



## بررسی امکان کاهش جرم سازه یک میکروماهواره مکعبی با جایگزینی سازه از ایزوگرید به ساندویچی با استفاده از تحلیل اجزاء محدود

محمد رضا روستا<sup>1</sup>، مجید صفراآبادی<sup>2\*</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 1439955961، msafarabadi@ut.ac.ir

### چکیده

در این پژوهش، امکان کاهش جرم سازه یک میکروماهواره مکعبی دو طبقه با سازه قاب و پوسته بررسی شده است. با جایگزینی سازه ایزوگرید با ساندویچی، فرکانس طبیعی و توزیع جرم موثر مدهای سازه تغییر می‌یابد. جرم موثر مودال، یک خصوصیت دینامیک سازه و وابسته به فرکانس طبیعی، شکل مودها، جرم‌های عام و بردارهای ویژه است. جرم موثر مودال کمیتی است که میزان اهمیت یک مود ارتعاشی را هنگامی که سازه ماهواره تحت تاثیر شتاب‌های منتقله از طریق صفحه پایه قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد. جرم موثر بالا نشان‌دهنده عکس‌العمل بالا به ازای فرکانس متناظر با مود ارتعاشی مربوطه در صفحه پایه است. همچنین بارهای دینامیک اعمالی تحت تاثیر نحوه توزیع مدهای ارتعاشی در محدوده فرکانسی است. جمع اثر مدهای مختلف باعث ایجاد نیروی عکس‌العمل قابل ملاحظه‌ای در سازه می‌گردد. از این رو با تغییر سازه بررسی تغییرات فرکانس و جرم موثر مدهای سازه ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله ابتدا دو سازه هم جرم ایزوگرید و ساندویچی مقایسه شده‌اند. سپس جرم سازه ساندویچی به گونه‌ای کاهش یافته است که فرکانس‌های طبیعی سازه ساندویچی سبک به فرکانس‌های طبیعی سازه ایزوگرید نزدیک شود. با فرض هم جرم بودن دو سازه فرکانس‌های طبیعی سازه ساندویچی دو برابر سازه ایزوگرید به دست آمد اما توزیع جرم‌های موثر در جهت پرتاب در سازه ایزوگرید مناسب‌تر است. با تغییر طراحی سازه از ایزوگرید به سازه ساندویچی و بهینه کردن خواص سازه جدید، کاهش قابل توجه در جرم و بهبود خواص مودال سازه حاصل خواهد شد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 اردیبهشت 1395

پذیرش: 18 مرداد 1395

ارائه در سایت: 29 شهریور 1395

کلید واژگان:

میکروماهواره

ایزوگرید

صفحه ساندویچی

اجزاء محدود

## Study of mass reduction- possibility of a cubic microsatellite by replacing isogrid structure with sandwich panel structure using finite element analysis

Mohammadreza Roosta, Majid Safarabadi\*

School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1439955961, Tehran, Iran, msafarabadi@ut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 27 April 2016

Accepted 08 August 2016

Available Online 19 September 2016

### Keywords:

Microsatellite

Isogrid

Sandwich panel

Finite element

### ABSTRACT

In this research the possibility of mass reduction in a two-module cubic microsatellite with skin – frame structure is studied. Natural frequencies and effective mass distribution change by replacing isogrid structure with sandwich panel (honeycomb). Modal effective mass is a dynamic characteristic of structure and depends on natural frequencies, mode shapes, general masses and eigenvectors. Modal effective mass is a quantity that shows the importance of a mode when satellite is under acceleration loads through the baseplate. High modal effective mass shows high reaction loads on baseplate in corresponding frequency. Also, acting dynamic loads are affected by distribution of modes in frequency range. The sum of effects of different modes creates significant reaction loads. Hence, study of frequency and effective mass changes by converting the structure design from isogrid to sandwich structure is necessary. In this paper, the first two isogrid and sandwich structures with equal masses are compared. Then mass of sandwich structure is decreased in such a way that natural frequencies of light sandwich structure approach natural frequencies of isogrid structure. In equal masses case, natural frequencies of sandwich structure are twice the natural frequencies of isogrid structure but effective mass distribution of isogrid structure is better along the launch direction. By changing the isogrid structure design to sandwich panel structure and optimization of the new structure characteristics a noticeable reduction in mass and improvement in modal behavior could be obtained.

### 1-مقدمه

سفتی مخصوص و استحکام مخصوص به کار می‌روند. مواد با سفتی و استحکام

مخصوص بالا جرم ماهواره و اجزاء را کاهش می‌دهند، که برای رسیدن به

مقدار تعیین شده از سوی پرتابگر لازم است. علاوه بر این سفتی بالا و جرم

پایین باعث افزایش فرکانس طبیعی ماهواره می‌شود که مانع اتفاق افتادن

در کاربردهای فضایی مواد باید تا آنجا که ممکن است سبک باشند و حداکثر

کارایی ممکن را داشته باشند. اگرچه سفتی و استحکام دو معیار اساسی در

انتخاب ماده خام برای سازه‌های معمولی هستند، اما در سازه ماهواره معمولاً

Please cite this article using:

M. Roosta, M. Safarabadi, Study of mass reduction- possibility of a cubic microsatellite by replacing isogrid structure with sandwich panel structure using finite element analysis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 241-248, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بهینه‌سازی سازه فضاپیماها شناخته شده‌اند. صفحات ایزوگرید از تعدادی چندضلعی یکسان تشکیل شده است. اگر این مدل سازه پوسته داشته باشد به آن ایزوگرید بسته و اگر بدون پوسته باشد به آن ایزوگرید باز می‌گویند. صفحات ساندویچی از دو لایه رویی و زیرین و یک هسته سبک‌وزن تشکیل شده‌اند. "شکل 1" صفحات ایزوگرید و ساندویچی را نشان می‌دهد.

صفحات ساندویچی از دو لایه تشکیل می‌شوند که به وسیله یک هسته از هم جدا شده‌اند. جنس هسته صفحات ساندویچی از صفحات فوم، لانه‌زنبوری فلزات با چگالی پایین و دیگر مواد با چگالی پایین است. در بین شکل‌ها و مواد مختلف هسته، ورق لانه‌زنبوری (شش وجهی‌های عمود بر لایه‌ها) مانند "شکل 1" پرکاربردتر هستند. هسته علاوه بر ایجاد فضا بین دو لایه که باعث افزایش سفتی خمشی می‌گردد، تنش برشی خارج از صفحه را نیز تحمل می‌کند. جنس پوسته این صفحات از ورق آلایزهای آلومینیوم، فولاد، تیتانیوم و موادمرب چندلایه و دیگر مواد ورق مانند با استحکام بالا است که با توجه به خواص مورد نظر انتخاب می‌شوند [4].

سازه‌های آلومینیومی، بخاطر نسبت وزن به استحکام مناسب در میان فلزات و همچنین خواص مناسب این آلایزها در محیط خارج از جو و انعطاف‌پذیری آن‌ها در ساخت، در سازه‌های فضایی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. سازه‌های ساندویچی نیز به دلیل وزن بسیار کم، سفتی خمشی مخصوص بالا، استحکام بالا در مقابل بارهای گسترده و قابلیت جذب انرژی بالا به‌صورت گسترده در ساخت سازه‌های فضایی استفاده می‌شوند. در زمینه مقایسه جنس سازه‌های فضایی ایزوگرید و ساندویچی تاکنون کار جامعی انجام نشده است و اکثر تلاش‌ها برای طراحی سازه ساندویچی یک ماهواره با سازه آلومینیومی یا بهینه‌سازی سازه یک ماهواره موجود و یا آزمایش و مدل‌سازی تشخیص رفتار اعضای سازنده اسکلت سازه و یا صفحات جانبی بوده است. در زمینه طراحی بررسی سازه ماهواره، حسین‌پور بناب [5]، برای یک ماهواره میکرو ساخته شده با سازه آلومینیومی، سازه ساندویچی طراحی کرده است. در طراحی سازه ساندویچی به مقایسه خصوصیات مودال دو مدل به صورت مستقیم پرداخته نشده است و بیشتر بر روی طراحی سازه ساندویچی با توجه به معیارهای شکست بحث شده است. هدف کاهش وزن ماهواره با تغییر سازه از آلومینیوم به صفحات ساندویچی بوده است. در این پژوهش با طراحی سازه ساندویچی، 50% از جرم سازه کاسته شده است. در ماهواره در نظر گرفته‌شده جرم سازه 35% از جرم کل را تشکیل می‌دهد. بنابراین نزدیک به 16% از جرم کل با طراحی سازه ساندویچی کاهش یافته‌است.

یانگ [6]، طراحی سازه ماهواره علم و فناوری شماره 3 کره با سازه تمام ساندویچی با استفاده از اتصالات جدید را انجام داده است و با استفاده از

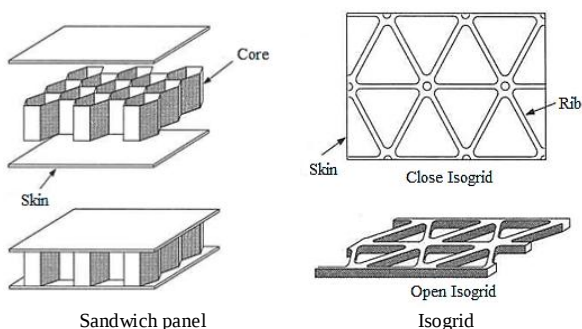


Fig. 1 Isogrid and sandwich panel structure

شکل 1 سازه‌های ایزوگرید و صفحه ساندویچی

تشدید در فرکانس تحریک توسط پرتابگر می‌گردد [1].

یکی از مهمترین گام‌ها در فرآیند طراحی سازه‌های فضایی انتخاب جنس سازه است. عامل اصلی در این انتخاب می‌تواند نسبت استحکام به وزن باشد که از اصلی‌ترین عوامل حضور آلایزهای آلومینیوم و موادمرب در این عرصه است [2].

عموماً دو نوع ماده برای ساختار سازه‌های فضایی مناسب هستند: آلایزهای فلزی و موادمرب. بیشتر آلایزهای فلزی رفتار همگن دارند. موادمرب، مخلوط قابل تشخیص با چشم دو یا چند فاز مختلف فلزی یا غیرفلزی هستند که معمولاً رفتار ناهمگنی را از خود نشان می‌دهند. موادمرب پیشرفته از یک فاز تقویت کننده و یک فاز پیوسته نگهدارنده به اسم زمینه تشکیل می‌شوند. فاز تقویت کننده استحکام و سختی ماده مرکب را افزایش می‌دهد و فاز زمینه رشته‌های تقویت کننده و یا ذرات را در کنار هم نگه می‌دارد [1].

بسیاری از آلایزهای موجود برای سازه‌های فضایی مناسب هستند که هرکدام ویژگی‌های مطلوب یک طراحی را برآورده می‌کنند. در این میان آلایزهای آلومینیوم که سبک هستند و دارای استحکام کافی می‌باشند برای هر نوع از سازه شامل ورقه‌ها، اعضای خرپایی و براکت‌ها بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما تیتانیوم، برلیوم، منیزیم و فولاد ضدزنگ هم به‌خاطر ویژگی‌های منحصر به فردشان گاهی در طراحی‌ها ظاهر می‌شوند [1].

با فرض این‌که هر دو نوع ماده اولیه فلزی و مرکب خواسته‌های ضروری طراحی را برآورده کنند، در مقایسه اولیه بین این دو نوع سازه، می‌توان به هزینه تهیه مواد خام اشاره کرد. هزینه تهیه مواد خام سازه‌های فلزی معمولاً یک تا شش درصد هزینه تهیه مواد خام برای یک سازه کامپوزیتی است [2]. با این حال هزینه مواد اولیه بخش کوچکی از هزینه‌های یک ماموریت فضایی می‌باشد.

در دو دهه اخیر در طراحی و ساخت سازه‌های فضایی بسیاری از توجهات به دلیل وزن کم هسته‌های لانه‌زنبوری و سختی و استحکام مناسب پوسته‌های مرکب، از آلایزهای آلومینیوم به سمت صفحات ساندویچی برای ساختار بدنه رفته‌است. اولین ماهواره با سازه تمام کامپوزیت، ماهواره فُرت است که در سال 1996 میلادی توسط ایالات متحده آمریکا به مدار پایین پرتاب شد [3] و پس از آن به صورت گسترده تلاش‌ها برای گسترش این نوع سازه ادامه یافت.

از آن‌جا که وظیفه اصلی سازه ایجاد فضای کافی برای زیرسیستم‌ها، در کنارهم نگه‌داشتن اجزاء و محافظت فیزیکی در برابر عوامل دیگر و بارهای وارده می‌باشد، با توجه به مزایا و معایب هر سازه این سوال مطرح می‌شود که کدام جنس سازه این وظیفه را بهتر انجام می‌دهد؟ برای پاسخ به این سوال باید نحوه و جنس بارهای وارد به سازه مشخص باشد. می‌دانیم که بارهای وارد به سازه از دو نوع استاتیکی و دینامیکی هستند و با تبدیل بارهای دینامیکی به بارهای شبه استاتیکی تحلیل‌های لازم برای طراحی سازه انجام می‌شود.

در این میان با توجه به این‌که بارهای وارد به سازه به‌شدت به خواص مودال سازه مرتبط است و خواص مودال را چیدمان اجزاء و ویژگی‌های سازه از قبیل شکل کلی، جنس، شکل مقاطع اعضا و بسیاری دیگر عوامل مشخص می‌کنند، از این‌رو در شرایط یکسان، انتخاب جنس سازه چالش بزرگی برای طراحان برای دستیابی به بهترین عملکرد با صرف حداقل هزینه است.

دو طراحی سازه ایزوگرید و ساندویچی به عنوان دو روش برای

تست‌های شبه‌استاتیک، آنالیز مودال، ارتعاشات و تحلیل گرمایی صلاحیت سازه طراحی شده بررسی شده است. با استفاده از اتصالات جدید نیاز به قاب متصل کننده صفحات ساندویچی از بین رفته و با حذف قاب‌ها جرم سازه کاهش قابل توجهی یافته است. در این پژوهش مقایسه مشخصات مودال ماهواره با سازه ساندویچی و سازه آلومینیومی انجام نشده است. با کاهش 14.8 کیلوگرمی جرم با تغییر سازه هزینه پرتاب 148000 تا 296000 دلار کاهش یافته است.

چو و ری [7]، خواص مودال یک ماهواره مکعبی با سازه یکپارچه ساندویچی را با استفاده از روش اجزاء محدود و آزمایش بررسی و مقایسه کرده‌اند. صفحات ساندویچی از هسته لانه‌زنبری آلومینیومی و پوسته کربن/اپوکسی تشکیل شده‌اند. در این پژوهش خطای نتایج حاصل از آزمایش و مدل‌سازی ماهواره در نرم‌افزار با مدل کردن کامل اتصالات کمتر از 5% بوده است. از این رو مدل‌سازی کامل اتصالات برای به‌دست آوردن نتایج نزدیک، هرچند کاری زمان‌بر و دشوار است، امری ضروری به نظر می‌رسد.

امامی و صفرآبادی [8] تاثیر هندسه و صلبیت صفحات جانبی یک ماهواره مکعبی در رفتار سازه تحت بارگذاری دینامیک حاصل از شرایط محیطی پرتاب را بررسی کرده‌اند. در این پژوهش اثر درجه‌های صفحات کناری بر رفتار دینامیکی سازه بررسی شده است. نتایج تحلیل در این تحقیق نشان می‌دهد که پاسخ دینامیکی و لذا بارهای وارده تابع هندسه درب‌ها و میزان صلبیت قاب درب‌ها است. برای یک مدل ساخته شده با هندسه ثابت (شکل کلی صفحات جانبی یکسان باشد)، مشخصات مقطع تقویت کننده‌ها تاثیر مهمی در نحوه توزیع جرم‌های موثر مربوط به موده‌های صفحات جانبی دارد (مودهای محدوده 280-350 هرتز) در عین حال، مجموع جرم‌های موثر در محدوده موده‌های ارتعاشی مربوط به صفحات جانبی تغییر چندانی نمی‌کند.

در مورد تاثیر قطعات سازه بر رفتار کلی ماهواره صفرآبادی و امامی [9] همچنین تاثیر نحوه توزیع جرم موثر موده‌های ارتعاشی و رفتار محلی صفحات جانبی یک ماهواره مکعبی را بررسی کرده‌اند. تحلیل‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از تقویت‌کننده (یا درب‌های جانبی و قاب) بر روی صفحات جانبی ماهواره مکعبی آلومینیومی دو طبقه موده‌های مربوط به صفحات و جرم‌های موثر مربوطه را از نظر نحوه توزیع جرم‌های موثر تحت تاثیر قرار می‌دهد. این تغییرات می‌تواند اثر قابل ملاحظه‌ای در مقدار تحلیلی بارهای حاصل از ارتعاشات اتفاقی و پدیده شوک داشته باشد.

مهم‌ترین پژوهشی که در زمینه مقایسه رفتار دینامیکی ماهواره با تغییر سازه انجام شده است، پژوهش داوود و همکاران [10] است که به بررسی تغییر خواص مودال سازه یک ماهواره فرضی و رفتار دینامیکی آن با تغییر سازه از صفحات ساده به ایزوگرید است. در این پژوهش سازه ماهواره به تنهایی بررسی شده است. با استفاده از سازه ایزوگرید، جرم ماهواره کاهش می‌یابد اما سفتی تغییر چندانی نمی‌کند. از این رو فرکانس‌های طبیعی سازه افزایش می‌یابند. با تغییر سازه به ایزوگرید جرم سازه 22% کاهش یافته و فرکانس اول سازه ایزوگرید 8.33% بیشتر از فرکانس سازه آلومینیوم معمولی بوده است. بودجمانی و همکاران [11]، تحلیل مودال صفحات ساندویچی مورد استفاده در سازه ماهواره را انجام داده‌اند و مدل خواص معادل را برای ساده‌سازی تحلیل صفحات ساندویچی ارائه کرده‌اند. در این پژوهش صفحات ساندویچی به صورت تیر یک سرگیردار در نظر گرفته شده‌اند و با استفاده از مدل اجزاء محدود و آزمایش خصوصیات مدل تیرها به دست آمده‌است. اختلاف نتایج حاصل از مدل اجزاء محدود و آزمایش برای فرکانس اول و دوم

کمتر از 4% و برای فرکانس سوم کمتر از 10% درصد بوده است و مدل معادل ارائه شده برای صفحات ساندویچی با دقت مناسب هزینه محاسبات در تحلیل صفحات ساندویچی سازه ماهواره را کاهش می‌دهد. اثر ضخامت هسته، جنس هسته، ضخامت پوسته و اندازه سلول‌های هسته لانه‌زنبری بر روی خصوصیات مودال صفحه ساندویچی بررسی شده است. نتایج این پژوهش به این صورت هستند:

0 موده‌های خمشی و پیچشی صفحه به صورت مستقیم به ضخامت هسته ارتباط دارند و موده‌های جانبی با افزایش ضخامت هسته افزایش کمی دارند.

0 تغییر جنس هسته باعث تغییر چشم‌گیر فرکانس می‌شود و پوسته مرکب نسبت به پوسته آلومینیومی سفتی صفحه ساندویچی را افزایش می‌دهد. 0 فرکانس‌های طبیعی صفحه به ضخامت پوسته بستگی دارد و ضخامت پوسته یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی صفحات ساندویچی است. 0 اندازه سلول‌ها تاثیر چندانی بر روی فرکانس‌های طبیعی ندارد.

هاریش و شارمن [12]، فرکانس‌های طبیعی یک صفحه ساندویچی را با تغییر ضخامت هسته لانه‌زنبری با شرایط مرزی یک سر گیردار، دو سر لولا و چهار ضلع گیردار با استفاده از آزمایش و روش اجزاء محدود به دست آورده‌اند. خطای حاصل از دو روش آزمایش و اجزاء محدود کمتر از 10% است. طبق نتایج این پژوهش با افزایش ضخامت هسته، فرکانس‌های طبیعی صفحه ساندویچی افزایش می‌یابد.

در زمینه رفتار صفحات ایزوگرید، اثر جرم معادل در طراحی بهینه صفحات ایزوگرید از نظر ارتعاشات مکانیک توسط خاکپور و نارویی [13] انجام شده‌است. در این پژوهش اثر جرم معادل از نظر فرکانسی و تنش‌های به وجود آمده در اثر ارتعاشات هارمونیک بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با افزایش ضخامت صفحات ایزوگرید و همچنین افزایش عرض ریب<sup>1</sup> این صفحات باعث افزایش فرکانس طبیعی مود اول صفحه می‌شود. همچنین افزایش جرم معادل بر روی صفحه ایزوگرید فرکانس طبیعی صفحه را کاهش می‌دهد.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، فرکانس تحریک توسط پرتابگر، فرکانس طبیعی ماهواره و خواص مودال ماهواره نقش اساسی در تعیین بارهای وارد به سازه ایفا می‌کنند. با تبدیل سازه ایزوگرید به سازه ساندویچی، جرم ماهواره، فرکانس‌های طبیعی، توزیع موده‌های ارتعاشی و جرم‌های موثر دچار تغییر شده و این امر می‌تواند منجر به تغییر قابل ملاحظه در بارهای وارد به ماهواره حين پرتاب گردد. لذا هدف از انجام این تحقیق، بررسی تغییر رفتار دینامیکی سازه با تغییر سازه از آلومینیومی (ایزوگرید) به سازه ساخته شده از صفحات ساندویچی و بررسی امکان کاهش جرم با توجه به نتایج حاصل از تحلیل مودال، در یک ماهواره مکعبی است.

## 2- جزئیات ماهواره نمونه

ماهواره مدل، یک ماهواره مکعبی با ابعاد تقریبی 500×500×700 میلی‌متر است که از دو طبقه بالا و پایین تشکیل شده است. سازه هر طبقه قاب و پوسته است و دو طبقه بالا و پایین در صفحه میانی به هم متصل شده‌اند. سازه‌های مکعبی به دلیل امکان دسترسی آسان به زیرسیستم‌های مختلف، فضای مناسب برای جانمایی و به‌کارگیری صفحات خورشیدی تخت در سطوح جانبی کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. ساختار دو طبقه امکان جانمایی مناسب برای عناصری مانند باتری‌ها در طبقه فوقانی را جهت

<sup>1</sup> Rib

**جدول 2** مشخصات هسته و پوسته صفحات سازه ساندویچی هم جرم با سازه ایزوگرید (سازه 2)

Table 2 Sandwich panels properties

| عضو                  | لایه چینی پوسته            | ضخامت (mm) |
|----------------------|----------------------------|------------|
| صفحه پایه            | پوسته 9 لایه کربن / اپوکسی | 40 هسته    |
|                      | پوسته                      | 2.25       |
| صفحه میانی           | پوسته 6 لایه کربن / اپوکسی | 20 هسته    |
|                      | پوسته                      | 1.08       |
| صفحات جانبی و بالایی | پوسته 7 لایه کربن / اپوکسی | 10 هسته    |
|                      | پوسته                      | 0.84       |

ساندویچی را نشان می‌دهد. جداول 5 تا 7 نیز به ترتیب خواص مکانیکی آلومینیوم‌های 7075 و 6061، خصوصیات مکانیکی هسته لانه‌زنبوری و خواص مکانیکی کربن/اپوکسی را ارائه می‌کنند.

برای سبک کردن سازه ساندویچی از ضخامت هسته و پوسته مطابق جدول 3 و 4 استفاده شده است. جهت امکان مقایسه بین سازه‌ها اتصالات در تمامی سازه‌ها به صورت یکسان به کار رفته است.

**جدول 3** مشخصات سازه ساندویچی سبک (سازه 3)

Table 3 Light Sandwich Structure properties

| عضو                  | لایه چینی پوسته            | ضخامت (mm) |
|----------------------|----------------------------|------------|
| صفحه پایه            | پوسته 4 لایه کربن / اپوکسی | 30 هسته    |
|                      | پوسته                      | 1          |
| صفحه میانی           | پوسته 4 لایه کربن / اپوکسی | 15 هسته    |
|                      | پوسته                      | 0.48       |
| صفحات جانبی و بالایی | پوسته 4 لایه کربن / اپوکسی | 7.5 هسته   |
|                      | پوسته                      | 0.4        |

**جدول 4** مشخصات سازه ساندویچی سبک‌تر (سازه 4)

Table 4 Lighter Sandwich Structure properties

| عضو                  | لایه چینی پوسته            | ضخامت (mm) |
|----------------------|----------------------------|------------|
| صفحه پایه            | پوسته 2 لایه کربن / اپوکسی | 15 هسته    |
|                      | پوسته                      | 0.2        |
| صفحه میانی           | پوسته 2 لایه کربن / اپوکسی | 10 هسته    |
|                      | پوسته                      | 0.1        |
| صفحات جانبی و بالایی | پوسته 1 لایه کربن / اپوکسی | 5 هسته     |
|                      | پوسته                      | 0.05       |

**جدول 5** خصوصیات مکانیکی آلومینیوم‌های 7075 و 6061 [1]

Table 5 Mechanical Properties of AL7075 and AL6061

| جنس     | $E$ (MPa) | $G$ (MPa) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\nu$ |
|---------|-----------|-----------|-----------------------------|-------|
| AL 7075 | 68258     | 26200     | 2713                        | 0.33  |
| AL 6061 | 71016     | 26890     | 2796                        | 0.33  |

**جدول 6** خصوصیات مکانیکی هسته لانه‌زنبوری [12]

Table 6 Mechanical Properties of Honeycomb Core

| جنس         | $E_1$ (Pa) | $E_2$ (Pa) | $G_{12}$ (Pa) | $G_{13}$ (MPa) | $G_{23}$ (MPa) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|------------|------------|---------------|----------------|----------------|-----------------------------|
| لانه زنبوری | 10000      | 100        | 100           | 72             | 138            | 32                          |

**جدول 7** خواص مکانیکی پوسته کامپوزیتی [1]

Table 7 Mechanical Properties of Composite Skin [1]

| جنس             | $E_{11}$ (MPa) | $E_{22}$ (MPa) | $G_{12}$ (MPa) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\nu$ |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|-------|
| پوسته کامپوزیتی | 148000         | 148000         | 5500           | 1500                        | 0.01  |

برآورده کردن نیازهای ویژه حرارتی این اجزاء و عناصر حساس به ارتعاشات مانند بوردهای الکترونیکی در طبقه پایینی و در تماس با صفحه پایه جهت دریافت حداقل ارتعاشات منتقله از طریق پرتاب‌کننده را فراهم نموده و این سازه می‌تواند با حداقل تغییرات و لذا صرف حداقل هزینه و زمان برای مأموریت‌های مختلف با نیازمندی‌های متفاوت در نظر گرفته شود. "شکل 2" مدل سازه طبقه بالایی، "شکل 3" مدل سازه طبقه پایینی را نشان می‌دهد. جنس و ابعاد اعضای مختلف سازه برای مدل ایزوگرید در جدول 1 آورده شده است.

مدل سازه ساندویچی همان مدل سازه ایزوگرید با تغییر صفحات جانبی، پایه، میانی و بالایی به صفحات ساندویچی است. صفحات ساندویچی سازه ساندویچی از هسته لانه‌زنبوری آلومینیوم 5052 و پوسته‌های ماده مرکب کربن/اپوکسی بافته شده<sup>1</sup> به صورت متقارن، تشکیل شده‌اند. جدول 2 ضخامت و لایه چینی اعضای مورد استفاده در مدل ساندویچی در هر سمت صفحه

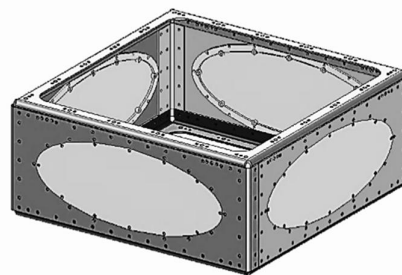


Fig. 2 Upper module Structure model

شکل 2 مدل سازه طبقه بالایی بدون صفحه بالایی

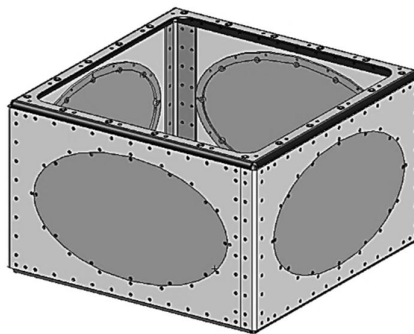


Fig. 3 Lower module Structure model

شکل 3 مدل سازه طبقه پایین

**جدول 1** ابعاد و جنس اجزای سازه ایزوگرید

Table 1 Dimensions and Materials of Isogrid Structure

| عضو                  | ابعاد (cm)         | جنس     |
|----------------------|--------------------|---------|
| صفحه پایه            | 46 × 46 × 2        | AL 7075 |
| صفحات جانبی پایینی   | 45 × 45 × 0.12     | AL 6061 |
| صفحه میانی           | 42.7 × 42.7 × 0.3  | AL 7075 |
| صفحات جانبی بالایی   | 45 × 14 × 0.1      | AL 6061 |
| صفحه بالایی          | 42.7 × 42.7 × 0.25 | AL 7075 |
| فریم‌های سازه بالایی | 14 × 2 × 0.3       | AL 7075 |
| فریم‌های سازه پایینی | 23 × 2 × 0.3       | AL 7075 |

<sup>1</sup> Woven

ذکر است که هدف از این مدل سازی مطالعه دقیق رفتار پیچ ها نمی باشد. نحوه مدل سازی این پیچ ها به این صورت است که، دو عضو اتصال از طریق گره های متناظر و دقیقاً روبروی هم با یک المان تیر به هم متصل می گردند. در صورت مشاهده وجود نیروی متمرکز موجود در پیچ ها روی هر یک از عضوهای اتصال، گره های اطراف گره مربوط به المان تیر کوپل<sup>9</sup> می شوند. به این ترتیب تغییر مکان های ناحیه شامل گره مرکزی المان تیر و گره های اطراف، در اثر اعمال نیروها تغییر مکان های یکسانی را نشان می دهند. به طور کلی کوپل در جات آزادی برای مدل سازی اتصالات میان دو جسم نیز مورد استفاده قرار می گیرد. در این مدل سازی یک گره به عنوان گره اصلی انتخاب می گردد و بقیه گره ها از درجه آزادی این گره تبعیت می نمایند. قاب های اطراف در پیچ بیضی شکل نیز با المان تیر مدل شده اند. تعداد المان های مورد استفاده برای مدل ایزوگرید و مدل لانه زنبوری در جدول 6 ارائه شده است. "شکل 4" مدل اجزاءمحدود طبقه دوم سازه بدون صفحه بالایی و "شکل 5" مدل اجزاءمحدود طبقه اول سازه را نشان می دهد.

جهت مدل سازی شرایط مرزی سازه ماهواره نیز 12 گره در قسمت صفحه پایه در محل اتصال سازه به پرتابگر در شش درجه آزادی ثابت شده است. "شکل 6" شرایط مرزی دو سازه ایزوگرید و ساندویچی را نشان می دهد.

#### 4- نتایج

در این بخش نتایج آنالیز مودال دو طراحی ایزوگرید و ساندویچی ارائه می گردد. "شکل 7 تا 9" سه مود اول سازه ایزوگرید و "شکل 10 تا 12" سه مود اول سازه ساندویچی را نشان می دهد.

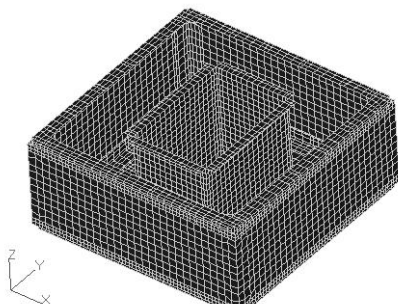


Fig. 4 Upper module FE model

شکل 4 مدل اجزاء محدود طبقه بالایی بدون صفحه بالایی

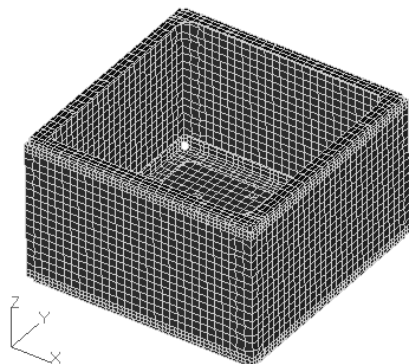


Fig. 5 Lower module FE model

شکل 5 مدل اجزاء محدود طبقه پایین

با توجه به خواص به کار رفته برای اجزای تشکیل دهنده جرم سازه ها به صورت جدول 5 است. یک سازه ایزوگرید با سه سازه ساندویچی در این جدول به عنوان سازه های 1 تا 4 معرفی شده اند. سازه شماره 2 یک سازه ساندویچی هم جرم با سازه ایزوگرید در نظر گرفته شده است. سازه شماره 3 سازه سبک ساندویچی است که با کاهش 35% جرم سازه ساندویچی به دست آمده است. سبک ترین سازه نیز سازه ساندویچی با مشخصات جدول 4 است که با کاهش 40% جرم سازه ساندویچی سبک (سازه 3) به دست آمده است.

#### 3- مدل اجزاءمحدود

در بسیاری از کاربردهای عمومی مهندسی، براساس روش های تحلیلی عمل می شود. اما با افزایش پیچیدگی هندسه، شرایط مرزی و مواد، در بسیاری از مواقع اگر استفاده از روش های تحلیل کار غیرممکنی نباشد بسیار دشوار و هزینه بر است. در این جا استفاده از روش های عددی، به عنوان مثال روش اجزاء محدود در تحلیل سازه ها، مسائل بسیار پیچیده را با دقت مناسب حل می کند. با توجه به همین محدودیت های موجود در حل مسایل سازه ماهواره، روش اجزاءمحدود به عنوان روش تحلیل انتخاب می شود.

در تحلیل مودال با توجه به اهمیت توزیع جرم و هندسه، تا آن جا که ممکن است باید توزیع جرم نزدیک به مدل اصلی انتخاب شود. با توجه به هدف تحلیل (به دست آوردن فرکانس های طبیعی و جرم های موثر هر مود)، استفاده از مدل تفصیلی نتایج نزدیک تر به مدل واقعی به دست خواهد داد. برای انجام عملیات پیش پردازش<sup>1</sup> و پس پردازش<sup>2</sup> از نرم افزار پترن<sup>3</sup> استفاده شده است. برای انجام تحلیل های سازه ای از نرم افزار نسترن<sup>4</sup> استفاده شده است.

جهت مدل سازی صفحات از المان صفحه ای چهارضلعی<sup>5</sup> دارای چهار گره و 20 درجه آزادی استفاده شده است. این المان برای هر دو حالت مواد ایزوتروپ و ارتو تروپ قابل استفاده است. لذا برای چیدمان لایه های مرکب این المان قابلیت پذیرش لایه چینی در محدوده تئوری کلاسیک لایه ای<sup>6</sup> را دارد. بنابراین با استفاده از خواص مواد که در جداول 5 تا 7 ذکر شد، لایه های صفحات ساندویچی به صورت یک صفحه کامپوزیتی به نرم افزار داده شده است و نرم افزار یک صفحه کامپوزیتی که لایه های مختلف آن با یکدیگر به صورت Merge هستند در نظر می گیرد. برای مدل سازی بهتر صفحات با ضخامت بیشتر و مشاهده بهتر تاثیر شرایط مرزی در صفحه پایه، در قسمت های تقویت کننده سازه از المان مکعبی<sup>7</sup> دارای 8 گره استفاده شده است. در مدل لانه زنبوری صفحه پایه نیز با استفاده از المان های چهارضلعی مدل شده است. از المان تیر<sup>8</sup> نیز جهت مدل سازی پیچ ها استفاده شده است. لازم به

جدول 8 جرم سازه ها

Table 8 Mass of Structures

| جرم (kg) | جنس سازه                      |
|----------|-------------------------------|
| 10.56    | سازه ایزوگرید (سازه 1)        |
| 10.58    | سازه ساندویچی (سازه 2)        |
| 6.98     | سازه ساندویچی سبک (سازه 3)    |
| 4.08     | سازه ساندویچی سبک تر (سازه 4) |

<sup>1</sup> Preprocessing

<sup>2</sup> Post processing

<sup>3</sup> MSC/PATRAN

<sup>4</sup> MSC/NASTRAN

<sup>5</sup> Quadrilateral

<sup>6</sup> Classical Lamination Plate Theory

<sup>7</sup> Solid

<sup>8</sup> Beam

<sup>9</sup> Multi-Point Constraint (MPC)

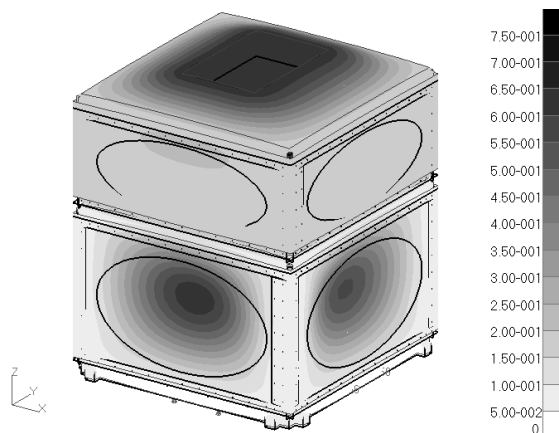


Fig. 9 Isogrid model third mode (spectrum in m)

شکل 9 مود سوم مدل ایزوگرید (کانتور برحسب متر)

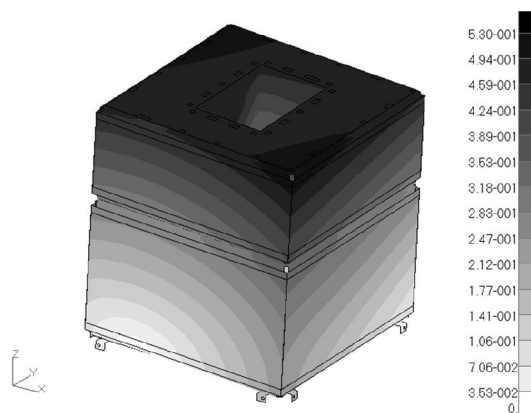


Fig. 10 Sandwich model first mode (spectrum in m)

شکل 10 مود اول مدل ساندویچی (کانتور برحسب متر)

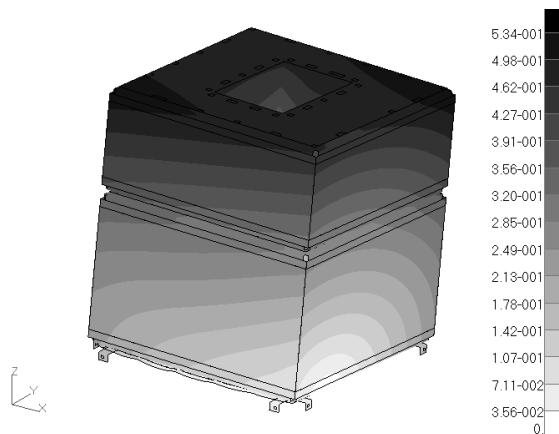


Fig. 11 Sandwich model second mode (spectrum in m)

شکل 11 مود دوم مدل ساندویچی (کانتور برحسب متر)

با توجه به "شکل‌های 7 و 8" مشاهده می‌شود که در مدهای اول سازه ایزوگرید برخی اجزای سازه تغییر مکان قابل توجهی دارند که نشان می‌دهد در این نقاط نیاز به تقویت سازه است. این تقویت سازه باعث افزایش چشمگیر جرم سازه می‌گردد، اما در نقطه مقابل، تغییر مکان سازه ساندویچی بر روی اجزاء ظاهر نشده است.

جدول 9 تعداد و مشخصات المان‌های استفاده شده

Table 9 Number and properties of used elements

| المان    | نوع المان             | مدل ایزوگرید | مدل ساندویچی |
|----------|-----------------------|--------------|--------------|
| تیر      | CBAR                  | 858          | 490          |
| چهارضلعی | CQUAD4                | 13560        | 14433        |
| چهارضلعی | CTRIA3                | 454          | 16           |
| مکعب     | CHEXA                 | 2984         | -            |
|          | Number of grid points | 19369        | 16842        |
|          | Number of Elements    | 17856        | 14923        |

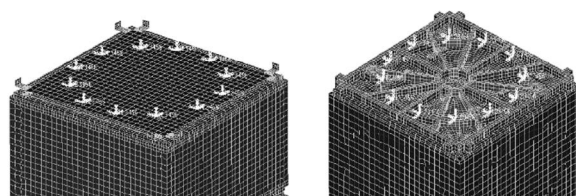


Figure 6 Isogrid and Sandwich model Boundary condition

شکل 6 شرایط مرزی مدل ایزوگرید و ساندویچی

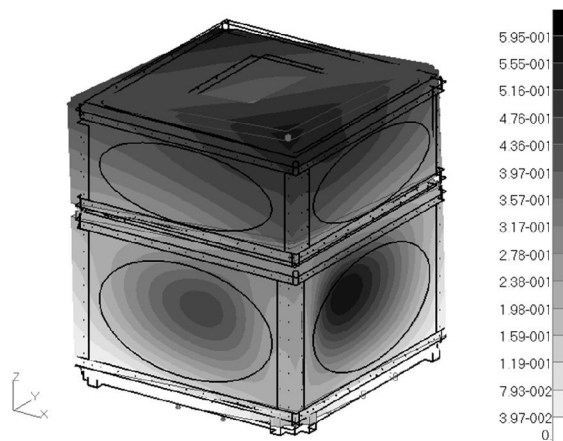


Fig. 7 Isogrid model first mode (spectrum in m)

شکل 7 مود اول مدل ایزوگرید (کانتور برحسب متر)

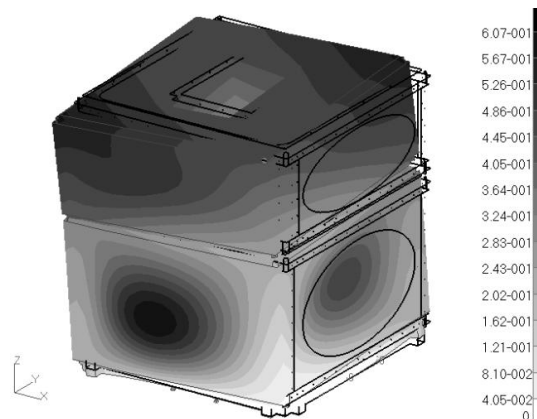


Fig. 8 Isogrid model second mode (spectrum in m)

شکل 8 مود دوم مدل ایزوگرید (کانتور برحسب متر)

جدول 10 فرکانس و جرم موثر مودهای موثر سازه ایزوگرید (سازه 1)

**Table 10** Effective modes frequency and effective mass of Isogrid structure

| شماره مود | فرکانس (Hz) | جرم موثر | x      | y      | z     |
|-----------|-------------|----------|--------|--------|-------|
| 1         | 63.56       | 30.65%   | 18.21% | 0.00%  | 0.00% |
| 2         | 64.8        | 18.21%   | 30.56% | 0.00%  | 0.00% |
| 3         | 75.51       | 0.00%    | 0.00%  | 38.75% | 0.00% |
| 9         | 159.08      | 0.00%    | 0.00%  | 9.29%  | 0.00% |
| 16        | 179.92      | 0.00%    | 0.00%  | 18.07% | 0.00% |
| 17        | 211.35      | 5.29%    | 0.46%  | 0.00%  | 0.00% |
| 18        | 212.42      | 0.43%    | 5.84%  | 0.00%  | 0.00% |

جدول 11 فرکانس و جرم موثر مودهای موثر سازه ساندویچی هم جرم با سازه ایزوگرید (سازه 2)

**Table 11** Effective modes frequency and effective mass of Sandwich structure

| شماره مود | فرکانس (Hz) | جرم موثر | x      | y      | z     |
|-----------|-------------|----------|--------|--------|-------|
| 1         | 120.18      | 42.65%   | 10.94% | 0.02%  | 0.02% |
| 2         | 122.41      | 11.05%   | 42.85% | 0.05%  | 0.05% |
| 3         | 248.34      | 0.00%    | 0.05%  | 85.01% | 0.05% |
| 9         | 489.57      | 0.00%    | 0.05%  | 5.43%  | 0.05% |
| 10        | 504.72      | 3.68%    | 9.81%  | 0.01%  | 0.01% |
| 11        | 515.11      | 9.99%    | 3.53%  | 0.00%  | 0.00% |

جدول 12 فرکانس و جرم موثر مودهای موثر سازه ساندویچی سبک (سازه 3)

**Table 12** Effective modes frequency and effective mass of light Sandwich structure

| شماره مود | فرکانس (Hz) | جرم موثر | x      | y      | z     |
|-----------|-------------|----------|--------|--------|-------|
| 1         | 108.01      | 44.87%   | 12.52% | 0.02%  | 0.02% |
| 2         | 110.03      | 12.64%   | 45.11% | 0.05%  | 0.05% |
| 3         | 216.43      | 0.00%    | 0.05%  | 76.30% | 0.05% |
| 7         | 387.03      | 0.00%    | 0.02%  | 14.33% | 0.02% |
| 8         | 422.27      | 0.13%    | 5.29%  | 0.01%  | 0.01% |
| 9         | 446.39      | 9.34%    | 1.66%  | 0.00%  | 0.00% |
| 10        | 452.56      | 3.46%    | 6.22%  | 0.00%  | 0.00% |

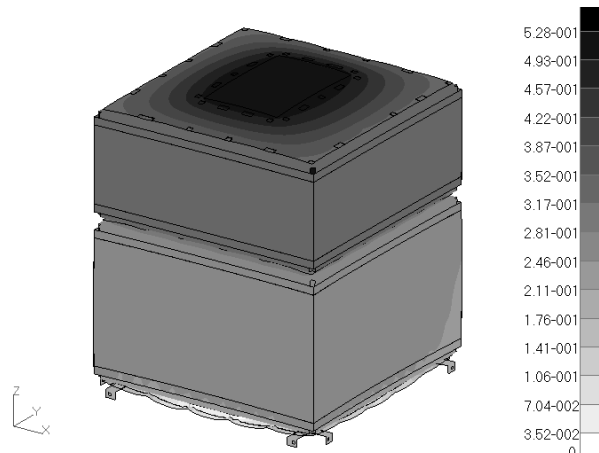
جدول 13 فرکانس و جرم موثر مودهای موثر سازه ساندویچی سبک تر (سازه 4)

**Table 13** Effective modes frequency and effective mass of Lighter Sandwich structure

| شماره مود | فرکانس (Hz) | جرم موثر % | x      | y      | z     |
|-----------|-------------|------------|--------|--------|-------|
| 1         | 68.14       | 53.66%     | 5.49%  | 0.02%  | 0.02% |
| 2         | 70.33       | 5.51%      | 54.27% | 0.06%  | 0.06% |
| 3         | 127.59      | 0.00%      | 0.05%  | 61.67% | 0.05% |
| 5         | 231.02      | 0.00%      | 0.04%  | 10.14% | 0.04% |
| 6         | 232.82      | 0.00%      | 0.08%  | 20.06% | 0.08% |
| 8         | 259         | 0.07%      | 9.38%  | 0.19%  | 0.19% |
| 9         | 269.91      | 7.53%      | 0.18%  | 0.00%  | 0.00% |

## 6- نتیجه گیری

در این پژوهش دو سازه ایزوگرید و ساندویچی از نظر فرکانس های طبیعی و جرم های موثر مقایسه شدند. با فرض هم جرم بودن دو سازه فرکانس های طبیعی سازه ساندویچی دو برابر سازه ایزوگرید به دست آمد اما توزیع جرم های موثر در سازه ایزوگرید مناسب تر بود. با کاهش جرم سازه ساندویچی (سازه 3) مشاهده شد که سازه جدید دارای فرکانس های طبیعی



**Fig. 12** Sandwich model third mode (spectrum in m)

شکل 12 مود سوم مدل ساندویچی (کانتور بر حسب متر)

در جدول 7 و 8 به ترتیب مودهای با جرم موثر بیش از 5% سازه های ایزوگرید (سازه 1) و سازه ساندویچی (سازه 2) ارائه شده است.

همان طور که از نتایج در جدول های 7 تا 8 مشاهده می شود فرکانس های سازه ساندویچی در مودهای جانبی تقریباً 2 برابر و در مودهای محوری تقریباً 3 برابر سازه ایزوگرید است. با توجه به فرکانس تحریک پرتابگر کاسموس (25 هرتز در راستای پرتاب و 10 هرتز در راستای عرضی) [14] با تغییر سازه از ایزوگرید به ساندویچی حاشیه امنیت رخ دادن تشدید افزایش یافته است. همچنین جرم های موثر سه مود اول با تغییر سازه از ایزوگرید به ساندویچی افزایش یافته اند. به دلیل بالا بودن فرکانس های مدل ساندویچی، دو مدل ساندویچی سبک با کاهش جرم سازه ساندویچی ساخته شده است و تغییرات جرم، فرکانس های طبیعی و جرم موثر در مدل های جدید نیز بررسی شده است. جدول 9 مودهای موثر سازه ساندویچی سبک را نشان می دهد. در مدل ساندویچی سبک تر (سازه 4) سعی شده است با کاهش جرم، فرکانس های طبیعی جانبی سازه ساندویچی به فرکانس های طبیعی سازه ایزوگرید نزدیک شود. مطابق جدول 5 جرم سازه ساندویچی بیش از 60% کاهش یافته است و همچنان با توجه به فرکانس های تحریک پرتابگر، همچنان حاشیه امنیت بهتری نسبت به سازه ایزوگرید از نظر امکان اتفاق تشدید دارد. جدول 10 مودهای با جرم موثر بالاتر از 5% را برای سازه ساندویچی سبک تر نشان می دهد.

## 5- مقایسه بار شوک

برای محاسبه بار شوک برای سازه های ساندویچی از داده های پرتابگر کاسموس [14] استفاده شده است. در جدول 11 بار شوک در سه راستا از رابطه (1) به دست آمده است.

$$g_{\text{Equivalent Shock}} = S_i \frac{m_{\text{eff},i}}{M_{\text{sat}}} \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $g_{\text{Equivalent Shock}}$  شتاب معادل بار شوک،  $S_i$  مقدار متناظر فرکانس با توجه به داده های پرتابگر است که با استفاده از نمودار "شکل 1" به دست می آید،  $m_{\text{eff},i}$  جرم موثر مود  $i$  ام و  $M_{\text{sat}}$  جرم کل است.

همان طور که مشاهده می شود با کاهش جرم سازه همراه با کاهش فرکانس های سازه بار شوک نیز کاهش می یابد. این کاهش در راستای محوری پرتاب (z) قابل توجه است.

در سازه‌های 3 و 4 جرم‌های موثر توزیع می‌شوند و در فرکانس‌های پایین‌تری نسبت به سازه 2 اتفاق می‌افتند که باعث بارهای کم‌تری در زمان پرتاب می‌گردد.

#### 7-مراجع

- [1] T. P. Sarafin, W. J. Larson, *Spacecraft Structures and Mechanisms: from Concept to Launch*, pp. 508-550, Boston, Microcosm Press, 1995.
- [2] J. J. Wijker, *Spacecraft structures*, pp. 101-121, Berlin, Springer, 2008.
- [3] A. K. Noor, S. L. Venneri, D. B. Paul, M. A. Hopkins, Structures technology for future aerospace systems, *Computers & Structures*, Vol. 74, No. 5, pp. 507-519, 2000.
- [4] P. Fortescue, G. Swinerd, J. Stark, *Spacecraft Systems Engineering*, pp. 251-285, London, John Wiley & Sons, 2011.
- [5] B. H. Bonab, *Analysis and Design of a Microsatellite Composite Structure*, Master Thesis, Aerospace Department, Tarbiat Modares University, Tehran, 2009. (in Persian)
- [6] B. J. Kim, *Development of Science and Technology Satellite III Structure with Composite Sandwich Construction*, PhD Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2010.
- [7] H. Cho, J. Rhee, Vibration in a satellite structure with a laminate composite hybrid sandwich panel, *Composite Structures*, NO. 10, Vol. 93, pp. 2566-2574, 2011.
- [8] H. Emami, M. Safarabadi, Study on Geometry and Rigidity of a Cubic Satellite Lateral panels in Structure Behavior Under Dynamic Loading of Launch Environment, *Sixth Iranian Aerospace Society Conference*, Khaje Nasir University, 2006. (in Persian)
- [9] M. Safarabadi, H. Emami, Study on distribution of vibration modes effective mass and local behavior of lateral panels of a cubic satellite under dynamic loading of launch environment, *15th Annual International Conference on Mechanical Engineering (ISME)*, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2007. (in Persian)
- [10] S. D. S. Dawood, Computational study of the effect of using open isogrids on the natural frequencies of a small satellite structure, *Acta Astronautica*, Vol. 106, pp. 120-138, 2015.
- [11] A. Boudjemai, R. Amri, A. Mankour, H. Salem, M. Bouanane, D. Boutchicha, Modal analysis and testing of hexagonal honeycomb plates used for satellite structural design, *Materials & Design*, Vol. 35, pp. 266-275, 2012.
- [12] R. Harish, S. S. Ramesh, Vibration response analysis of honeycomb sandwich panel with varying Core Height, *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences (IJETCAS)*, No. 5, Vol. 6, pp. 582-586, 2013.
- [13] M. Khakpoor, K. Narooee, Equivalent mass effect in optimized design of isogrid panels from harmonic vibration aspect, *Third International Conference on Acoustics and Vibration*, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran, 2013. (in Persian)
- [14] COSMOS International Satellitenstart GmbH, <http://www.Cosmos-space.de>, N.p., 2016. Web. 17 Aug. 2016.

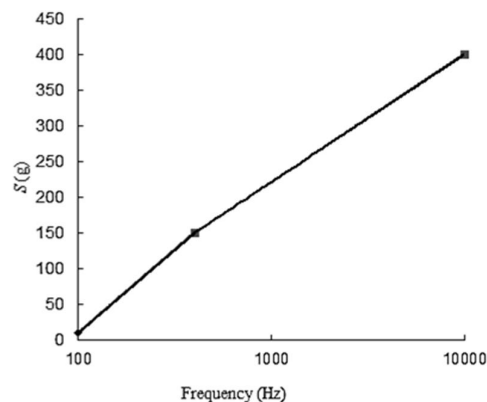


Fig. 13 Shock load diagram

شکل 13 نمودار بار شوک

جدول 14 بار شوک سازه‌های ساندویچی

Table 14 Sock Load of Sandwich Structures

| بار شوک (g) |      |      | نوع سازه                      |
|-------------|------|------|-------------------------------|
| z           | y    | x    |                               |
| 86.6        | 16.5 | 16.9 | سازه ساندویچی (سازه 2)        |
| 67.1        | 9.9  | 14.8 | سازه ساندویچی سبک (سازه 3)    |
| 21.34       | 9.9  | 8.3  | سازه ساندویچی سبک‌تر (سازه 4) |

بالا تر از فرکانس‌های طبیعی سازه ایزوگرید است و توزیع جرم‌های موثر نسبت به سازه ساندویچی (سازه 2) بهبود یافت. همچنین حاشیه امنیت در برابر پدیده تشدید در سازه‌های ساندویچی بالاتر از سازه ایزوگرید بود. حتی با کاهش جرم سازه ساندویچی به یک سازه ساندویچی سبک‌تر (سازه 4) فرکانس‌های طبیعی سازه هنوز کمی بالاتر از فرکانس‌های طبیعی سازه ایزوگرید بود و با توجه به فرکانس‌های تحریک پرتابگر کاسموس همچنان حاشیه امنیت مناسبی وجود داشت. با توجه به این موضوع با تغییر طراحی سازه از ایزوگرید به ساندویچی جرم سازه به مقدار قابل توجهی (حدود 60 درصد) کاهش خواهد یافت در حالی که فرکانس‌های طبیعی نسبتاً بالاتری نیز حاصل خواهد گردید.

با مقایسه توزیع جرم‌های موثر سازه ایزوگرید و ساندویچی (سازه 2)، سازه ساندویچی بارهای پرتاب بالاتری را خواهد داشت. با حرکت به سمت سازه سبک‌تر توزیع جرم‌های موثر بهبود می‌یابد و باعث کاهش بارهای پرتاب می‌گردد. با انتخاب یک پرتابگر با فرکانس تحریک بالا احتمال تشدید برای سازه ساندویچی نسبت به سازه ایزوگرید به مراتب کمتر است.