

# Isolation of Satellite's Sensitive Equipments from Longitudinal Vibration of Launch Vehicle Using Silicone Gel

K. Jahani<sup>1\*</sup> and H. Farajollahi<sup>2</sup>

1, 2. Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz

\*Postal Code: 5166616471, Tabriz, IRAN

[ka\\_jahani@tabrizu.ac.ir](mailto:ka_jahani@tabrizu.ac.ir)

*During launching and deploying to orbit, satellites experience vibration loads from launch vehicle especially in longitudinal direction. Even though the aim of the adapter between satellite and launcher is to isolate the satellite from the launcher's dynamic loads, however, still enough harsh vibration loads that can affect the operation of satellite's delicate systems transmit to the structure of the satellite. Therefore, there is need to isolate the delicate systems from vibrations of the satellite's structure. In this paper, the performance of a new material namely Silicone Gel in isolating delicate equipments (such as electronic board and its components) of satellite from longitudinal vibrations is investigated using finite element method. The results of modeling of an isolator containing Silicone Gel are verified by the available experimental results from the literature. Besides having frequency dependent behavior and dissipation characteristic, Silicone Gel shows hyper-elastic behavior that these characteristic are considered in modeling and analysis. Also an electronic board that overlays on Silicon Gel type mounts is modeled and the amount of transmitted vibration to lead wire of a resistor on it is investigated. The obtained results show that the Silicone Gel has good performance in isolating of delicate equipments of satellite from incoming longitudinal vibrations.*

**Keywords:** Satellite, Vibration isolation, Longitudinal vibrations, Delicate equipments, Silicone gel, Finite element method

---

1. Associate Professor (Corresponding Author)  
2. M. Sc.

# جداسازی تجهیزات حساس ماهواره از ارتعاشات طولی وارده از ماهواره بر با استفاده از ژل سیلیکون

کمال جهانی<sup>۱\*</sup> و حسین فرج الهی<sup>۲</sup>

۱ و ۲ - دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

\*تبریز، کد پستی: ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱

ka\_jahani@tabrizu.ac.ir

ماهواره‌ها هنگام قرارگرفتن در مسیر مدار، متحمل بارهای ارتعاشی ماهواره‌بر، مخصوصاً در جهت طولی می‌شوند. به‌رغم جداسازی ارتعاشات کل ماهواره از بارهای دینامیکی در فصل مشترک بین ماهواره و ماهواره‌بر، همچنان بارهای ارتعاشی مخرب که بتوانند بر روی عملکرد تجهیزات حساس ماهواره‌ها اثرکنند، به سازه ماهواره منتقل می‌شود که این مسئله اهمیت نیاز به سیستم جداسازی ارتعاشی تجهیزات حساس را روشن می‌سازد. در این مقاله، عملکرد یک ماده الاستومری جدید به نام ژل سیلیکون در جداسازی ارتعاشات وارده به تجهیزات حساس ماهواره با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود تجزیه و تحلیل می‌شود. پس از مدل‌سازی یک جداساز متشکل از ژل سیلیکون، با استفاده از نتایج تست‌های تجربی در دسترس، صحت‌گذاری مدل‌سازی انجام می‌شود. ژل سیلیکون علاوه بر رفتار تابع فرکانسی و دارابودن خاصیت میرایی، در تغییر شکل‌های بزرگ، رفتار هایپرالاستیک از خود نشان می‌دهد که این خواص در مدل‌سازی‌ها لحاظ شده است. همچنین مدل‌سازی یک بردالکترونیکی که بر روی جداسازهای ژل سیلیکونی قرار گرفته است، انجام شده و میزان ارتعاشات منتقله به پایه‌های سیم یکی از مقاومت‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که ژل سیلیکون کارایی رضایت بخشی در جداسازی ارتعاشات طولی وارده به تجهیزات حساس دارد.

واژه‌های کلیدی: ماهواره، جداسازی ارتعاشات، ارتعاشات طولی، تجهیزات حساس، ژل سیلیکون، اجزای محدود

## مقدمه

به دلیل هزینه‌های بسیار زیاد طراحی و ساخت محموله‌های فضایی نظیر ماهواره‌ها، قرارگیری سالم این تجهیزات در مدار اهمیت بالایی دارد. به همین منظور، کنترل ارتعاشات محموله‌ها و سازه‌های فضایی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۱ و ۲]. محموله‌های فضایی شامل ماهواره‌ها یا فضاپیماها هستند که روی پرتابگر (ماهواره‌بر) نصب می‌شوند. هر کدام از این محموله‌ها شامل تجهیزات حساس و زیرسیستم‌هایی همچون: باتری‌های خورشیدی، بردهای الکترونیکی، آنتن‌ها و ... هستند.

ماهواره‌ها در مسیر قرارگیری در مدار، متحمل بارهای دینامیکی زیادی از طرف ماهواره‌بر می‌شوند. بر طبق مطالعات انجام شده، ۴۵ درصد خرابی ماهواره‌ها ناشی از بارهای دینامیکی

## علائم و اختصارات

$E$	مدول الاستیسیته
$E^*$	مدول الاستیسیته مختلط
$G^*$	مدول برشی مختلط
$E', E''$	قسمت‌های حقیقی و موهومی مدول الاستیسیته مختلط
$G', G''$	قسمت‌های حقیقی و موهومی مدول برشی مختلط
$\eta$	ضریب اتلاف
$k^*$	سختی (فنریت) جداساز
$\omega$	فرکانس
$\beta$	ضریب دمپینگ

۱. دانشیار (نویسنده مخاطب)

۲. کارشناس ارشد

ارتعاشات از تجهیزات حساس، اغلب، از انواع مختلف لاستیک‌ها استفاده می‌شود که رفتار دینامیکی آنها به شدت تابع درجه حرارت است.

ژل سیلیکون دسته‌ای از الاستومرهاست که از چندین دهه قبل، کاربردهای وسیعی در پروتزیهای کار گذاشته شده به جای بافت‌های بدن و مصارف ارتوپدی داشته است. استفاده از این ماده به جای لاستیک به عنوان سیستم جداساز غیرفعال ارتعاشی - با توجه به ویژگی‌ها و فوایدش - برای اولین بار توسط محققان ژاپنی پیشنهاد شد [۷ و ۶]. محققان برای بررسی رفتار دینامیکی ژل سیلیکون، هم کارهای تجربی و هم کارهای عددی را منتشر کردند [۹-۶].

در این مقاله، عملکرد ژل سیلیکون، که رفتار دینامیکی بهتری نسبت به مواد لاستیکی در رنج وسیع حرارتی دارد، به عنوان جداساز ارتعاشی تجهیزات حساس ماهواره، مانند بردهای الکترونیکی، با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

## بارهای دینامیکی و ارتعاشی وارده به ماهواره و تجهیزات حساس آن

تحریرات دینامیکی، ناشی از اتفاقاتی همچون: پدیده احتراق در موتور، خاموش و روشن شدن موتور، باد و گردباد، مراحل جدایش، به کار انداختن موتورهای کمکی، نوسانات فشار در موتورهای سوخت مایع، تحریرات آکوستیکی هنگام بلند شدن (انعکاس امواج آکوستیکی که بر اثر صدای موتور تولید می‌شود)، امواج ضربه‌ناشی از جدایش یا انعکاس امواج ضربه‌ناشی از احتراق موتور سوخت جامد است. شکل (۱) مراحل مختلف در مسیر پروازی یک ماهواره بر مدار پایین متعارف و رهاسازی ماهواره را نشان می‌دهد که در این مراحل بارهای دینامیکی به ماهواره و تجهیزات آن وارد می‌شود.

اگر چه بارهای دینامیکی و ارتعاشی هم در جهت طولی و هم در جهت‌های عرضی به ماهواره اثر می‌کنند ولی بیشترین مقدار این بارها در جهت طولی است [۱۰]. یکی از منابع اصلی ارتعاشات طولی، پدیده تشدید احتراقی است که در بوسترها و موتورهای سوخت جامد ایجاد می‌شود. این پدیده نیروهای دینامیکی با دامنه بالا را در فرکانس‌های پایین و عموماً در جهت طولی به ماهواره و تجهیزات حساس آن وارد می‌کند [۴]. مثلاً در جدول‌های (۲ و ۱)، مقادیر بارهای اندازه‌گیری شده بر روی محل اتصال محموله یک ماهواره بر مدار پائین ارائه شده است.

است که این بارها بیشتر از نوع ارتعاشات مکانیکی و آکوستیکی هستند [۳].

به منظور حفاظت ماهواره در برابر بارهای دینامیکی و ارتعاشی در طول مسیر از لحظه پرتاب تا زمان قرارگیری در مدار، یکی از دو روش زیر را باید انتخاب کرد [۴]:

- افزایش استحکام اجزای سازه یا ایزوله کردن مجزای تمام زیرسیستم‌هایی همچون تجهیزات حساس
- کاهش بزرگی بارهای وارده از ماهواره بر به ماهواره

در گذشته، اتصال بین ماهواره و ماهواره بر معمولاً با یک آداپتور مخروطی صورت می‌گرفت که سختی بالایی داشت و تقریباً تمام بارهای محیطی را مستقیماً از ماهواره بر به زیرسیستم‌ها و تجهیزات حساس ماهواره منتقل می‌کرد و برای محافظت این زیرسیستم‌ها از بارهای وارده از ماهواره بر، تک‌تک آنها ایزوله می‌شدند که این مسئله موجب افزایش قیمت ماهواره و ماهواره بر و همچنین سنگینی ماهواره می‌شد، به گونه‌ای که بالغ بر ۷۰ درصد جزء سازه‌ای ماهواره، برای حفاظت از ماهواره به کار گرفته می‌شد [۵]. ولی روش دوم، که جداسازی ارتعاشی کل ماهواره را مد نظر قرار می‌دهد، دارای محاسنی است که در ادامه ذکر می‌شود [۴]: حفاظت بیشتر از ماهواره در مقایسه با روش اول، می‌نیم کردن بارهای دینامیکی منتقله به ماهواره، کاهش در قیمت، ابعاد و وزن ماهواره، نیاز به انجام آزمایش‌های کمتر، معطوف شدن به طراحی بهینه سیستم جداساز به جای طراحی پیچیده و بهینه برای سازه هر کدام از ماهواره‌ها. در این روش، حفاظت محموله از بارهای دینامیکی ماهواره بر، معمولاً توسط فصل مشترکی صورت می‌پذیرد که قسمت بالایی ماهواره بر را به قسمت پایینی ماهواره متصل می‌کند.

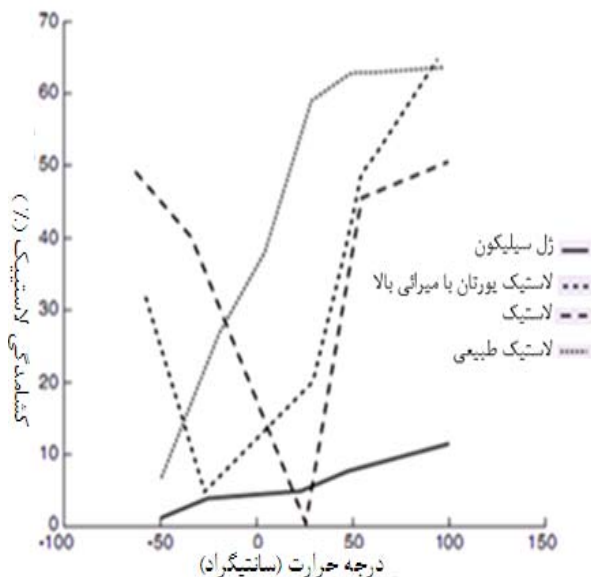
جداسازهای ارتعاشی ماهواره از ماهواره بر شامل دو دسته اصلی هستند: دسته اول عبارت است از جداساز نرم تک‌جهته که این نوع جداساز برای کاهش بارهای دینامیکی وارده از ماهواره بر، که در راستای محوری غالب هستند به کار می‌رود و دسته دوم، شامل جداسازهای نرم چند جهته است. این نوع جداساز که برای کاهش بارهای دینامیکی وارده از ماهواره بر، که در راستای محوری و عرضی هستند به کار می‌رود، شامل دو جفت جداساز است که توسط یک ستون مرکزی به هم متصل شده‌اند:

بعد از جداسازی کل ماهواره از بارهای دینامیکی وارده از ماهواره بر و اصلاح مسیر انتقال ارتعاشات، هنوز هم ارتعاشات زیادی وجود دارد که از پرتابگر به تجهیزات حساس منتقل می‌شود. وجود این ارتعاشات مخرب اهمیت نیاز به سیستم جداسازی تجهیزات حساس را روشن می‌کند. به منظور جداسازی

## خواص ژل سیلیکون

فواید ژل سیلیکون نسبت به لاستیک عبارتند از [۱۱-۶]:

- پایداری دمایی بیشتر ژل سیلیکون برای جذب بارهای ضربه‌ای نسبت به دیگر مواد در بازه دمایی ۴۰- الی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد. همان‌طور که از شکل (۲) مشاهده می‌شود، سایر مواد لاستیکی رفتار بسیار متفاوتی با تغییر درجه حرارت از خود نشان می‌دهند.
- پایین‌تر بودن فرکانس تشدید و انتقال‌پذیری ژل سیلیکون نسبت به لاستیک. مثلاً، برای یک جداساز ارتعاشی با شکل و حجم یکسان، همان‌طوری که در شکل (۳) ارائه شده است، رفتار جداسازی ارتعاشی ساخته شده از ژل سیلیکون به‌مراتب نسبت به نوع لاستیکی بهتر است، به‌طوری که ناحیه جداسازی ارتعاشات در استفاده از جداساز نوع ژل سیلیکونی، از ۱۴ هرتز شروع می‌شود، در حالی که در جداسازی نوع لاستیکی، این ناحیه از ۳۳ هرتز شروع می‌شود (یعنی جداساز ژل سیلیکونی در محدوده وسیع‌تر فرکانسی کار جداسازی را انجام می‌دهد) و میزان انتقال‌پذیری در این ناحیه برای جداساز ژل سیلیکونی حدود ۱۰ برابر کمتر از جداساز لاستیکی است. همچنین بیشترین دامنه انتقال‌پذیری جداساز ژل سیلیکونی حدود ۷ است که در مقایسه با بیشینه دامنه انتقال‌پذیری حدود ۹ برای جداساز لاستیکی کمتر است.
- تغییر شکل دائمی، فشاری کمتر نسبت به سایر مواد الاستومری



شکل ۲- پایداری دمایی بیشتر ژل سیلیکون برای جذب بارهای ضربه‌ای نسبت به دیگر مواد در بازه دمایی وسیع [۱۱]



شکل ۱- مراحل مختلف در مسیر قرارگیری ماهواره در مدار که باعث اعمال بار دینامیکی بر روی ماهواره می‌شوند.

جدول ۱- ارتعاشات سینوسی در محل اتصال ماهواره به ماهواره بر [۶]

جهت	رنج فرکانسی (Hz)	ماکزیمم شتاب (g)
محوری	۵-۱۰۰	۰/۶
عرضی	۵-۱۰	۰/۵
عرضی	۱۰-۱۰۰	۰/۳

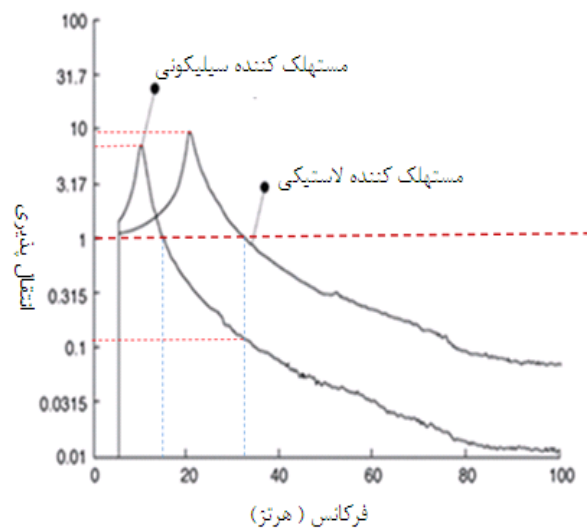
جدول ۲- شتاب‌های ماکزیمم اندازه‌گیری شده (g) در محل اتصال ماهواره به ماهواره بر [۶]

	محوری		عرضی	
	گذرا	استاتیکی	گذرا	استاتیکی
بلند شدن	۱/۳	۰/۵±	۰	۰/۵±
گذر صوتی	۲	۰/۳±	۰/۲	۰/۶±
ماکزیمم مقدار مرحله اول	۶	۰/۵±	۰	۰/۵±
خاموش شدن موتور	۴/۸	۰/۳±	۰	۰/۵±
روشن شدن موتور مرحله دوم	۱/۲	۰/۲±	۰	۰/۳±
ماکزیمم مقدار مرحله دوم	۳/۷	۰/۱±	۰	۰/۳±

شیمیزو و یامازاکی با استفاده از تست، این مشخصات را به دست آوردند و سپس با استفاده از روش المان محدود نتایج را با یکدیگر مقایسه کردند [۷]. کد المان محدود مورد استفاده توسط ایشان دو بعدی بوده و ساده‌سازی‌هایی از جمله خواص مواد ثابت با فرکانس (متوسط خواص مواد در دامنه فرکانسی تست شده) را در مدل‌سازی در نظر گرفته‌اند که باعث شده است دقت دست‌یابی به نتایج حاصل از تست، کمتر شود. بنابراین، در این مقاله سعی می‌شود که با ایجاد مدل اجزای محدود سه‌بعدی و کامل و همچنین لحاظ کردن رفتار وابسته به فرکانس ژل سیلیکون و رفتار هایپر الاستیک آن، جواب‌های دقیق‌تر حاصل شود. مراحل مختلف انجام تحقیق شامل شرح تست‌ها و بررسی‌های انجام شده در مرجع [۷] بر روی ماده ژل سیلیکون و همچنین جداساز ساخته شده از این ماده، مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار آنسیس<sup>۳</sup> و تکرار کارهای انجام شده برای صحت‌گذاری مدل‌سازی دو بعدی و در نهایت استفاده از مدل صحت‌گذاری شده برای طراحی جداساز تجهیزات الکترونیکی ماهواره است که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

## آزمایش‌های استخراج خواص دینامیکی ژل سیلیکون

نمونه ژل سیلیکون آزمایش‌شده، استوانه‌ای شکل و با شعاع ۶ میلی‌متر و ارتفاع ۳ میلی‌متر است که آزمایش پیچش در بازه فرکانسی ۱۰۰۰-۰ هرتز بر روی آن انجام شده است. همچنین از ژل سیلیکون یک سیستم جدا ارتعاشی متشکل از چهار عدد جداساز و یک صفحه آلومینیومی ساخته شده و مورد تست قرار گرفته است که یکی از این جداسازها در شکل (۴) ارائه شده است. مشخصه‌های کل سیستم (صفحه آلومینیومی و جداسازها) بدین صورت است که یک صفحه آلومینیومی به جرم ۱/۸۵۶ کیلوگرم، قطر ۳۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر، بر روی ۴ عدد جداساز قرار گرفته است. جداسازها به فاصله شعاعی ۱۳۰ میلی‌متر از یکدیگر قرار دارند. صفحه آلومینیومی و جداسازها در مجموعه آزمایش در شکل (۵) نشان داده شده‌اند. جداسازها با چسب به میز تحریک متصل شده‌اند و صفحه آلومینیومی به جداسازها پیچ شده است. تحریک در پایه جداسازهاست که توسط میز تحریک اعمال می‌شود و پاسخ در بالای صفحه آلومینیومی و در وسط صفحه است. تحریک از نوع هارمونیک و از جنس شتاب و دارای مقدار ۰/۹۸ متر بر مجذور ثانیه = ۰/۱g است. خواص مکانیکی اجزای سیستم مورد آزمایش در جدول (۳) ارائه شده است. مدول برشی مختلط به دست آمده از آزمایش پیچش دینامیکی نمونه استوانه‌ای ژل سیلیکون در شکل (۶) و ضریب اتلاف



شکل ۳- رفتار جداسازی بهتر ارتعاشی ژل سیلیکون نسبت به ماده لاستیکی [۱۱]

همانند سایر مواد الاستومری، در محدوده تغییر شکل‌های خطی (کوچک) مدول‌های الاستیسیته و برشی ژل سیلیکون نیز مختلط بوده و دارای قسمت‌های موهومی و حقیقی است که در معادلات (۱-۳) ارائه شده‌اند.

$$E^* = E' + i E'' \quad (1)$$

$$G^* = G' + i G'' \quad (2)$$

$$\eta = \frac{E''}{E'} = \frac{G''}{G'} \quad (3)$$

شایان ذکر است که تمامی پارامترهای ذکر شده در معادلات فوق تابع فرکانس هستند. همچنین برای یک جداساز ژل سیلیکونی، سختی (فتریت) جداساز نیز مختلط و تابع فرکانس است که در رابطه (۴) بیان شده است:

$$k^*(\omega) = k(\omega)(1 + i \eta) \quad (4)$$

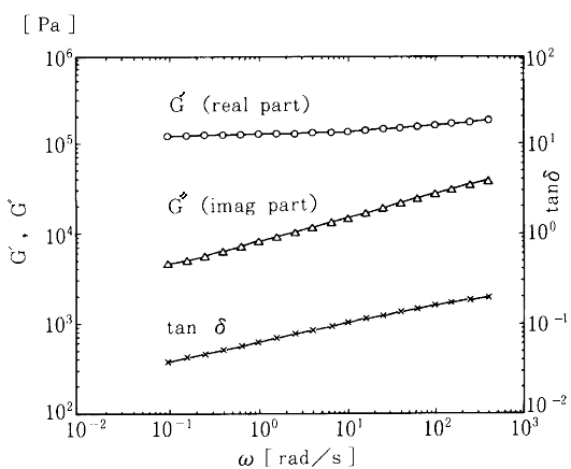
در تغییر شکل‌های بزرگ، رفتار ژل سیلیکون غیرخطی بوده و رفتار مواد هایپر الاستیک بر آن حاکم است که در این حالت مدول‌های الاستیسیته و برشی برای آنها قابل تعریف نبوده و از مدل‌هایی نظیر مونی-ریولین برای بیان رابطه تنش- کرنش استفاده می‌شود.

## بررسی رفتار دینامیکی سیستم جداسازی ارتعاشی ساخته شده از ژل سیلیکون

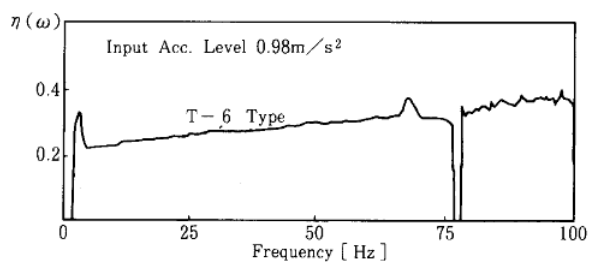
همان‌گونه که قبلاً بیان شد، به دلیل اینکه ویژگی‌های فیزیکی و مشخصات ارتعاشی ژل سیلیکون تا سال ۱۹۹۳ مشخص نشده بود،

جدول ۳- خواص مکانیکی مواد به‌کار رفته در سیستم جداساز [۷]

جنس	وزن مخصوص	ضریب پواسون	مدول برشی [Pa]
ژل سیلیکون	۱/۰۱۱	۰/۴۶	$۲/۰۸۶ \times ۱۰^۷$
آلومینیوم	۲/۷	۰/۳۹۹	$۲/۴ \times ۱۰^{۱۰}$
فولاد	۷/۸۶	۰/۲۹	$۸/۲۴ \times ۱۰^{۱۰}$
برنج	۸/۴۵	۰/۳۷	$۴/۰۲۲ \times ۱۰^{۱۰}$



شکل ۶- مدول برشی مختلط حاصله از آزمایش پیچش دینامیکی نمونه استوانه‌ای [۷]

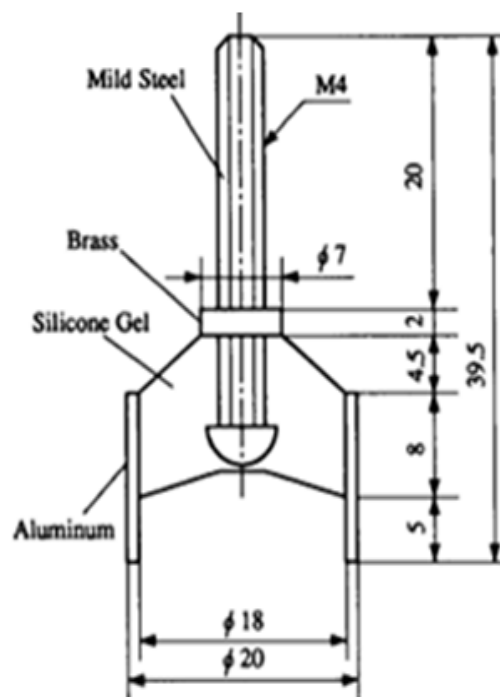


شکل ۷- ضریب اتلاف به‌دست آمده از آزمایش تحریک پایه سیستم متشکل از چهار جداساز [۷]

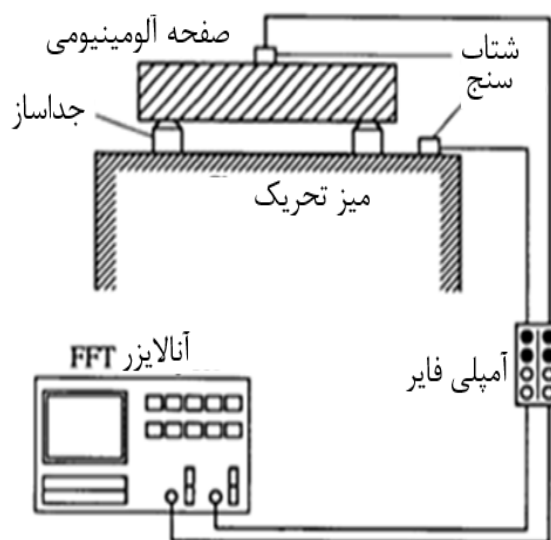
### بررسی رفتار دینامیکی جداساز ارتعاشی ژل سیلیکونی با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود

در مطالعه حاضر، مدل‌سازی جداساز ارتعاشی ژل سیلیکونی با استفاده از نرم‌افزار آنسیس انجام می‌شود. از آنجاکه به‌منظور صحت‌گذاری نتایج مدل‌سازی، از مرجع [۷] استفاده خواهد شد؛

به‌دست آمده از سیستم جداساز آزمایش شده در شکل (۷) ارائه شده است که در این مقاله، از این نتایج تجربی در تعریف خواص ژل سیلیکون در محدوده خطی در مدل‌سازی اجزای محدود استفاده می‌شود.



شکل ۴- یکی از جداسازهای ساخته شده از ژل سیلیکون



شکل ۵- زنجیره آزمایش سیستم جداساز ژل سیلیکونی [۷]

استفاده از نرم‌افزار آنسیس، تقریباً تمام محدودیت‌های ذکر شده در روش کدنویسی شیموزو و یامازاکی، در بیان رفتار ژل سیلیکون را برطرف می‌کند. نمای سه‌بعدی یکی از جداسازهای مدل شده در مطالعه حاضر در شکل (۹) آورده شده‌است. در این مدل‌سازی، در نواحی با تغییرات هندسی زیاد، المان‌ها ریزتر شده و همچنین در راستای ضخامت قطعات پوسته فلزی از سه لایه المان استفاده است (در مقابل تک‌لایه المان محققان قبلی). المان‌های به-کار رفته همگی از نوع ۱۸۵ سلید<sup>۴</sup> و تعدادشان برابر با ۱۲۲۵۶ عدد است. المان جرم متمرکز که در بالای جداساز به جای صفحه آلومینیومی است از نوع ۲۱ مَس<sup>۵</sup> است. به‌منظور اعمال شرایط تکیه‌گاهی، کمان‌های داخلی پایه‌های جداساز در جهات  $x, y, z$  و کمان‌های بیرونی در جهت  $y$  مقید شده‌اند. مدل اجزای محدود سه بعدی کل سیستم در شکل (۱۰) ارائه شده است که در آن صفحه آلومینیومی به جرم ۱/۸۵۶ کیلوگرم بر روی چهار جداساز قرار گرفته و جرم متمرکز ۳ گرم به‌عنوان جرم مهره و قسمتی از پیچ روی هر جداساز قرار داده شده است. صفحه آلومینیومی با المان ۱۸۱ شیل<sup>۶</sup> و جداسازها با المان ۱۸۵ سلید مدل شده‌اند. این مدل کلی که از چهار عدد جداساز و صفحه آلومینیومی روی آن تشکیل شده است، دارای حدود ۵۰ هزار المان از انواع مختلف است.

با استفاده از مدل اجزای محدود ایجادشده در نرم‌افزار آنسیس، آنالیز هارمونیک سیستم بررسی شده در مرجع [۷] با در نظر گرفتن خواص ژل سیلیکون در فرکانس‌های مختلف به‌شرح زیر تکرار شد: آنالیز اول:

مقدار مدول الاستیسیته  $E=0.380\text{MPa}$  در  $\omega = 0$  برای ژل سیلیکون، ضریب دمپینگ  $\beta$  برابر با  $0.0023$  و بار واحد در بالای جداساز اعمال شد و پاسخ در پایه جداساز گرفته شد. آنالیز دوم:

مقدار مدول الاستیسیته  $E=0.507\text{MPa}$  برای ژل سیلیکون، در فرکانس طبیعی جداساز، ضریب دمپینگ  $\beta$  برابر با  $0.0023$  و بار واحد در بالای جداساز اعمال شد و پاسخ در پایه گرفته شد. آنالیز سوم:

مقدار مدول الاستیسیته متغیر با فرکانس برای ژل سیلیکون، ضریب دمپینگ  $\beta$  برابر با  $0.0023$  و بار واحد در بالای جداساز اعمال شد و پاسخ در پایه جداساز گرفته شد.

مقایسه نتایج گرفته شده توسط شیموزو و یامازاکی، روش آزمایش و آنالیزهای هارمونیک با نرم‌افزار آنسیس برای کل سیستم

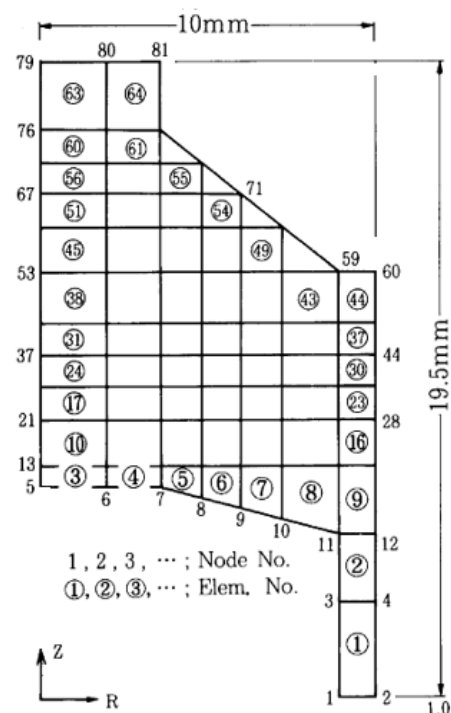
بنابراین، قبل از توضیح مدل‌سازی مطالعه حاضر، بررسی کوتاهی بر روی مدل انجام شده در مرجع [۷] صورت می‌گیرد. شیمیزو و یامازاکی در کد اجزای محدود نوشته شده از یک المان چهار نودی استفاده کرده‌اند که این المان در مختصات استوانه‌ای  $(r, z, \theta)$  با  $\theta$  ثابت به صورت دو بعدی با تقارن محوری است. آنها در مدل‌سازی، ساده‌سازی‌هایی در نظر گرفتند (شکل ۸) که عبارتند از:

۱. به جای مدل‌سازی کل سیستم (صفحه و جداسازها)، از مدل‌سازی یک جداساز استفاده کرده‌اند که این مسئله باعث می‌شود، تأثیر حالت‌های حرکتی غیرطولی کل سیستم در نظر گرفته نشود؛ به-جای استفاده از صفحه آلومینیومی از بار معادل با وزن صفحه استفاده کرده‌اند؛

۲. جداساز را به صورت دو بعدی و متقارن مدل کرده‌اند؛

۳. مدول الاستیسیته در  $\omega = 0$  به‌کار گرفته شده است، در حالی که مدول الاستیسیته ژل سیلیکون بر حسب فرکانس متغیر است و ضریب اتلاف به صورت متوسط در نظر گرفته شده است در حالی که ضریب اتلاف ژل سیلیکون بر حسب فرکانس متغیر است.

ساده‌سازی‌های فوق در کنار استفاده از تعداد محدود المان (تنها از ۶۴ المان با تقارن محوری استفاده کرده‌اند که این تعداد المان کم برای مدل‌سازی صحیح نواحی با تغییرات هندسی زیاد و نواحی مرزی و بارگذاری کافی نیست) و دردسترس بودن تنها یک نوع المان در برنامه‌نویسی دو بعدی، سبب ایجاد خطا نسبت به آزمایش شده است.

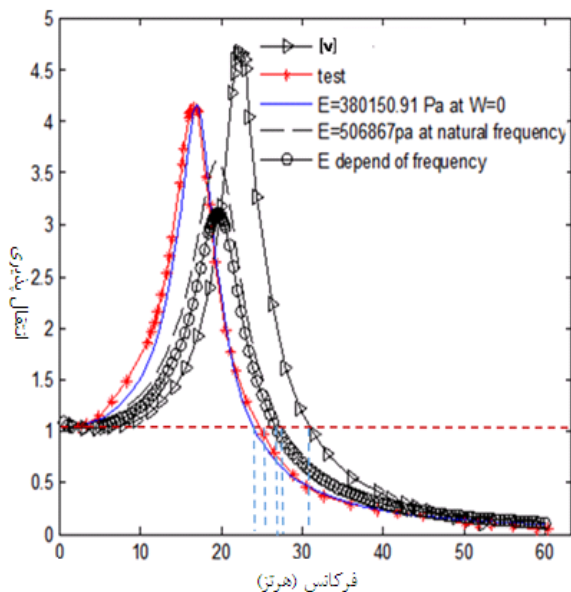


شکل ۸- مدل‌سازی انجام شده برای جداساز ارتعاشی از جنس ژل سیلیکون [۷]

4. solid  
5. mass  
6. Shell

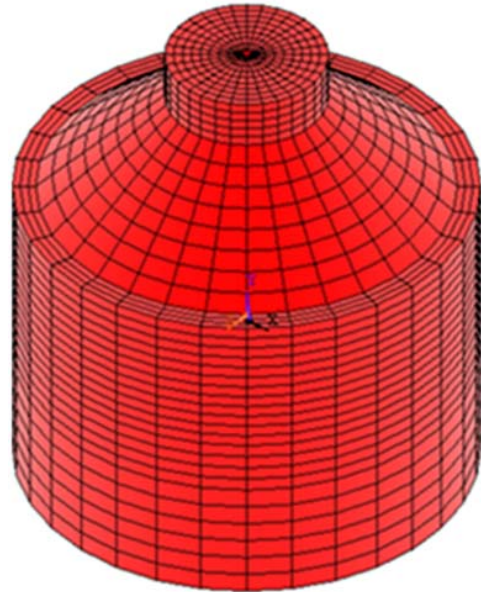
به مدول الاستیسیته متناسب با فرکانس طبیعی و مدول الاستیسیته متغییر با فرکانس مشاهده می‌شود.

- یکسان نبودن قله‌ها با وجود دمپینگ برابر به دلیل متفاوت بودن مدول‌های الاستیسیته در هر آنالیز
- محدودیت استفاده فقط از یک ضریب دمپینگ برای هر بارگذاری در آنالیز هارمونیک با نرم‌افزار آنسیس؛ با وجود اینکه ضریب دمپینگ روی بازه فرکانسی، وابسته به زمان است، باعث شده است که تفاوت چشم‌گیر در قله‌های آنالیز هارمونیک برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته نسبت به آزمایش ایجاد شود.
- تطبیق بسیار خوبی در منحنی‌های جداسازی ارتعاشات در دو نمودار در حالت آنالیز هارمونیک با  $E=0.380\text{MPa}$  در  $\omega = 0$  و آزمایش مشاهده می‌شود.
- از مقایسه سه نمودار جداسازی ارتعاشات مربوط به مدل المان محدود انجام شده در نرم‌افزار آنسیس با مدول الاستیسیته متغیر، مدل مرجع [۷] و آزمایش، مشخص می‌شود که ناحیه جداسازی ارتعاشات و میزان جداسازی در این ناحیه و همچنین فرکانس تشدید مربوط به آنالیز با نرم‌افزار آنسیس نسبت به کدنویسی انجام شده در مرجع [۷]، تطبیق بیشتری با آزمایش دارد (فرکانس تشدید آنالیز با آنسیس برابر با  $19/6$  هرتز، فرکانس تشدید آنالیز با کدنویسی برابر با  $23/2$  هرتز و فرکانس تشدید آزمایش برابر با  $16/6$  هرتز است).
- با توجه به نتایج بیان شده، می‌توان گفت که روش مدل‌سازی انجام شده در این تحقیق صحیح بوده و می‌توان با اطمینان بیشتری نسبت به انجام تحلیل‌های بیشتر اقدام کرد.

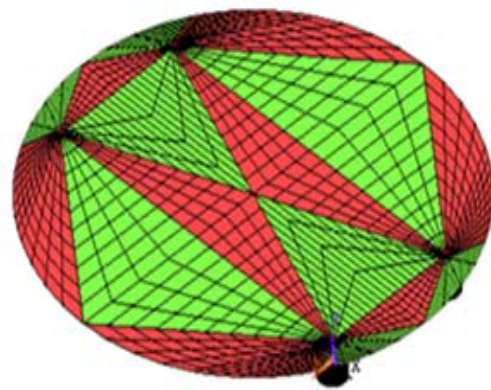


شکل ۱۱- مقایسه گراف انتقال‌پذیری برای تحلیل‌های انجام شده با آنسیس و با نتایج مرجع [۷] و آزمایش

در فرمت گراف انتقال‌پذیری در شکل (۱۱) ارائه شده است. با توجه به این شکل موارد زیر را می‌توان نتیجه‌گیری کرد:



شکل ۹- مدل اجزای محدود یکی از جداسازهای ژل سیلیکونی در نرم‌افزار آنسیس



شکل ۱۰- سیستم جداسازی متشکل از یک صفحه آلومینیومی است که روی چهار عدد جداساز ژل سیلیکونی قرار گرفته است.

- فرکانس شروع ناحیه جداسازی ارتعاشات در حالت‌های مدول الاستیسیته متناسب با فرکانس طبیعی و مدول الاستیسیته متغیر با فرکانس، نسبت به حالت مدول الاستیسیته استاتیکی ( $\omega = 0$ )، بیشتر است.

- به دلیل نزدیک بودن مقدار مدول الاستیسیته متناسب با فرکانس طبیعی و مقدار متوسط مدول الاستیسیته متغییر با فرکانس، تشابه قابل توجهی در رفتار جداسازی ارتعاشات مربوط



## مدل‌سازی اجزای محدود و تحلیل جداسازی ارتعاشات طولی از یک برد الکترونیکی به‌عنوان یکی از تجهیزات حساس ماهواره

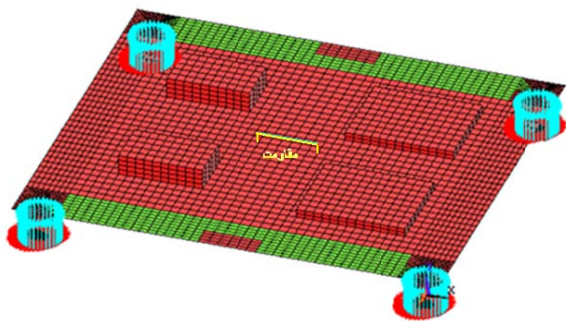
برد الکترونیکی توسط المان ۱۸۱ شل، چهار تا مؤلفه توسط المان ۱۸۵ سلید، مقاومت و سیم پایهٔ مقاومت‌تبا المان ۱۸۸ بیم<sup>۷</sup> مدل شده‌اند. ابعاد جداسازها نیز همان ابعاد جداساز قبلی است که در سیستم صفحهٔ آلومینیومی و چهار جداساز به‌کار گرفته شد. مدل اجزای محدود ایجاد شده برای برد الکترونیکی که روی جداسازهای ژل سیلیکونی قرار گرفته است، در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

جدول ۴- خواص مکانیکی مواد به‌کار رفته در سیستم جداساز و برد الکترونیکی

جنس / خاصیت	ژل سیلیکون	آلومینیوم	فولاد	برنج	فایبر گلاس	مس	سرامیک
مدول الاستیسیته [GPa]	۰/۳۸	۵۸	۲۱۳	۱۱۰	۱۸	۱۲۵	۲۸۰
چگالی [kg/m <sup>3</sup> ]	۱۰۱۱	۲۷۰۰	۷۸۶۰	۸۴۵۰	۳۱۰۰	۸۹۳۰	۳۶۰۰
ضریب پواسون	۰/۴۲	۰/۳۹۹	۰/۲۹	۰/۳۷	۰/۱۷	۰/۳۴	۰/۲۳

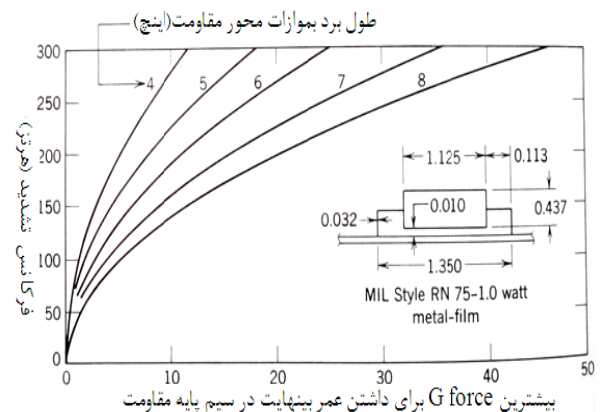
جدول ۵- جنس، ابعاد و وزن برد الکترونیکی به همراه مؤلفه‌هایش

جنس	فایبر گلاس	سرامیک	سرامیک	مس
کاربرد	برد الکترونیکی	مؤلفه‌های برد	مقاومت	سیم پایه (پایه) مقاومت
اندازه (mm <sup>3</sup> )	۱/۵×۲۰۳×۱۷۷	۳۹×۲۳×۱۰	۲۱۴۹	۲۹۲۴
جرم (gr)	۱۶۷	۶۴	۷/۷	۲۶/۱۱



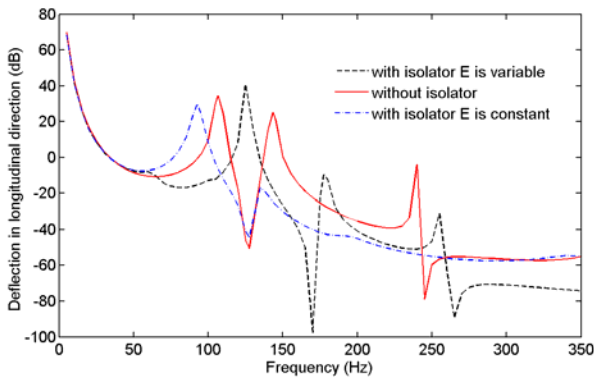
شکل ۱۳- مدل اجزای محدود برد الکترونیکی که بر روی چهار عدد جداساز ژل سیلیکونی قرار گرفته است.

امروزه، استفاده از روش اجزای محدود در مدل‌سازی پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی بردهای الکترونیکی با یک روش کارآمد توسط محققان مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳]. در این مقاله، به‌منظور نشان دادن کارایی ژل سیلیکون در جداسازی ارتعاشات طولی از تجهیزات حساس ماهواره، یک برد الکترونیکی به همراه مؤلفه‌های اصلی آن قبل و بعد از به‌کارگیری سیستم جداساز، به‌روش اجزای محدود مدل‌سازی شده و سپس پاسخ‌های فرکانسی آنها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. یکی از این مؤلفه‌ها، مقاومت است و به دلیل حساسیت سیم پایه که مقاومت را به برد الکترونیکی متصل می‌کند، تحلیل در محل لحیم سیم مقاومت به برد انجام می‌پذیرد. سیم پایه مقاومت دارای جنس نرم و با سطح مقطع کم است (به شکل ۱۲ توجه شود) و مقاومت مثل یک جرم متمرکز روی آن قرار می‌گیرد که سیستم مقاومت قرار گرفته بر روی سیم پایه، نسبت به دیگر اجزای برد الکترونیکی که با پایه‌ها و سطح، تماس بیشتری به برد اتصال پیدا می‌کنند، زودتر به تشدید می‌رسد، بنابراین، عمر خستگی آن کمتر از سایر اجزای برد خواهد بود. در جدول (۴) خواص مکانیکی شامل مدول الاستیسیته، چگالی و نسبت پواسون برای مواد به‌کار رفته در سیستم جداساز، برد الکترونیکی و مؤلفه‌هایش آورده شده‌است. در جدول (۵) مشخصات جنس، ابعاد و وزن برد الکترونیکی به همراه مؤلفه‌هایش آورده شده‌است [۱۲]. همچنین مشخصات مقاومت الکتریکی مورد بررسی در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲- مشخصات هندسی و عملکردی مقاومت مورد بررسی [۱۲]

دسی بل و دامنه جابه‌جایی برای سیستم با جداساز در فرکانس ۱۰۵ هرتز برابر با ۱۲/۲۱- دسی بل است.



شکل ۱۴- مقایسه نمودار پاسخ هارمونیک در راستای طولی در محل لحیم سیم مقاومت به برد الکترونیکی برای حالت‌های با و بدون جداساز ارتعاشی

## تحلیل گذرای برد و تجهیزات الکترونیکی با فرض رفتار هایپر الاستیک برای ژل سیلیکون

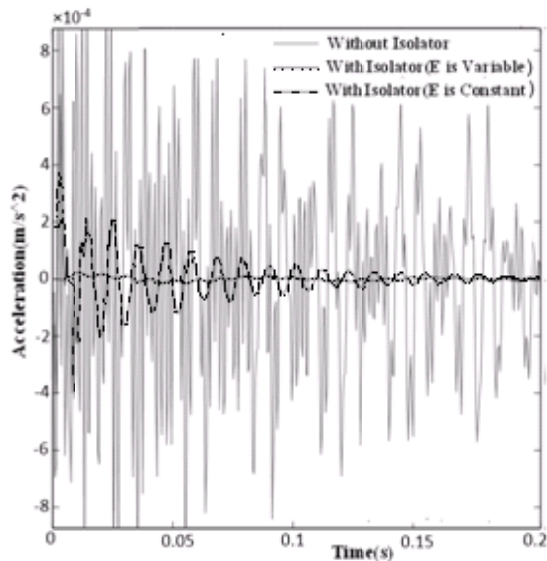
از آنجاکه در کرنش‌های بزرگ، رفتار ماده ژل سیلیکون از مواد هایپر الاستیک تبعیت می‌کند، بنابراین، در این قسمت به مدل‌سازی اجزای محدود جداساز ارتعاشی مورد بررسی با در نظر گرفتن مدل ماده هایپر الاستیک برای ژل سیلیکون پرداخته می‌شود. یکی از مدل‌های هایپر الاستیک که توسط محققان زیادی مورد استفاده قرار گرفته است، مدل مونی-ریولین است که در فرم‌های دو پارامتری، سه پارامتری، پنج و نه پارامتری مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴]. شایان ذکر است، هر چه تعداد پارامترهای این مدل بیشتر باشد، نیاز به آزمایش‌های بیشتری برای ثابت‌های مدل است. برای اینکه فقط از یک آزمایش کشش (یا فشار) تک محوره بتوان استفاده کرد، در مطالعه حاضر از فرم دو پارامتری مدل مونی-ریولین برای ژل سیلیکون استفاده می‌شود. استخراج ثابت‌های این مدل با استفاده از برازش منحنی بر روی نمودار تنش-کرنش انجام می‌گیرد که این امکان در نرم‌افزارهای تجاری اجزای محدود، از جمله آنسیس وجود دارد. منحنی تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش کشش برای یک نوع ژل سیلیکون به همراه منحنی برازش شده برای مدل مونی-ریولین دو پارامتری در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در شکل (۱۶) ثابت‌های مدل مونی-ریولین که با نرم‌افزار آنسیس از برازش منحنی بر آزمایش کشش تجربی حاصل شده است، ارائه شده است. نمونه آزمایش شده به شکل دیسک سیلندری با قطر ۲۹ میلی‌متر و ضخامت ۱۲/۵ میلی‌متر است. با توجه به شکل (۱۵) ملاحظه می‌شود که منحنی مربوط به مدل مونی-

## تحلیل هارمونیک برد و تجهیزات الکترونیکی با فرض دامنه ارتعاشات کوچک برای جداسازها

بار (نیرو) واحد در راستای محور  $Y$  (راستای طولی) در پایه جداسازها بین تمام نودها توزیع می‌شود. مقدار نیروی توزیع شده در بین ۵۱۲ نود در پایه جداساز برای هر نود برابر با  $e^{-3} \times 1/953125$  نیوتن است. پایه جداسازها در راستاهای  $X$  و  $Z$  بسته شده و در راستای  $Y$  باز هستند (شکل ۱۳). در این تحلیل دامنه ارتعاشات کوچک فرض شده و لذا از خواص ذکر شده در شکل‌های (۷ و ۶) برای ژل سیلیکون استفاده شده است.

نمودار پاسخ جابه‌جایی در راستای طولی در محل اتصال سیم لحیم به برد الکترونیکی برای مدل الاستیسیته متغیر با فرکانس و مدل الاستیسیته ثابت با فرکانس مربوط به ژل سیلیکون تحت بارگذاری هارمونیک با حالت بدون جداساز ارتعاشی (اتصال مستقیم برد الکترونیکی به سازه) در شکل (۱۴) مقایسه شده است. کارایی سیستم جداساز با توجه به تفاوت سطح ارتعاشی قبل و بعد از به‌کارگیری سیستم جداساز تعیین می‌شود. برای یک جداساز ارتعاشی خوب، ایجاد اختلاف حدود ۱۰ دسی بل پذیرفتنی است.

با توجه به شکل (۱۴)، می‌توان مشاهده کرد که با فرض مدل الاستیسیته ثابت برای ژل سیلیکون، جداسازی ارتعاشات از فرکانس حدود ۱۰۰ هرتز شروع شده است (فرکانسی که در آن جداسازی ارتعاشات شروع می‌شود، به سختی و میرایی سیستم جدا ساز بستگی دارد) و تا حدود ۲۵۰ هرتز جداسازی قابل قبول است و پس از آن تقریباً جداساز تأثیر خاصی نداشته است. برای حالتی که در مدل سازی از مدل الاستیسیته متغیر با فرکانس برای ژل سیلیکون استفاده شده است، جداسازی ارتعاشات از ۶۵ هرتز شروع می‌شود و در بازه فرکانسی ۶۵ هرتز تا ۱۱۵ هرتز جداسازی ارتعاشات به خوبی انجام شده است. در بازه فرکانسی ۱۱۵ هرتز تا ۱۳۷ هرتز نه تنها جداسازی صورت نگرفته است، بلکه دامنه ارتعاشات در محل لحیم مقاومت افزایش پیدا کرده است (با توجه به اینکه استفاده از جداساز ارتعاشی باعث تغییر توزیع سختی و استهلاک کل سیستم شده و رفتار ارتعاشی سیستم را عوض می‌کند، بنابراین، ساختار هندسی و فیزیکی و محل قرارگیری جداسازهای ارتعاشی معمولاً طوری طراحی می‌شود که در بازه‌های فرکانسی مهم، دامنه ارتعاشات کاهش پیدا کرده و جداسازی انجام گیرد که البته در این تحقیق، طراحی برای بازه خاص فرکانسی مدنظر نیست). در حالی که در بقیه بازه‌های فرکانسی جداسازی پذیرفتنی است. در نمودار پاسخ در این حالت، اولین فرکانس تشدید بدون جداساز در ۱۰۵ هرتز و با جداساز در ۱۲۵ هرتز اتفاق افتاده است. دامنه جابه‌جایی برای سیستم بدون جداساز در فرکانس تشدید ۱۰۵ هرتز برابر با ۳۰/۴۶



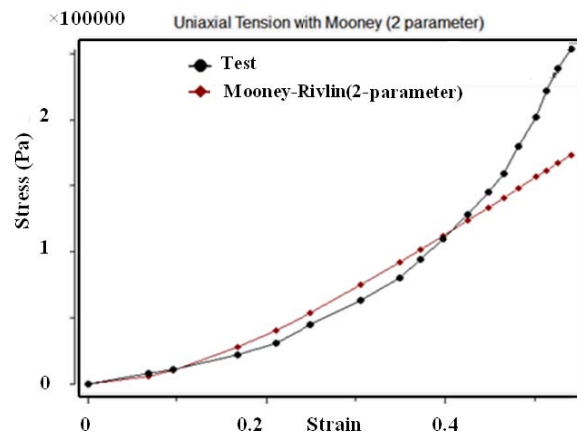
شکل ۱۷- مقایسه منحنی پاسخ زمانی به تحریک ضربه واحد پایه در محل اتصال مقاومت به برد الکترونیکی در دو حالت بدون جداساز و با جداساز و مدل مونی-ریولین برای زل سیلیکون

### نتیجه گیری

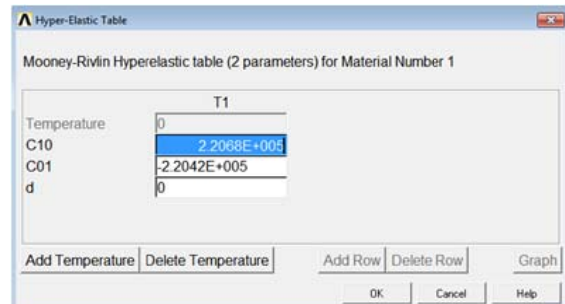
در این مقاله، جداسازی ارتعاشات طولی (گذرنده از آداپتور بین ماهواره و ماهواره‌بر) از تجهیزات حساس ماهواره با استفاده از یک جداساز ارتعاشی جدید از جنس ژل سیلیکون مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل عملکرد این جداساز ارتعاشی با استفاده از مدل سازی سه بعدی اجزای محدود انجام شد. خواص دینامیکی تابع فرکانسی ژل سیلیکون با استفاده از آزمایش‌های انجام شده در مراجع استخراج شده و با مقایسه منحنی انتقال‌پذیری جداساز ژل سیلیکونی مدل شده در مطالعه حاضر با منحنی‌های تجربی و تحلیلی مراجع، نسبت به صحت‌گذاری فرآیند مدل‌سازی اقدام شد. نتایج نشان داد که مدل‌سازی انجام شده در این مقاله به جواب آزمایش نزدیک‌تر است. در ادامه، با ایجاد مدل اجزای محدود یک برد الکترونیکی همراه با مؤلفه‌هایش و قرار دادن این برد بر روی یک سیستم متشکل از چهار عدد جداساز ژل سیلیکونی، عملکرد این جداساز ارتعاشی بر روی میزان ارتعاشات منتقله به سیم پایه یک مقاومت الکتریکی در محل لحیم بر روی برد مورد بررسی قرار گرفت. جهت مدل‌سازی خواص مکانیکی ژل سیلیکون، هم رفتار خطی (تغییر شکل‌های کوچک) و هم رفتار هایپر الاستیک در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی خطی، خواص دینامیکی ژل سیلیکون از نتایج منتشر شده در مراجع استخراج شد و برای مدل‌سازی رفتار هایپر الاستیک، با برازش منحنی بر روی داده‌های غیرخطی تنش- کرنش ناشی از آزمایش کشش محوری یک نمونه، ثوابت مدل دو پارامتری مونی-ریولین با استفاده از نرم‌افزار آنسیس به‌دست آمد. با

ریولین دو پارامتری در کرنش‌های بیشتر از ۰/۴ به‌طور کامل به منحنی تجربی منطبق نشده است و برای انجام این کار لازم است که آزمایش کشش در جهت عرضی، آزمایش فشار و آزمایش کشش دو جهته انجام گیرد که در این پژوهش از اینکار صرف‌نظر می‌شود و مطالعه تا کرنش حدود ۰/۴ متمرکز می‌شود که تطابق دو منحنی پذیرفتنی است.

با اعمال موارد اثبات شده برای مدل مونی-ریولین در مدل اجزای محدود نشان داده شده در شکل (۱۳) و همچنین فرض استهلاک سازه‌ای، بار ضربه واحد از پایه به جداسازها در جهت طولی اعمال شده و حل گذرا انجام گرفت. پاسخ زمانی در محل اتصال سیم لحیم مقاومت به برد الکترونیکی در شکل (۱۷) ارائه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که جداساز ارتعاشی مدل‌سازی شده با خاصیت نزدیک به واقعیت (ژل سیلیکون با رفتار هایپر الاستیک) به‌خوبی توانسته است کار جداسازی ارتعاشات از برد الکترونیکی را انجام دهد، به‌طوری‌که هم دامنه بار و هم زمان مستهلک‌شدن ارتعاشات چندین برابر کاهش پیدا کرده است. همچنین ملاحظه می‌شود که این سیستم خیلی از فرکانس‌های بالا را حذف کرده است.



شکل ۱۵- منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از آزمایش و مدل مونی-ریولین دو پارامتری برازش شده توسط نرم‌افزار آنسیس



شکل ۱۶- ثوابت به‌دست آمده برای ژل سیلیکون مربوط به مدل مونی-ریولین دو پارامتری نرم‌افزار آنسیس

Based on the Experiment," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, C*, Vol.53, No.496, 1987, pp. 2425-2430.

- [7] Shimizu N. and Yamazaki, H., "Development of vibration Insulator using a New Material Silicone Gel," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C*, Vol.59, No. 568, 1993, pp. 3717-3724.
- [8] Yoshihiro, S., Futoshi, W., Kiyoshi, S. and Shimizu, N., "Steady-State Response of Silicone BETA Gel and a Mass System," *Dynamics & Design Conference*, 2000.
- [9] Zhang, W. and Nobuyuki, S., "Finite Element Formulation for the Viscoelastic Body Modeled by Fractional Constitutive Law," *Acta Mechanica Sinica*, Vol. 17, No. 4, 2001, pp. 354-365.
- [10] *Orbital Sciences Corporation*, Taurus II User's Guide, Release 1.2, December 2009.
- [11] Available, [On line]: <http://www.vibrationmounts.com>
- [12] Dave, S. Steinberg, *Vibration Analysis for Electronic Equipment*, Wiley- Interscience Publication, New York, 1973.
- [13] Tang, W., Ren, J. and Xu, L., "Study on Vibration Analysis for Printed Circuit Board of an Electronic Apparatus," *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2007.
- [14] Mooney, M., "A Theory of Large Elastic Deformation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 11, No. 9, 1940, pp. 582-592.

انجام تحریک پایه و حل گذرا، میزان ارتعاشات منتقله به پایه مقاومت در دو حالت با جداساز ارتعاشی و بدون جداساز ارتعاشی مقایسه شد. نتایج نشان داد که جداساز ارتعاشی ژل سیلیکونی به خوبی توانسته است سطح ارتعاشات منتقله را چندین برابر کاهش داده و همچنین خیلی سریع دامنه ارتعاشات را مستهلک کرده است.

## مراجع

- [1] Bicos, A. S. and Johnson, C. D., "Need for and Benefits of Launch Vibration Isolation," *SPIE Proceedings*, 1997, pp.14-19.
- [2] Johnson, C.D. and Wilke, P.S., "Protecting Satellites from the Dynamics of the Launch Environment," *AIAA Space Conference*, Long Beach, California, 2003.
- [3] Timmins, A.R. and Heuser, R.E., A Study of First - Day Space Malfunctions, *NASA Technical Note, D-6474*, 1971.
- [4] Johnson, C.D., Wilke, P.S., Grosserode, P. and Sciulli, D., "Whole-Spacecraft Vibration Isolation for Broadband Attenuation," *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2000.
- [5] Liu, F., Fang, B. and Huang, W.H., "Vibration Control of Flexible Satellites Using a New Isolator," *Systems and Control in Aeronautics and Astronautics (ISSCAA) 3<sup>rd</sup> International Symposium, IEEE*, 2010, pp.593-597.
- [6] Yamada, A. and Kakubari, T., "The Characteristics and Application of Silicone Gel, the Fundamental Study