بر کاهش سطح شوک

اتصالات اثر زیادی بر افت دامنه امواج پیرو شوک دارند، که مقدار درصد افت دامنه را می‌توان با استفاده از نتایج آزمایشگاهی در کاوشگر فضایی تعیین کرد. نسبت افت حسگرها در حوزه زمان به دست آورده می‌شود که مقدار آن برابر بیشینه مقدار دامنه در حوزه زمان برای حسگر بعد از اتصال به مقدار متناظر آن در حسگر قبل از اتصال است. شایان ذکر است، به علت محدودیت حسگر در بعضی از نقاط، فاصله بین حسگر ورودی و خروجی زیاد بوده است در نتیجه علاوه بر افت اتصالات، میزان افت فاصله نیز در میزان عدد افت مؤثر بوده است. درصد افت امواج پیرو شوک بر اثر عبور از اتصالات محموله آزمایشگاه فضایی در جدول (۲) آورده شده است. محل نصب حسگرها بر حسب شماره آنها بیان شده است که شماره حسگرها در شکل (۳) و (۴) نشان داده شده است.

جدول ۲- درصد افت (میرایی) امواج پیرو شوک طولی بر اثر عبور از اتصالات کاوشگر فضایی

| محل بررسی افت پیرو شوک | سامانه بازیابی | کیسول زیستی      | ایزولاتور سندلی کیسول | ایزولاتور تجهیزات کیسول |
|------------------------|----------------|------------------|-----------------------|-------------------------|
| نوع آزمایش جدایش       | دماغه          | دماغه            | موتور                 | موتور                   |
| نوع اتصال              | پوسته به سینی  | پوسته به گوشواره | ایزولاتور سیمی        | ایزولاتور الاستومری     |
| شماره حسگر شوک ورودی   | ۲              | ۴                | ۷                     | ۴                       |
| شماره حسگر شوک خروجی   | ۳              | ۱۱               | ۶                     | ۵                       |
| درصد افت               | ۴۶/۰           | ۶۸/۰             | ۹۰/۰                  | ۹۴/۵                    |

تجهیزات حساسی در کاوشگر فضایی وجود دارند که نیاز است نتایج آزمایش پیرو شوک به صورت خاص در این تجهیزات بررسی شود. کیسول زیستی کاوشگر، دو بخش حساس در قسمت تحتانی برای استقرار موجود زنده و قسمت فوقانی برای استقرار پایه نصب تجهیزات الکترونیکی و دوربین داخل کیسول دارد. شرایط محیطی کیسول زیستی و شتاب‌های اعمالی به موجود زنده اهمیت زیادی دارد و از نتایج پیرو شوک مقادیر حداکثر شتاب محاسبه می‌شود. سطح طیف پاسخ شوک در آزمایش جدایش موتور به علت فاصله کمتر از کمربند انفجاری حادث است. امواج پیرو شوک در محل استقرار موجود زنده با وجود یک ایزولاتور کابلی تا حد زیادی کاهش می‌یابد ولی برای اطمینان نیاز است مقادیر شتاب در این قسمت بررسی شود. شکل (۱۱) نمودار طیف پاسخ شوک و پوش آن را برای محل استقرار موجود زنده در آزمایش جدایش موتور نشان می‌دهد. به طور کلی، سطح طیف پاسخ شوک بیشینه بر کیسول زیستی با رسم کلیه منحنی‌های پاسخ شوک در یک نمودار و برای تمامی حسگرها در دو آزمایش جدایش سامانه‌های کاوشگر مطابق شکل (۱۱) به دست می‌آید. بنابراین، پوش طیف پاسخ شوک برای آموزش موجود زنده در شرایط ناشی از انفجار مواد پیروتکنیک قابل استفاده است.



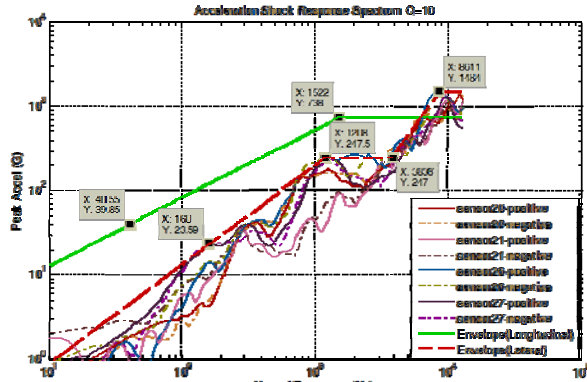
شکل ۱۱- نمودار پوش طیف پاسخ شوک محل استقرار موجود زنده در راستای طولی و عرضی آزمایش جدایش کاوشگر

## استخراج شرایط محیطی براساس نتایج پیرو شوک

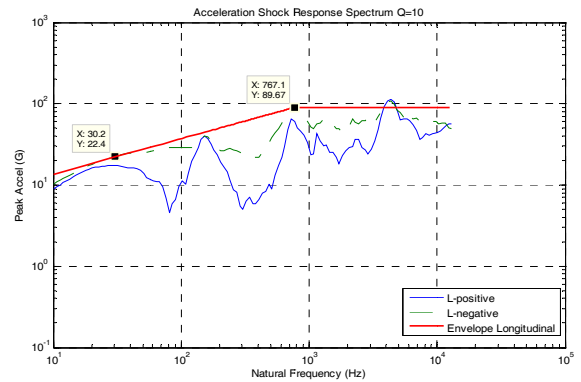
مقادیر حداکثر شتاب در فرکانس‌های مختلف برای استخراج شرایط آزمایش تجهیزات کاوشگر فضایی استفاده می‌شود تا علاوه بر بررسی عملکرد آزمایشگاهی تجهیزات در آزمایش‌های معادل با شرایط پیرو شوک، معیاری برای طراحی تجهیزات کاوشگر استخراج شود. بنابراین، منحنی طیف پاسخ شوک را می‌توان برای تعیین سطح شتاب مجاز تجهیزات کاوشگر فضایی در فرکانس‌های مختلف استفاده کرد و شرایط آزمایش را براساس نتایج آزمایش پیرو شوک استخراج کرد تا طرح موجود یا طرح‌های آتی ارزیابی شود.

تجهیزات الکترونیکی کیسول زیستی برای ثبت و ارسال علائم زیستی موجود زنده استفاده می‌شود که در برابر شوک ناشی از انفجار حساسیت دارد. سطح شوک تجهیزات الکترونیکی در آزمایش جدایش موتور نسبت به آزمایش جدایش دماغه بیشتر است. بنابراین، سطح طیف پاسخ شوک در راستای طولی و عرضی و پوش آن مطابق شکل (۱۲) در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پوش مختلفی برای طیف پاسخ شوک طولی و عرضی استخراج شده است.

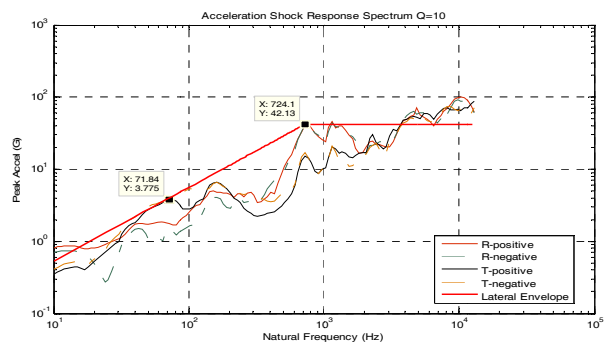
اختلاف وجود دارد که وابسته به پاسخ سازه‌های واسط در مسیر موج در هر دو آزمایش است. بنابراین، برای آزمایش عرضی تجهیزات سینی سامانه خدمات باید هر دو سطح شتاب اعمال شود یا پوش ترکیبی از هر دو سطح تعریف شده و آن سطح برای آزمایش محیطی اعمال شود.



شکل ۱۳- پوش نمودار طیف پاسخ شوک سینی سامانه خدمات در راستای طولی و عرضی در آزمایش جدایش موتور

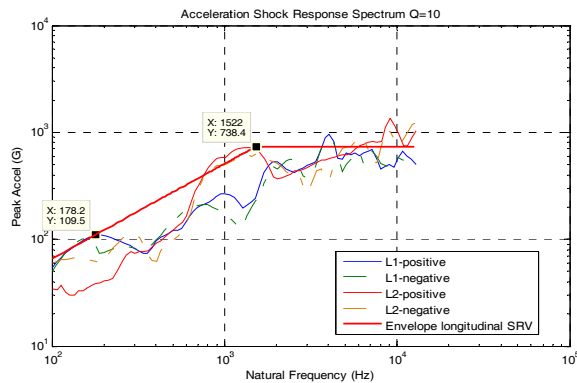


(الف)

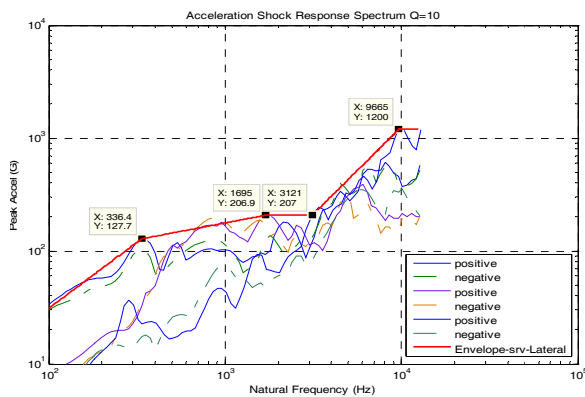


(ب)

شکل ۱۲- پوش نمودار طیف پاسخ شوک تجهیزات الکترونیکی کپسول زیستی در آزمایش جدایش موتور در راستای (الف) طولی (ب) عرضی



(الف)



(ب)

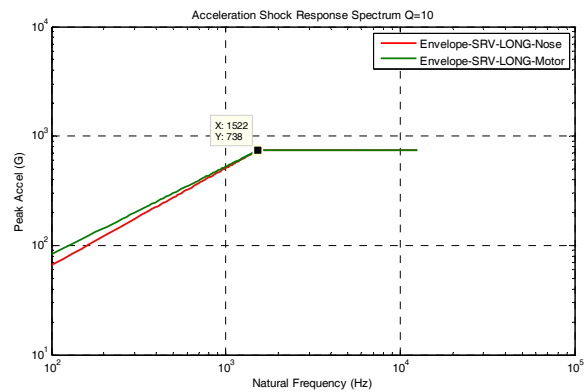
شکل ۱۴- پوش نمودار طیف پاسخ شوک سینی سامانه خدمات در آزمایش جدایش دماغه در راستای (الف) طولی (ب) عرضی

تجهیزات متصل به سینی سامانه خدمات یکی از دیگر از بخش‌های حساس محموله آزمایشگاه فضایی نسبت به امواج پیروشوک است که مشتمل بر بلوک‌های حساس ترانسپوندر، ترانسسمیتر، باتری، کامپیوتر پرواز و رله‌هاست که حاوی تعداد زیادی ریز سازه از جنس کریستال، سرامیک، اپوکسی، مفاصل لچیم‌شده و سیم‌های قلیعاست. هرگونه ترک و شکاف، جابه‌جایی، لرزش رله‌ها و کلیدها و تغییر شکل قطعات بسیار سبک در این ریزسازه‌ها می‌تواند منجر به شکست مأموریت شود. بنابراین، تعیین شرایط محیطی و انجام آزمایش تجهیزات متصل به سینی سامانه خدمات ضروری است. سطح پوش پیشینه در آزمایش‌های جدایش سامانه‌های کاوشگر در سینی سامانه خدمات باید بررسی شود زیرا این سامانه فاصله تقریباً یکسانی از دو مقطع جدایش دارد که نوع حلقه انفجاری جدایش در هر دو مقطع یکسان است. شکل (۱۳) و شکل (۱۴) نمودار پوش طیف پاسخ شوک عرضی و طولی را به ترتیب در آزمایش جدایش موتور و آزمایش جدایش دماغه نشان می‌دهد و پوش منحنی طیف پاسخ شوک در آزمایش جدایش موتور و دماغه در راستای طولی و عرضی در شکل (۱۵) مقایسه شده است. منحنی پوش طیف پاسخ شوک طولی حسگرها تقریباً در دو آزمایش جدایش بر همدیگر منطبق است. اما در راستای عرضی در بخشی از پهنای باند فرکانسی، مابین دو سطح

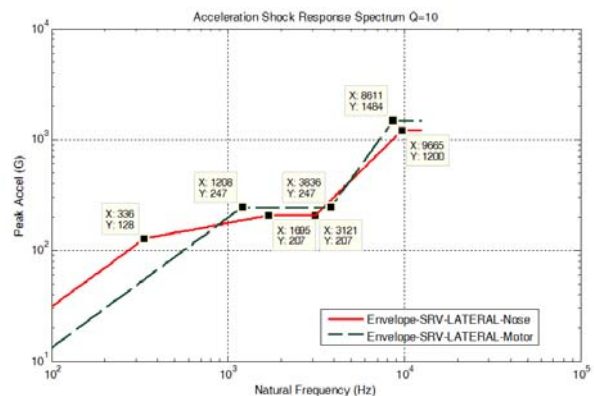
حسگرها ناچیز است و نویز پیش‌زمینه خطایی در اندازه‌گیری داده‌ها ایجاد نکرده است. نتایج آزمایش پیرو شوک برای استخراج شرایط آزمایش‌های محیطی تجهیزات حساس کاوشگر در محل استقرار موجود زنده، دوربین‌های تصویربرداری کپسول زیستی و تجهیزات صدور فرامین استفاده شد. برخی از پوش‌های منحنی باید از ترکیب نتایج پیرو شوک آزمایش‌های جدایش هر یک از سامانه‌های کاوشگر به‌دست آورد تا شرایط بحرانی به‌عنوان معیار آزمایش محیطی تجهیزات انتخاب شود. بررسی نمودار پوش طیف پاسخ شوک نشان داد، شرایط آزمایش‌های محیطی برای ارتعاش طولی و عرضی برخی از تجهیزات متفاوت است.

## مراجع

- [1] Chang, K.Y., "Pyrotechnic Devices, Shock Levels and Their Applications," *Jet Propulsion Laboratory, Proceedings of Pyroshock Seminar, ICSV9, 2002.*
- [2] Keegan, W.B., *Dynamic Environmental Criteria*, NASA Technical Handbook, NASA-HDBK-7005, 2001.
- [3] Fillippi, E., Attouman, H. and Conti, C., "Pyroshock Simulation Using the Alcatel Etca Test Facility," *Launch Vehicle Vibrations, 1<sup>st</sup> European Conference, CNES, Toulouse, France, 1999.*
- [4] Agrawal, J.P., *High Energy Materials*, Wiley-VCH, 2010.
- [5] Mulville, D.R., "Pyroshock Test Criteria," NASA Technical Standard, NASA-STD 7003, 2011.
- [6] Moening, C.J., "Pyrotechnic Shock Flight Failures," IES Pyrotechnic Shock Tutorial Program, *31<sup>st</sup> Annual Technical Meeting, Institute Environmental Science, 1985.*
- [7] Ullio, R., Marucchi-Chierro, P.C. and Spazio, A., "Utilization of Prediction Methods in the Shock Environment Evaluation," *Proceedings European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing, Noordwijk*, Edited by C. Stavrinidis, A. Rolfo, and E. Breitbach. European Space Agency, ESASP-468, 2001, pp. 239-245.
- [8] Morante, R., Wang, Y., Chokshi, N., Kenneally, R. and Norris, W., *Evaluation of Modal Combination Methods for Seismic Response Spectrum Analysis*, Report: Brookhaven National Lab., Upton, NY (US), 1999.
- [9] Lee, D.O., Han, J.H., Jang, H.W., Woo, S.H. and Kim, K.W., "Shock Response Prediction of a Low Altitude Earth Observation Satellite During Launch Vehicle Separation," *International Journal of Aeronautic and Space Science*, Vol. 11, No. 1, 2010, pp. 49-57.
- [10] Troclet, B. and et. al., "FEM/SEA Hybrid Method for Predicting Mid and High Frequency Structure-Borne Transmission," *The Open Acoustic Journal*, Vol. 2, 2009, pp. 45-60.
- [11] Zhou, F.M., Zhang, J. and Qi, Y., "Statistical Energy Analysis of Conservatively Coupled Systems under Transient Excitations," *Journal of Shandong University Technology*, Vol. 20, 2006, pp. 84-87.



(الف)



(ب)

شکل ۱۵- ترکیب پوش نمودار طیف پاسخ شوک سینی سامانه خدمات در آزمایش جدایش دماغه و موتور در راستای الف (طولی ب) عرضی

## نتیجه‌گیری

آزمایش پیرو شوک کاوشگر فضایی در سطح زمین شرایط مناسبی را برای تعیین سطح شتاب اعمالی بر اجزای مختلف کاوشگر فضایی بر اثر انفجار مواد پیروتکنیک فراهم می‌کند. نتایج این آزمایش برای بررسی عملکرد تجهیزات با توجه به سطح شوک اندازه‌گیری شده و ویژگی‌های اجزای تشکیل‌دهنده تجهیزات قابل استفاده است و شرایط اجرای آزمایش محیطی شوک و ارتعاش از نتایج آزمایش پیرو شوک استخراج می‌شود. بررسی روش‌های صحه‌گذاری نتایج آزمایش پیرو شوک نشان می‌دهد با توجه به معیارهای ارزیابی سیگنال شتاب، سیگنال سرعت و همچنین معیارهای طیف پاسخ شوک مثبت و منفی، داده‌های کلیه حسگرها به استثنای یک حسگر معتبر است و برای تحلیل و استخراج شرایط آزمایش مناسب است. اندازه‌گیری نویز پیش‌زمینه با استفاده از مقادیر شتاب ثبت شده قبل از اجرای آزمایش پیرو شوک و محاسبه طیف آن در فرکانس‌های مختلف نشان داد سطح طیف آن در مقایسه با پاسخ شوک کلیه

- Analysis*, Technical Report, Institute of Environmental Sciences, 1996.
- [14] Kacena, W.J., McGrath, M.B. and Rader, W.P., *Aerospace Systems Pyrotechnic Shock Data*, NASA Contractor Report, Vol. 1, 1970, p. 215.
- [12] Hayhurst, C.J., Clegg, R.A., Livingstone, L.H. and Francis, N.J., "The Application of SPH Techniques in Autodyne –2D to Ballistic Impact Problems," *16<sup>th</sup> International Ballistics Symposium and Exhibition, Ballistics '96*, San Francisco, California, USA, 1996.
- [13] Himelblau, H., PierSol, A.G., Wise, J.H. and Grundvig, M.R., *Handbook for Dynamic Data Acquisition and*