مقاله

آزمون‌های ارتعاشی کیفیت‌سنجی طرح اولیهٔ سازهٔ نانوماهوارهٔ رصد ۱ مبتنی بر استاندارد آزمون‌های ارتعاشی آژانس فضایی اروپا

سهیل خدایاری آبکنار
کارشناس ارشد مهندسی هوافضا
پژوهشیار مجتمع دانشگاهی هوافضا
دانشگاه صنعتی مالک اشتر
soheil_khodayari_abkenar@yahoo.com

سعید شکرالهی
استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا
دانشگاه صنعتی مالک اشتر
s_shokrollahi@yahoo.com

مهدی نجاتی
کارشناس ارشد مهندسی هوافضا
پژوهشیار مجتمع دانشگاهی هوافضا
دانشگاه صنعتی مالک اشتر
mah_nejati@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۱۷

چکیده

در این مقاله فرایند انجام آزمون‌های ارتعاشات روبش سینوسی و اتفاقی روی مدل سازه‌ای[1] طرح اولیهٔ نانوماهوارهٔ رصد ۱، مبتنی بر استاندارد آزمون‌های ارتعاشی آژانس فضایی اروپا[2] در فاز کیفیت‌سنجی سازه تشریح و ارزیابی شده است. براساس این استاندارد، آزمون‌های روبش سینوسی و اتفاقی در سه راستای عمود بر هم، که یکی از آنها باید در امتداد پیشرانش موشک ماهواره‌بر باشد، انجام شده است. میزان تراز و مدت زمان انجام این آزمون‌ها طبق میزان در نظرگرفته‌شده در فاز کیفیت‌سنجی این استاندارد است. در مدل سازه‌ای تمامی زیرسیستم‌ها به‌صورت جرم معادل شبیه‌سازی می‌شوند و از این‌رو گاهی به مدل سازه‌ای، مدل جرمی نیز گفته می‌شود. برای انجام این آزمایش‌ها یک فیکسچر خاص مطابق با میز دستگاه ارتعاش به‌گونه‌ای طراحی شده است که اعمال ارتعاش ماهواره در سه راستا را ممکن می‌کند. این فیکسچر باید از صلبیت کافی برخوردار باشد تا از وقوع پدیدهٔ ضدتشدید[3] جلوگیری کند. داده‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش ارتعاش روبش سینوسی از جدول ارتعاشات فرکانس پایین موشک ماهواره‌بر و اطلاعات مورد نیاز جهت انجام آزمایش ارتعاش اتفاقی نیز از نمودار چگالی طیفی توان[4] موشک ماهواره‌بر موجود در شناسنامهٔ سازگاری فنی ماهواره و ماهواره‌بر اتخاذ شده است. برای برآورد تراز شتاب در نقاط حساس ماهواره، با توجه به محدودیت فضای درون آن و تعداد شتاب‌سنج‌ها، حسگرهایی در نقاط کلیدی همچون محل نصب دوربین، دریافت‌کنندهٔ جی. پی. اس.[5]، روی محفظهٔ نگه‌دارندهٔ باتری‌ها و صفحهٔ فوقانی، نصب شده است. همچنین یک شتاب‌سنج دیگر به‌عنوان حسگر کنترلی روی میز ارتعاشی قرار می‌گیرد تا در صورت عبور دامنهٔ ارتعاش این میز از محدودهٔ مجاز تعیین‌شده، با ارسال سیگنال بازخورد، ارتعاش‌دهنده را از ادامهٔ اعمال ارتعاش باز دارد. آزمون روبش سینوسی در دو جهت افزایشی و کاهشی، یکبار از ۲۰ تا ۲۰۰۰ هرتز و بار دیگر از ۲۰۰۰ تا ۲۰ هرتز انجام می‌شود.

واژگان کلیدی: آزمون ارتعاش روبش سینوسی، آزمون ارتعاش اتفاقی، مدل سازه‌ای، استاندارد فضایی اتحادیهٔ اروپا

۱. مقدمه

در فرایند طراحی و توسعهٔ یک سیستم هوافضایی جدید مبتنی بر ایده‌ای نو، کسب اطمینان از تأمین تمامی الزامات و نیازمندی‌های طراحی، عملکردی و کیفیت توسط سامانهٔ طراحی‌شده یکی از ضروری‌ترین و حیاتی‌ترین فعالیت‌ها به‌شمار می‌رود. این صحت‌سنجی اصولاً در سه سطح سیستمی، زیرسیستمی و اجزا به مرحلهٔ اجرا درمی‌آید. سازهٔ ماهواره نیز به‌عنوان اسکلت اصلی ماهواره از این قاعده مستثنا نیست. نمودار شکل ۱ خلاصه‌ای از روند صحت‌سنجی سازهٔ یک طرح جدید هوافضایی مانند یک ماهواره را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، صحت‌سنجی از ترکیب چهار نوع فعالیت متنوع شامل تحلیل، آزمون، بازبینی طراحی و بازرسی تشکیل می‌گردد. از میان این چهار فعالیت، به‌تقین انجام آزمون از قابلیت اطمینان‌بخشی بیشتری برخوردار بوده و همواره از ارکان اصلی فرایند صحت‌سنجی محسوب می‌شود. این شکل همچنین نشان می‌دهد که آزمون‌های مربوط به صحت‌سنجی در حوزهٔ فضایی به‌طور معمول و منطبق بر استانداردهای موجود به سه بخش اصلی تقسیم می‌شوند که از نظر توالی زمانی به‌ترتیب عبارت‌اند از آزمون‌های توسعه‌ای[۶]، آزمون‌های کیفیت‌سنجی[۷] و نهایتاً آزمون‌های پذیرش[۸].

۲. آزمون‌های کیفیت‌سنجی

هدف اصلی از انجام آزمون‌های کیفیت‌سنجی عبارت است از اثبات این امر که انجام فرایند طراحی و همچنین روش‌های تولید منجر به سخت‌افزارها و نرم‌افزارهایی شده است که منطبق بر نیازمندی‌های فنی‌اند. در واقع این آزمون‌ها اثبات می‌کنند که اجزا در محیط های مأموریتی خود به‌خوبی و با حاشیهٔ ایمنی کافی انجام وظیفه می‌نمایند [۱]. ترازهای آزمون‌های کیفیت‌سنجی باید با یک ضریب اطمینان کافی از حداکثر ترازهای پیش‌بینی شده برای حالت واقعی پروازی فراتر باشند تا این اطمینان حاصل گردد که با بدترین ترکیب از تلرانس‌های آزمون نیز ترازهای پروازی از ترازهای آزمون کیفیت‌سنجی فراتر نمی‌روند. آزمون‌های کیفیت‌سنجی باید روی مدل‌های کیفیت‌سنجی (در مورد سازه، مدل سازه‌ای یا مدل STM) که مطابق نقشه‌ها، مواد، ابزار و روش‌های ساخت جسم پروازی واقعی تولید می شوند، انجام گیرند.

۲-۱. آزمون‌های کیفیت‌سنجی ارتعاشی

هدف از آزمون‌های کیفیت‌سنجی ارتعاشی عبارت است از اثبات توانایی ماهواره در تحمل محیط‌های ارتعاشی که در حین پرتاب یا قرارگرفتن در معرض هرگونه ارتعاش شدید با آن مواجه می‌شود. به‌طور کلی سه نوع آزمون ارتعاشی وجود دارد که می‌توان روی ماهواره اجرا کرد. این آزمون‌ها به‌ترتیب عبارت‌اند از [۱] آزمون ارتعاش اتفاقی، آزمون ارتعاش سینوسی و آزمون ارتعاش گذرا.

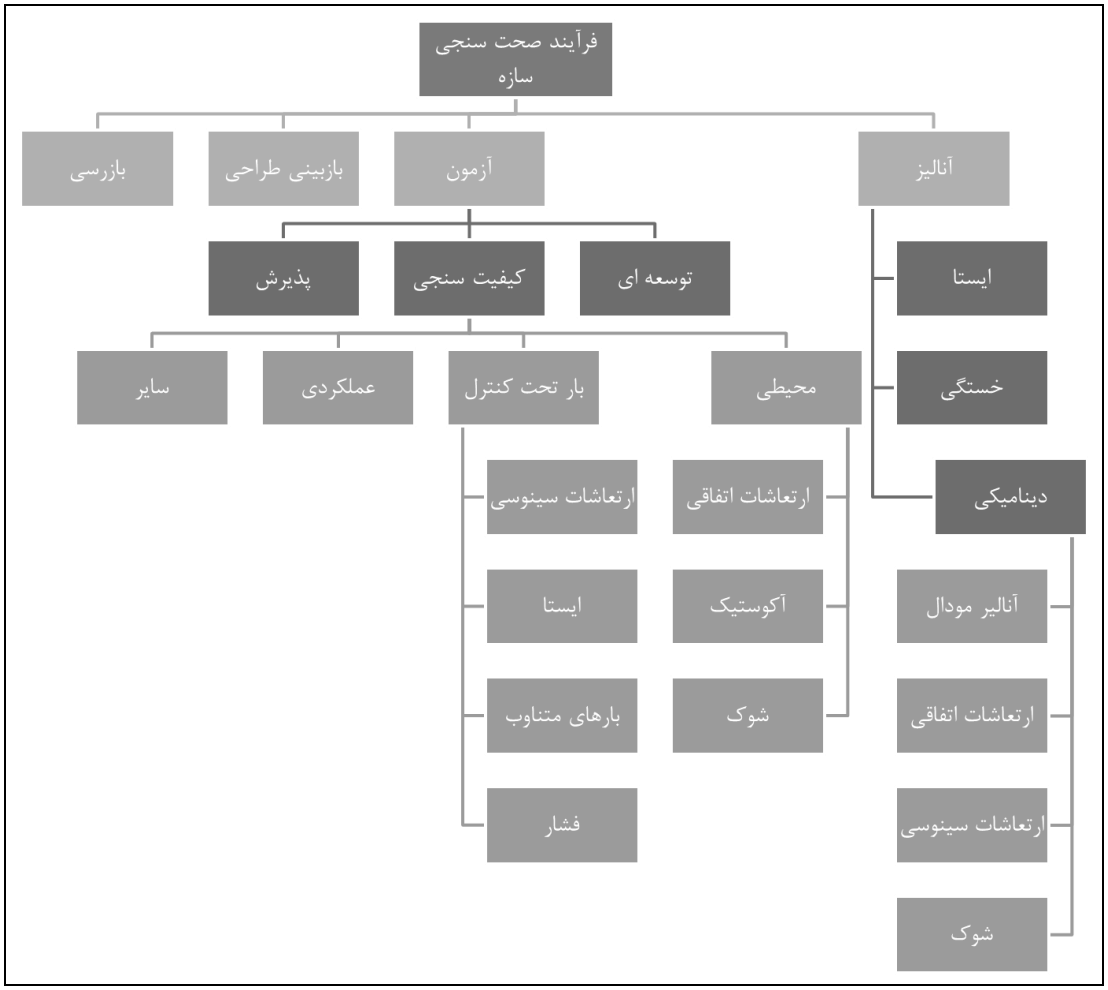
در ادامه مشخصات عمومی آزمون‌های کیفیت‌سنجی ارتعاشی مطرح می‌شود.

الف) برای آزمون ارتعاش ایجادشده در حین عملیات پرتاب، جسم مورد آزمون باید در شرایط پرتاب خاص خود از طریق یک آداپتور روی میز آزمون نصب شده و به اندازه‌ای سفت شده باشد که از ایجاد پدیده ضدتشدید جلوگیری کند.

ب) تجهیزاتی که در حین پرتاب، یا در مراحل اوج‌گرفتن موشک از زمین و یا هنگام احتراق موتور بازگرداننده[۹] عمل می‌کنند، باید در حین آزمون نیز عمل نموده و مورد نظارت قرار گیرند.

ج) اگر یکی از تجهیزات با اجزای مجازی سازه‌ای جایگزین شده باشد، ترازهای ارتعاشی باید در فصل مشترک آن جزء و سازهٔ اصلی اندازه‌گیری شده و با طیف کیفیت‌سنجی تجهیزات مقایسه شود.

د) اجرای آزمون با هر تراز کیفیت‌سنجی باید با اجرای آزمون‌های تراز پایین قبل و بعد از آن همراه باشد، به‌طوری‌که برای تشخیص اصلاحات ممکن روی وضعیت سازه‌ها درحین آزمون، مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱. روند فرایند صحت‌سنجی سازه‌ای یک ماهواره

۲-۲. ترازها، مدت زمان انجام و تلرانس‌های آزمون‌های کیفیت‌سنجی ارتعاشی

شرایط محیطی کیفیت‌سنجی باید سخت‌افزار را در شرایط آزمون سخت‌تری از آنچه در طول پرواز انتظار می‌رود قرار دهد. بنابراین ترازها و مدت زمان انجام فاز کیفیت‌سنجی باید با یک حاشیهٔ کافی از حداکثر مقداری که در هنگام پرواز پیش‌بینی می‌شود، بیشتر باشد. حاشیهٔ مربوط به فاز کیفیت‌سنجی به‌دلائل زیر در نظر گرفته می‌شود:

الف) پیشگیری از ترازها و مدت زمان‌هایی که دارای شدت کمتری نسبت به آنچه در فاز پروازی انتظار می‌رود، می‌باشند.

ب) این حاشیه‌ها، ترازهایی از آزمون را فراهم می‌سازند که تفاوت‌های اندک بین سازه‌های موجود در دو فاز کیفیت‌سنجی و فاز نهایی پروازی (که ناشی از تغییر در اجزاء، مواد، فرایندهای ساخت و تنزل کیفیت در طول بهره‌برداری‌اند) را پوشش می‌دهند.

ج) فراهم‌سازی مدت استمرار مناسب در آزمون جهت جلوگیری از خرابی ناشی از خستگی حاصل از انجام آزمون‌های تکراری و بهره‌برداری عملیاتی.

د) برآورده ساختن الزامات تحت شرایط شدید پروازی

انجام آزمون‌های کیفیت‌سنجی نباید شرایطی را ایجاد نماید که حاشیه‌های امنیت طراحی پشت سر گذاشته شود یا باعث ایجاد مودهای غیرحقیقی تخریب شود. در جدول ۱ ترازها، مدت زمان انجام و تلرانس‌های آزمون‌های کیفیت‌سنجی ارتعاشی (سینوسی و اتفاقی) ذکر شده است.

۳. آزمون‌های ارتعاشات روبش سینوسی

برای آزمون‌های ارتعاشات سینوسی در فاز کیفیت‌سنجی مطابق با استاندارد آزمون‌های ارتعاشی آژانس فضایی اروپا، همواره باید نکات زیر در نظر گرفته شوند:

الف) حداقل باید یک شتاب‌سنج کنترلی بر روی پایهٔ آداپتوری که جسم مورد آزمون بر روی آن نصب شده است، چسبانده شود.

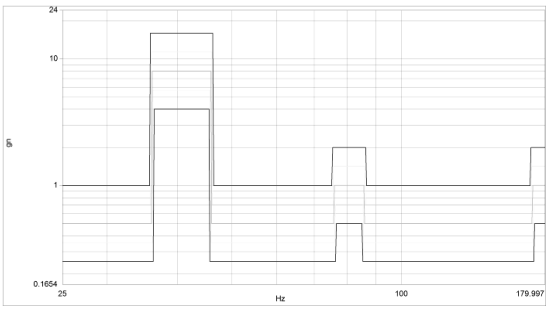
ب) تحریکات سینوسی باید بر پایهٔ آداپتور نگه‌دارنده اعمال شده و با نرخ ۲ اکتاو بر دقیقه جاروب شود.

ج) تراز آزمون باید توسط محدودکننده‌های فیزیکی جابه‌جایی میز ارتعاش (جهت ایجاد محدودیت برای دامنه ارتعاش میز) در بازهٔ فرکانس پایین محدود گردد.

د) برای فرکانس‌های بالاتر، ترازهای شتاب باید حداقل همان‌گونه که در کتابچهٔ راهنمای موشک حامل بیان شده است، باشند.

ه) ارتعاشات باید در سه راستای دو به دو عمود بر هم، که یکی از آنها موازی با محور نیروی پیشرانش است، اعمال شود.

به‌منظور انجام آزمون روبش سینوسی مطابق مرجع [۱]، ابتدا براساس جدول ۲ برگرفته از شناسنامهٔ سازگاری فنی ماهواره و ماهواره‌بر [۲]، داده‌های موردنظر همراه با تلرانس‌های مجاز وارد نرم‌افزار تولید سیگنال ارتعاش‌دهنده می‌گردند. نمودار مربوط به داده‌های تراز شتاب همراه با محدودهٔ مجاز آن در نرم‌افزار دستگاه، در شکل ۲ نشان داده شده است.



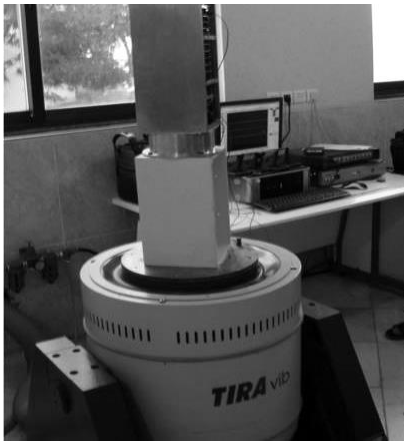
شکل ۲. اطلاعات ورودی به نرم‌افزار دستگاه آزمون ارتعاش روبش سینوسی

همچنین مطابق موارد ذکر شده در بالا، ابتدا مدل سازه‌ای همراه با حلقهٔ جدایش ماهواره به‌کمک یک مجموعه اتصالات مناسب (با صلبیت بالا برای جلوگیری از پدیده ضدتشدید) که امکان اعمال ارتعاش به ماهواره در سه راستا را فراهم می‌سازد، روی میز دستگاه ارتعاش ثابت می‌گردد.

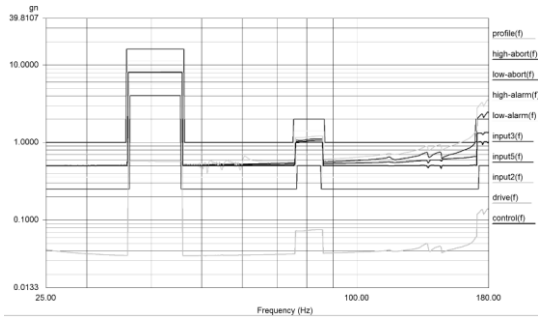
۳-۱. آزمون ارتعاش روبش سینوسی در راستای X

در مرحلهٔ اول ماهواره به‌صورت طولی در راستای محور X (راستای پیشرانش) روی میز مستقر می‌شودد (شکل ۳). برای برآورد تراز شتاب در نقاط حساس سازه و با توجه به محدودیت فضای درون ماهواره و نیز محدودیت تعداد شتاب‌سنج‌ها، حسگرهایی در نقاط کلیدی‌تر سازه نصب می‌شوند. علاوه بر سه نقطهٔ فوق، یک شتاب‌سنج نیز به‌عنوان حسگر کنترلی روی میز ارتعاش قرار می‌گیرد که در صورت عبور دامنهٔ ارتعاش از محدودهٔ تعیین‌شده، با ارسال سیگنال بازخورد ارتعاش‌دهنده را از ادامهٔ اعمال ارتعاش باز می‌دارد. پیش از اعمال ارتعاش موردنظر، براساس استاندارد آزمون‌های ارتعاشی، آزمون جستجوی تشدید در بازهٔ فرکانسی ۲۰ تا ۲۰۰۰ هرتز انجام می‌گیرد تا از عدم وقوع تشدید برای خود دستگاه ارتعاش اطمینان حاصل گردد. این آزمون در دو جهت افزایشی و کاهشی، یک بار از ۲۰ تا ۲۰۰۰ هرتز و بار دیگر از ۲۰۰۰ تا ۲۰ هرتز انجام می‌گیرد. پس از انجام آزمون جستجوی تشدید، آزمون روبش سینوسی مطابق با بازه‌های فرکانسی مندرج در جدول ۲ انجام می‌گیرد. مدت زمان جاروب در هر راستا ۳ دقیقه می‌باشد. نتایج این آزمون در شکل ۳ مشاهده می‌شود. در این شکل، ورودی شمارهٔ ۱ با عنوان INPUT1، شتاب‌سنج کنترلی است. ورودی شمارهٔ ۲ (INPUT2)، شتاب‌سنج نصب‌شده روی صفحهٔ بالایی، ورودی شمارهٔ ۳ (INPUT3)، شتاب‌سنج نصب‌شده روی محفظهٔ نگه‌دارندهٔ دوربین و ورودی شمارهٔ ۵ (INPUT5)، شتاب‌سنج نصب‌شده در محل دریافت‌کنندهٔ جی. پی. اس.

است (ورودی ۴ در اینجا تعریف نشده است). میزان شتاب بیشینه در نقاط اندازه‌گیری‌شده مطابق جدول ۳ است [۳].



(الف)

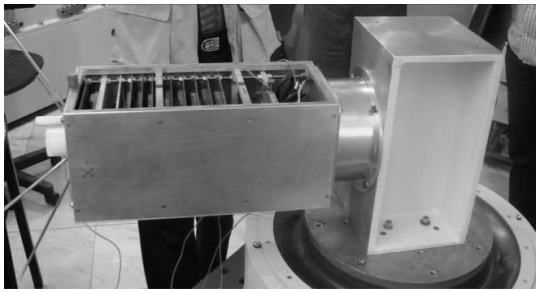


(ب)

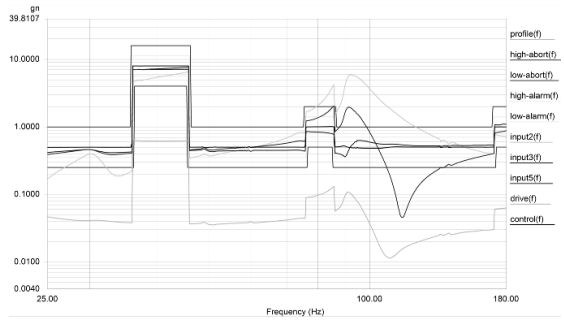
شکل ۳. نمایی از الف) چگونگی استقرار ماهواره روی میز ارتعاش در راستای X، ب) نتایج حاصل از آزمون روبش سینوسی در این راستا

۳-۲. آزمون ارتعاش روبش سینوسی در راستای Y

جهت انجام این آزمون در راستای Y، سازهٔ ماهواره را ۹۰ درجه چرخانده و، مطابق شکل ۴، در محل مربوطه روی مجموعهٔ اتصالات محکم می‌کنیم. در این آزمون مکان قرارگیری شتاب‌سنج‌های ۲ و ۵ عوض شده و به‌ترتیب روی محفظهٔ باتری فوقانی و تحتانی قرار گرفته‌اند. جای شتاب‌سنج‌های ۱ و ۳ تغییر نکرده است. در شکل ۴ نتایج حاصل از این آزمون نمایش داده شده است. در جدول ۴ نیز مقادیر بحرانی شتاب به‌دست‌آمده در طول آزمون ذکر شده است [۳].



(الف)



(ب)

شکل ٤. نمایی از الف) چگونگی استقرار ماهواره روی میز ارتعاش در راستای Y، ب) نتایج حاصل از آزمون روبش سینوسی در این راستا

۳-۳. آزمون ارتعاش روبش سینوسی در راستای Z

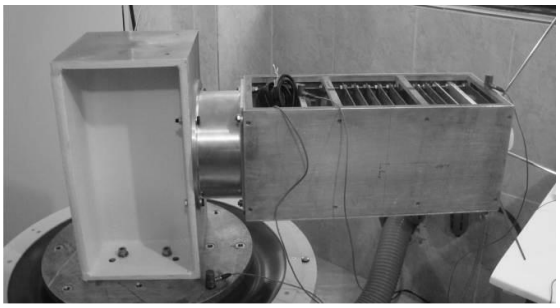
در این آزمون نیز جای شتاب‌سنج‌های ۱ و ۳ تغییر نکرده و شتاب‌سنج‌های ۲ و ۵ به‌ترتیب روی قسمت جانبی صفحهٔ فوقانی و محفظهٔ باتری پایینی قرار داده شده‌اند (مطابق شکل ۵). نتایج حاصل از آزمون روبش سینوسی در راستای Z نیز در همین شکل نشان داده شده است. مقادیر بحرانی شتاب به‌دست آمده در این آزمون نیز در جدول ۵ آورده شده است [۳].

۳-٤. آزمون‌های ارتعاشات اتفاقی

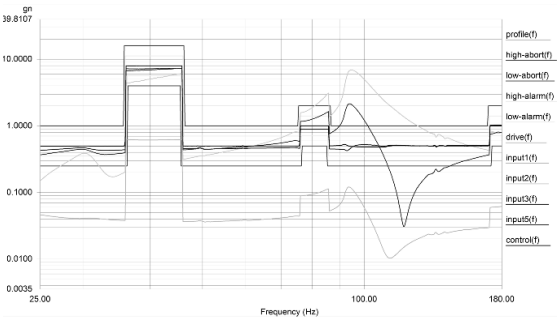
مطابق استاندارد آزمون‌های ارتعاشات اتفاقی ECSS، ملاحظات و شرایط زیر باید برای انجام این آزمون‌ها در نظر گرفته شود:

الف) برای آزمون ارتعاش اتفاقی، حداقل باید یک شتاب‌سنج کنترلی روی پایهٔ مجموعه اتصالات، که جسم مورد آزمون روی آن نصب شده است، چسبانده شود. با

اعمال تحریک اتفاقی گاوسی بر پایهٔ آداپتور، طیف اندازه‌گیری‌شده توسط شتاب‌سنج کنترلی باید یکسان‌سازی شود، به‌طوری‌که چگالی طیفی توان یا اصطلاحاً PSD در سرتاسر بازهٔ فرکانسی، بین ۱- تا ۳+ دسی‌بل از ترازهای تعیین‌شده در راهنمای آزمون کیفیت‌سنجی قرار گیرد (معیار موفقیت این است که کل تراز ریشه میانگین مربع شتاب در بازهٔ ۱۰± درصد از مقدار مشخص شده باشد).



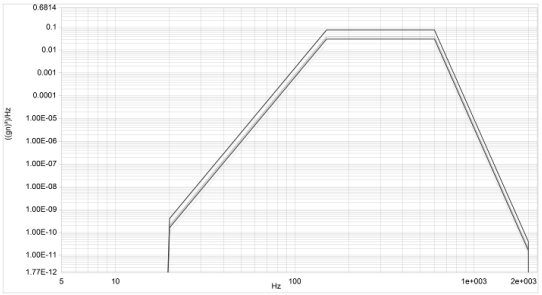
(الف)



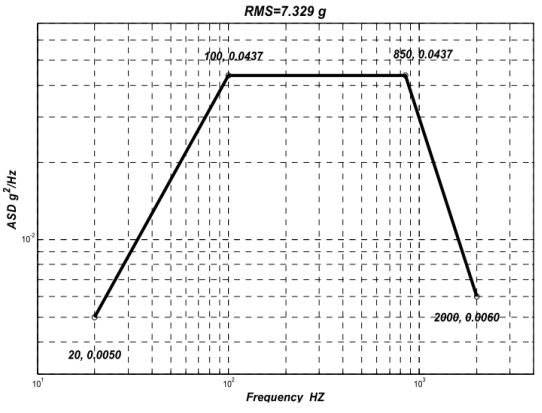
(ب)

شکل ۵. نمایی از الف) چگونگی استقرار ماهواره روی میز ارتعاش در راستای Z، ب) نتایج حاصل از آزمون روبش سینوسی در این راستا

تحریکات اتفاقی باید در سه راستای دو به دو عمود برهم، که یکی از آنها موازی محور نیروی پیشرانش موشک حامل انتخاب می‌شود، اعمال شوند. مدت آزمون برای هر محور باید دو دقیقه باشد (مگر آنکه در کتابچهٔ راهنمای موشک حامل غیر از این مشخص شده باشد). مشخصات فنی آزمون کیفیت‌سنجی، دست‌کم باید الزامات آزمون کیفیت‌سنجی موشک حامل مربوطه را شامل شود. برای انجام آزمون ارتعاش اتفاقی مطابق استاندارد ECSS [۱]، ابتدا همانند آزمون روبش سینوسی مدل سازه‌ای را به‌کمک مجموعه اتصالات قبلی روی میز اندازه‌گیری ارتعاش تثبیت کرده، چگالی طیفی توان شتاب مطابق نمودار شکل ۶ برگرفته از شناسنامهٔ فنی سازگاری ماهواره و ماهواره‌بر، وارد نرم‌افزار تولید سیگنال می‌گردد. با استفاده از چیدمان‌های مشابه آزمون‌های ارتعاش روبش سینوسی برای شتاب‌سنج‌ها در سه راستای X، Y و Z، آزمون ارتعاش اتفاقی در این سه راستا منطبق بر نمودار چگالی طیفی توان ارائه‌شده در شکل ۶ به‌مدت سه دقیقه برای هر محور روی سازهٔ ماهواره انجام می‌گیرد که نتایج این آزمون‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین ترازهای بیشینهٔ شتاب به‌دست آمده آزمون اتعاش اتفاقی در سه راستا در جدول ۶ آورده شده است.



(الف)

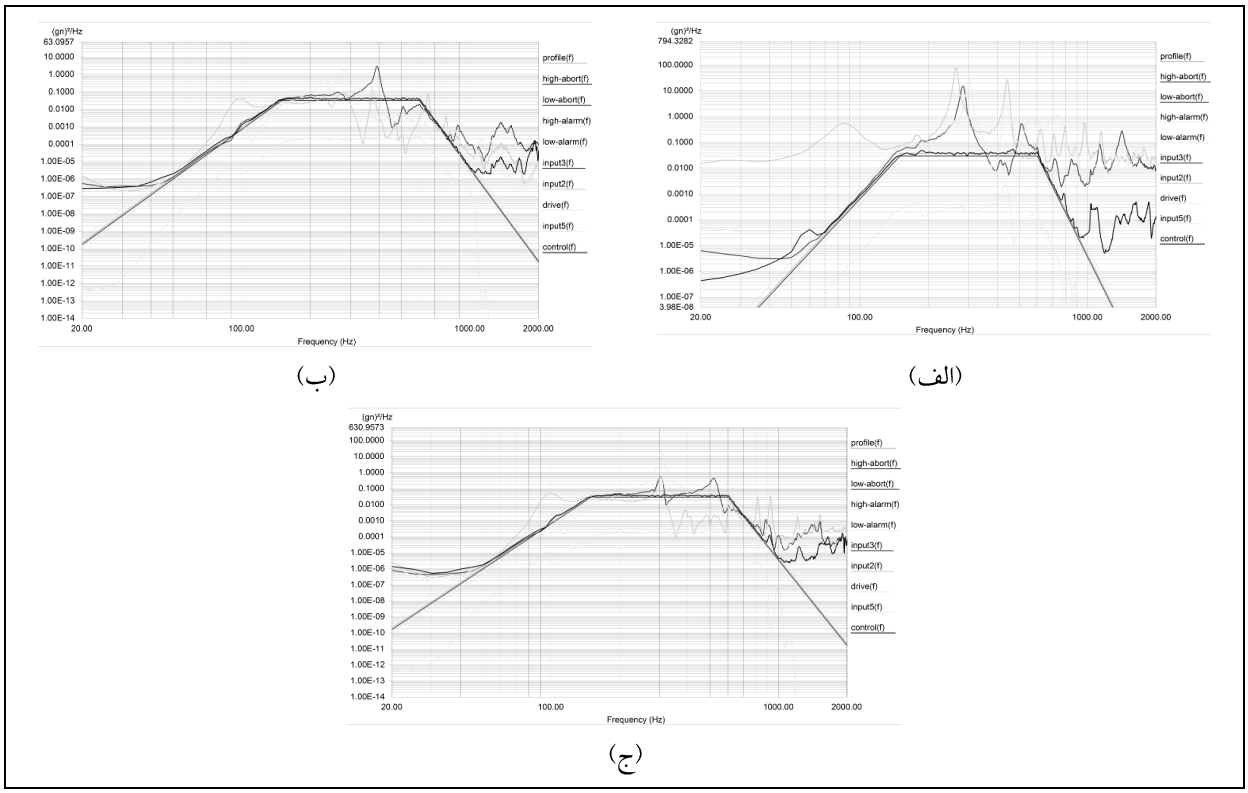


(ب)

شکل ٦. الف) نمودار مربوط به تراز ارتعاشات اتفاقی موشک حامل در لحظه پرتاب، ب) نمودار مشابه آن در نرم‌افزار دستگاه تولید ارتعاش

٤. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آزمون‌های ارتعاشات روبش سینوسی و اتفاقی در فاز کیفیت‌سنجی، به مجریان زیرسیستم‌های گوناگون ماهواره کمک می‌کند تا از وضعیت ارتعاش اجزای متنوع زیرسیستم خود مطلع شوند و با توجه به میزان مجاز ارتعاش در آن زیرسیستم، بازخورد مناسب را به مجری طراحی سازه انتقال دهند تا در صورت لزوم طرح سازه مورد بازبینی و اصلاح قرار گیرد. آزمون‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که طرح سازه‌ای ماهواره از دیدگاه سفتی و استحکام سازه‌ای وضعیت مطلوبی دارد.



شکل ۷. نتایج حاصل از آزمون ارتعاش اتفاقی؛الف) در راستای محور X ها، ب) در راستای محور Y ها، ج) در راستای محور Z ها

جدول ۱. ترازها، مدت زمان انجام و تلرانس‌های آزمون‌های کیفیت‌سنجی ارتعاشی (سینوسی و اتفاقی)

آزمون	تراز آزمون	مدت آزمون	تلرانس‌ها
ارتعاشات اتفاقی	۲ دقیقه برای هر محور	فرکانس	۵ ± درصد
		چگالی طیفی توان از ۲۰ تا ۵۰۰ هرتز (پهنای باند فیلتر ۲۵ هرتز یا کمتر)	۱– تا ۳+ دسی‌بل
		چگالی طیفی توان از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز (پهنای باند فیلتر ۵۰ هرتز یا کمتر)	۱– تا ۳+ سی‌بل
		g_{rms} کل	۱۰ ± درصد
ارتعاشات روبش سینوسی	۲ اکتاو بر دقیقه (۵ تا ۱۰۰ هرتز)	فرکانس	۲ ± درصد
		دامنه	۱۰ ± درصد
		نرخ روبش	۵ ± درصد

جدول ۲. ارتعاشات فرکانس پایین در موشک حامل

فرکانس (بر حسب هرتز)	شتاب
از ۲۵ تا ۳۵	۰/۵ g
از ۳۵ تا ۴۵	۸/۰ g
از ۴۵ تا ۷۵	۰/۵ g
از ۷۵ تا ۸۵	۱/۰ g
از ۸۵ تا ۱۷۰	۰/۵ g
از ۱۷۰ تا ۱۸۰	۰/۰ g

جدول ۳. ترازهای بحرانی شتاب در آزمون ارتعاش سینوسی در راستای X

محل اندازه‌گیری	دامنهٔ بیشینهٔ شتاب	فرکانس (برحسب هرتز)
محفظهٔ نگه‌دارنده دوربین	۷/۰ g	۹۵
صفحهٔ فوقانی سازه	۷/۱ g	۳۵ تا ۴۵
آنتن جی. پی. اس.	۷/۱ g	۴۵

جدول ٤. ترازهای بحرانی شتاب در آزمون ارتعاش سینوسی در راستای Y

محل اندازه‌گیری	دامنهٔ بیشینهٔ شتاب	فرکانس (برحسب هرتز)
دوربین	۷/۰ g	۳۵ تا ۴۵
محفظهٔ باتری فوقانی	۶/۵ g	۴۵
محفظهٔ باتری تحتانی	۷/۵ g	۴۵

جدول ۵. ترازهای بحرانی شتاب در آزمون ارتعاش سینوسی در راستای Z

محل اندازه‌گیری	دامنهٔ بیشینهٔ شتاب	فرکانس (برحسب هرتز)
دوربین	۷/۲ g	۴۵
قسمت جانبی صفحهٔ بالایی	۷ g	۹۴
محفظهٔ باتری تحتانی	۷/۱ g	۴۵

جدول ٦. ترازهای بحرانی شتاب در آزمون ارتعاش اتفاقی در سه راستای X، Y و Z

راستای انجام آزمون ارتعاش اتفاقی	محل اندازه‌گیری	تراز بیشینهٔ شتاب (g^2/Hz)	فرکانس (هرتز)	$g_{r.m.s}$
راستای X	دوربین	۱۵	۲۷۰	۰/۰۷۴
	صفحهٔ بالایی	۹۰	۲۸۰	۰/۲
	آنتن جی. پی. اس.	۵۰	۳۰۰	۰/۱۳۷
راستای Y	دوربین	۳	۳۹۰	۰/۰۳۵
	محفظهٔ باتری فوقانی	۰/۱۵	۳۸۵	۰/۰۱۷
	محفظهٔ باتری تحتانی	۲	۲۸۰	۰/۰۴۲
راستای Z	دوربین	۰/۵	۳۰۰	۰/۰۲۷
	قسمت جانبی صفحهٔ بالایی	۰/۸	۳۰۰	۰/۰۱۸
	محفظهٔ باتری تحتانی	۲۰	۳۰۰	۰/۰۵۹

۵. مآخذ

[1] ECSS-E-10-03A, February 2002

[۲] شناسنامه سازگاری فنی ماهواره رصد و موشک ماهواره‌بر.

[۳] گزارش‌های آزمون‌های ارتعاشی نانوماهواره رصد، آزمایشگاه آزمون‌های محیطی، آزمایشگاه‌های شرکت صنایع الکترواپتیک صاایران، ۱۳۸۹/۲/۱۶.

پی‌نوشت

1. Structural model
2. European Cooperation for Space Standardization (ECSS), http://www.ecss.nl (accessed Nov 12, 2013)
3. Anti-resonance
4. Power Spectral Density
5. GPS
6. Development tests
7. Qualification tests
8. Acceptance tests
9. Retro-motor