



## تحلیل عددی و آزمایشگاهی پاسخ محوری ایزولاتور الاستومری تحت اثر بارگذاری ضربه

میلاذ مجیدیان<sup>1</sup>، محمد طاهای ابدی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی فضایی، پژوهشگاه هوافضا وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران  
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه هوافضا وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران  
\* تهران، صندوق پستی 834-14665، پست الکترونیکی abadi@ari.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 03 اردیبهشت 1394  
پذیرش: 02 خرداد 1394  
ارائه در سایت: 30 خرداد 1394  
کلید واژگان:

ایزولاتور الاستومری  
ضربه  
نمودار طیف پاسخ شوک  
مطالعه آزمایشگاهی  
تحلیل اجزای محدود

### چکیده

روش آزمایشگاهی برای تحلیل پاسخ گذرای ایزولاتور الاستومری تحت اثر بارگذاری ضربه استفاده می‌شود و مدل عددی برای تحلیل پاسخ ایزولاتور برای تعیین میزان نسبت انتقال و نمودار طیف پاسخ شوک در محدوده فرکانس تحریک ارائه می‌گردد. ایزولاتور الاستومری در مطالعه آزمایشگاهی به تیر رزونانسی متصل می‌شود که در اثر ضربه مکانیکی تحریک می‌گردد و شدت امواج ورودی و خروجی ایزولاتور با استفاده از حسگر شتاب در سه راستای عمود بر هم اندازه‌گیری می‌شود. مدل اجزای محدودی برای تحلیل پاسخ ضربه ایزولاتور ارائه می‌گردد که این مدل با استفاده از روش جمع آثار شکل مدهای تحلیل می‌شود که فرکانس طبیعی آن‌ها در محدوده فرکانس تحریک ایزولاتور است. با توجه به اهمیت پاسخ محوری ایزولاتور، مدل اجزای محدود برای تحلیل پاسخ محوری ایزولاتور تحت اثر بارگذاری ضربه استفاده می‌گردد. تعداد المان لازم برای تحلیل اجزای محدود، گام زمانی برای انتگرال‌گیری معادله حرکت و تعداد شکل مدها برای اطمینان از دقت شبیه‌سازی انتشار امواج بررسی شده و مقادیر بهینه آن‌ها بر اساس همگرایی نتایج تحلیل انتخاب می‌شود. میزان افت شدت امواج تحریک در اثر عبور از ایزولاتور با توجه به ضریب میرایی آن در شکل مدهای مختلف در حوزه زمان و فرکانس تعیین می‌گردد. نتایج تحلیل مدل ایزولاتور در دو سطح مختلف بارگذاری ضربه نشان می‌دهد میزان افت و نمودار طیف پاسخ شوک محاسبه شده با نتایج آزمایشگاهی تطابق مناسبی دارد و از این مدل می‌توان عملکرد ایزولاتور را با توجه به شرایط تحریک ضربه پایه آن تحلیل و میزان افت دامنه شتاب و جابه‌جایی را در خروجی ایزولاتور تعیین نمود.

## Experimental and Numerical Analyses of Longitudinal Response of Elastomeric Isolator under Impact Loading

Milad Majidian, Mohammad Tahaye Abadi\*

Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran.  
\* P.O.B. 14665 - 834 Tehran, Iran, abadi@ari.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 23 April 2015  
Accepted 23 May 2015  
Available Online 20 June 2015

#### Keywords:

Elastomeric isolator  
Impact, Shock response spectrum  
Experimental analysis  
Finite element analysis

### ABSTRACT

An experimental procedure is used to determine the transient response of an elastomeric isolator under the impact loading conditions and a numerical procedure is developed to evaluate the corresponding acceleration transmission ratio and shock response spectrum. In the experimental analysis the elastomeric isolator is connected to a resonance beam subjected to the shock loading of a pendulum striker and the shock level is measured using acceleration sensors mounted along three orthogonal directions in the basement and free end of isolator. The shock response spectrum diagram and the level of wave attenuation are determined based on the measured acceleration levels for a wide frequency range. Finite element model based on mode superposition approach is developed to analyze the impact response of elastomeric isolator using the mode shapes with frequency in the range of impact excitation spectrum. Due to the importance of longitudinal response of isolators, the numerical model is employed to evaluate the longitudinal output acceleration time history of isolator. The number of elements, time step for motion equation integration and the number of mode shapes are studied and the optimized corresponding values are selected based on the convergence of the numerical results. The calculated results for wave attenuation level and shock response spectrum diagrams correlate well with the experimental measurements under two different impact loading conditions and the present model can be used to evaluate the performance of isolators depending on the level of impact loads, transmission acceleration and displacement ratios in the output of elastomeric isolators.

### 1- مقدمه

ایزولاتورها با کاهش میزان اوج شتاب و جابه‌جایی برای محافظت تجهیزات حساس تحت اثر نیروی ناشی از امواج ضربه‌ای استفاده می‌شوند. مهم‌ترین عوامل ایجاد ضربه در وسایل فضایی شامل انفجار مواد در عملگرهای

Please cite this article using:

M. Majidian, M. Tahaye Abadi, Experimental and Numerical Analyses of Longitudinal Response of Elastomeric Isolator under Impact Loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 67-74, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مرده تعیین نمایند. آن‌ها میزان تغییر شکل، توزیع تنش و سفتی سازه را با سری فوریه تعیین کردند و این مقادیر را با نتایج عددی به‌دست‌آمده از روش اجزای محدود مقایسه کردند.

در اکثر تحقیقات پیشین مدل تحلیلی به‌صورت سیستم یک درجه آزادی در نظر گرفته‌شده است که این فرض برای فرکانس‌های بالا فرض مناسبی نیست زیرا کلیه شکل مدهای مؤثر سازه در پاسخ ضربه در مدت‌زمان کم و فرکانس بالا در نظر گرفته نمی‌شود. در برخی از این تحقیقات پاسخ ایزولاتورها بر اساس مدل‌های اجزای محدود در فرکانس و دامنه شتاب کم تحلیل شده است. در این مقاله با انجام آزمایش ایزولاتور الاستومری تحت اثر تحریک از پایه از نوع شتاب با فرکانس و دامنه‌ی بالا، نتایج حاصل با استفاده از روش اجزای محدود شبیه‌سازی می‌شود و نتایج عددی برای صحنه‌گذاری با پاسخ آزمایشگاهی ایزولاتور مقایسه می‌شود. برای این منظور در تحلیل آزمایشگاهی امواج با فرکانس بالا و مدت‌زمان کم با اعمال نیروی ضربه‌ای توسط مجموعه تیر رزونانسی تولید می‌شوند. شدت امواج تولیدشده در حوزه زمان در پایه ایزولاتور و خروجی آن با استفاده از حسگرهای شتاب در سه راستای عمود بر هم و نرخ داده‌برداری بالایی اندازه‌گیری می‌شود. سپس مدل اجزای محدودی برای شبیه‌سازی پاسخ ایزولاتور الاستومری برای تحلیل تحریک از پایه ایزولاتور ارائه می‌شود که تحت اثر شتاب‌های اندازه‌گیری‌شده در آزمایش به‌عنوان ورودی ایزولاتور است. تحلیل اجزای محدود بر اساس روش جمع آثار شکل مدهایی انجام می‌شود که فرکانس طبیعی آن‌ها در محدوده‌ی فرکانس تحریک ایزولاتور است. به‌منظور اطمینان از دقت نتایج و همگرایی پاسخ به‌دست‌آمده از تحلیل عددی، اثر تعداد المان، نمو زمانی انتگرال‌گیری معادله دیفرانسیل بقای اندازه حرکت خطی و تعداد شکل مدهای مورد‌استفاده در تحلیل پاسخ دینامیکی بررسی می‌شود. ضریب میرایی ثابتی برای ایزولاتور در طیف گسترده‌ای از فرکانس‌های تحریک تعیین می‌شود تا در حوزه زمان و طیف پاسخ شوک در حوزه فرکانس با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد.

## 2- تحلیل آزمایشگاهی پاسخ ضربه ایزولاتور

شکل 1 تصویری از تجهیزات آزمایشگاهی مورد‌استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد که شامل تیر تحریک‌کننده پایه‌ی ایزولاتور یا تیر رزونانسی، مجموعه ضربه‌زن و مجموعه ایزولاتور است. در اثر ضربه قطعۀ فولادی متصل به آونگ تجهیزات آزمایشگاهی، امواج الاستیک ایجادشده در تیر به پایه‌ی ایزولاتور منتقل و از آن عبور می‌کنند. جزئیات مجموعه ایزولاتور در شکل 1 ب نشان داده‌شده است که شامل قطعۀ آلومینیومی متصل‌کننده‌ی ایزولاتور به تیر یا پایه‌ی ایزولاتور، ایزولاتور، حسگرهای اندازه‌گیر شتاب قبل و بعد از ایزولاتور، بلوک حسگر، قطعۀ آلومینیومی متصل‌کننده بلوک حسگر به ایزولاتور یا پایه‌ی حسگر است. ایزولاتور از دو پیچ اتصال و میله‌ی الاستومری با مقطع دایره‌ای تشکیل‌شده است که قطر آن در راستای محور متغیر است. پیچ‌های دو سر ایزولاتور نوع متریک با قطر خارجی 10 میلی‌متر و حداقل و حداکثر قطر قسمت الاستومری به ترتیب 44 و 54/3 میلی‌متر است. ایزولاتور با استفاده از پیچ‌های دو انتهای آن و چسب به پایه‌ی ایزولاتور و پایه‌ی حسگر کاملاً متصل می‌شود. علت استفاده از چسب در پایه‌ی ایزولاتور علاوه بر وجود اتصال روزه، ایجاد کوبلینگ کاملی بین ایزولاتور و تیر است. سه حسگر شتاب در سه راستای عمود بر هم مطابق با شکل 1 ج به هر بلوک حسگر متصل می‌شود. یک بلوک حسگر به پایه‌ی ایزولاتور و بلوک دیگر به پایه‌ی حسگر به وسیله‌ی پیچ و چسب متصل می‌گردد. بنابراین با

پیروتکنیک مانند کمربندهای انفجاری مورد استفاده در سامانه‌های جدایش، شوک ناشی از باز شدن چترها در سامانه‌های بازیابی، ضربه لحظه‌ی برخورد به زمین در وسایل برگشتی است.

امواج ناشی از بارگذاری ضربه، شتاب و فرکانس بسیار بالایی را در مدت زمان بسیار کم در اجسام جامد منتشر می‌کنند. به‌عنوان مثال امواج ناشی از انفجار مواد پیروتکنیک در سازه که اصطلاحاً امواج پیروشوک نامیده می‌شوند سطح شتاب بیشتر از 10000 متر بر ثانیه و فرکانس 20 کیلوهرتز در ناحیه-ی نزدیک به محل انفجار تولید می‌کنند [1].

از آنجا که آسیب‌های سخت‌افزاری متعددی در مسیر پروازی تجهیزات فضایی ناشی از امواج پیروشوک گزارش شده است [2] لذا برای کاهش اثرات مخرب این امواج از ایزولاتورها استفاده می‌شود.

ایزولاتورها از دیدگاه کنترل‌پذیری به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. ایزولاتورهای فعال به علت فرکانس بالای امواج پیروشوک کارایی لازم را در بارگذاری ضربه‌ای ندارند و از ایزولاتورهای غیرفعال برای کاهش شدت امواج انتقالی به تجهیزات حساس استفاده می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها ایزولاتورهای الاستومری، طناب کابلی<sup>1</sup> و ایزولاتور پنوماتیکی است. بررسی آزمایشگاهی نشان داده است مواد الاستومری برای فرکانس‌های بالا عملکرد مناسبی دارند [3].

مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌های متعددی برای تحلیل پاسخ ایزولاتورها توسط پژوهشگران پیشین ارائه‌شده است. هریسون [4] با استفاده از مدل غیرخطی سیستم یک درجه آزادی جرم، فنر و مستهلک کننده رفتار دینامیکی ایزولاتورهای لاستیکی را با استفاده از شش پارامتر مؤثر بر عملکرد آن‌ها و مدل‌های متفاوت برای فنر غیرخطی سهموی و المان اصطکاکی بررسی کرد و توانست پاسخ ایزولاتور را در محدوده‌ی فرکانسی بسیار کم 0/05 تا 25 هرتز تحت اثر تحریک سینوسی با دقت خوبی تعیین نماید.

شارپ [5] پاسخ ایزولاتورها را تحت اثر تحریک پایه از جنس شتاب با دامنه‌ی 300 تا 500 متر بر مجذور ثانیه با تحلیل یک سیستم یک درجه آزادی جرم، فنر و مستهلک کننده و خواص ارائه‌شده توسط کارخانه سازنده ایزولاتورها ارائه کرد که نتایج به‌دست‌آمده از روش تحلیلی به‌خوبی با مشاهدات تجربی سازگار بود.

ژیائو و همکارانش [6] اثر غیرخطی ضرایب استهلاک ایزولاتورها را بررسی کردند و نتایج خود را به‌صورت تحلیلی برای یک سیستم یک درجه آزادی و بر اساس ارتباط ضرایب انتقال‌پذیری نیرو و جابه‌جایی با ضریب استهلاک در حوزه‌ی فرکانس برای تحریک از پایه و تحریک اجباری ارائه دادند. آن‌ها دریافتند حالت غیرخطی استهلاک با توان سوم ایزولاسیون بهتری نسبت به حالت خطی دارد.

دیوتا و ونکستن [7] یک مدل تحلیلی یک درجه آزادی جرم، فنر و مستهلک کننده برای ایزولاتورهای مرکب الاستومری ارائه دادند و روابط حاکم بر پارامترهای مؤثر در این ایزولاتور را با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی تعیین کردند. آن‌ها با اعمال نیروی تحریک سینوسی با فرکانس 80 هرتز به جرم توانستند نتایج با دقت خوبی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش به دست آورند.

آنجلی و همکارانش [8] رفتار استاتیکی ایزولاتورهای الاستومری چندلایه تقویت‌شده با الیاف کربن تحت اثر گشتاور خمشی و نیروی فشاری را بررسی کردند تا ظرفیت تحمل بار این نوع از ایزولاتورها را تحت اثر جرم

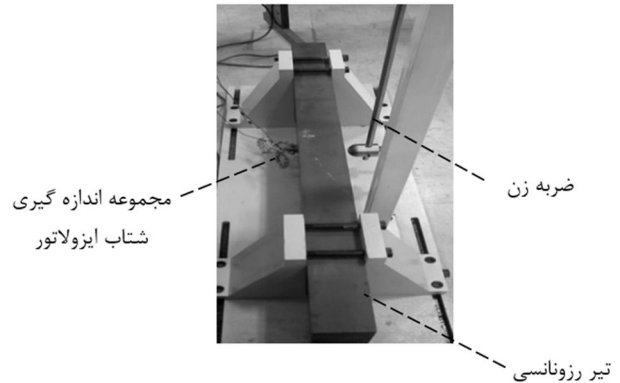
1- wire rope

فرکانس طبیعی تیر دارد و در این تحقیق ضخامت آن طوری انتخاب می‌شود که فرکانس طبیعی اول تیر بسیار بیشتر از فرکانس طبیعی اول ایزولاتور گردد تا ایزولاتور با سیگنالی که دارای طیف وسیعی از فرکانس‌ها است تحریک شود. در صورتی که فرکانس طبیعی تیر کم باشد تیر مانند یک فیلتر پایین گذر عمل کرده و امواج با محتوای فرکانسی بالا را از خود عبور نمی‌دهد [9]. جرم ضربه‌زن با افزودن وزنه‌های استاندارد و سرعت برخورد آن با استفاده از زاویه‌ی آونگ قابل تنظیم است تا سطح شوک موردنظر در پایه‌ی ایزولاتور ایجاد شود.

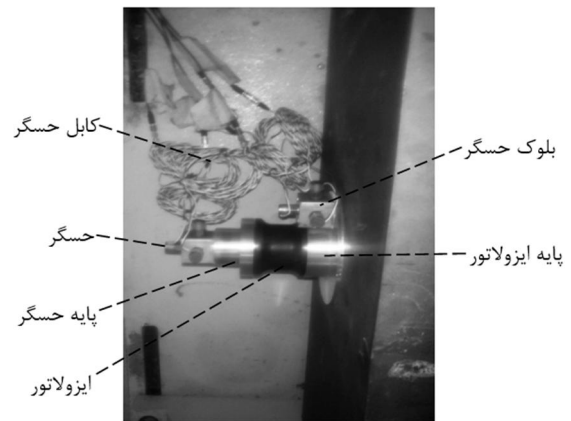
شکل 1 ج تصویر حسگر مورد استفاده در این تحقیق برای اندازه‌گیری مقدار شتاب را نشان می‌دهد که ساخت شرکت PCB است و قابلیت ثبت بیشینه شتاب 98 هزار متر بر مجذور ثانیه را دارد. مدار داده‌برداری ساخت شرکت NI<sup>1</sup> و مدل PXIe-4499 برای ثبت امواج اندازه‌گیری شده توسط حسگرها استفاده می‌شود که این مدار برای کاربردهای ثبت امواج ارتعاشاتی و امواج صوتی با فرکانس و دقت بالا طراحی شده است. هر یک از این مدارها تعداد 16 ورودی 24 بیتی دارند که نرخ داده‌برداری هر ورودی به‌طور مستقل برابر با 204/8 کیلوهرتز است. پردازنده و کنترلر مورد استفاده در سیستم اندازه‌گیری ساخت شرکت NI مدل NIPXIe-8133 RT است که به‌صورت بلادرنگ<sup>2</sup> عمل می‌کند. جهت ثبت داده‌های حاصل از آزمایش از نسخه 2012 نرم‌افزار سیگنال اکسپرس<sup>3</sup> استفاده می‌شود.

شکل 2 تاریخچه‌ی شتاب اندازه‌گیری شده در راستای محور ایزولاتور و دو راستای عرضی را قبل و بعد از ایزولاتور برای ضربه 30 درجه نشان می‌دهد. که برای محدود کردن نمودار شتاب و حذف مقادیر قبل از اعمال ضربه و مقادیر میرا شده بعد از اعمال ضربه، نمودار در محدوده‌ای در نظر گرفته می‌شود که قدر مطلق دامنه‌ی شتاب بزرگ‌تر از 10 متر بر مجذور ثانیه باشد. مقدار قدر مطلق بیشینه شتاب محوری مطابق با شکل 2- الف قبل و بعد از ایزولاتور به ترتیب برابر با 2566/6 و 692/20 متر بر مجذور ثانیه است. مقدار افت دامنه‌ی شتاب در دو راستای عرضی مطابق با شکل 2- ب و ج بیشتر از راستای محوری است به‌طوری که در راستای عرضی اول قدر مطلق بیشینه شتاب قبل و بعد از ایزولاتور به ترتیب برابر با 1076/91 و 138/64 متر بر مجذور ثانیه و در راستای دوم این مقادیر قبل و بعد از ایزولاتور به ترتیب 1225/72 و 28/61 متر بر مجذور ثانیه است. نسبت انتقال ایزولاتور به‌صورت نسبت شتاب بعد از ایزولاتور به قبل از آن تعریف می‌شود که در راستای محوری برابر با 26/97 درصد و در دو راستای عرضی برابر با 12/87 و 2/33 است. به‌طور مشابه نتایج آزمایش ایزولاتور برای وزنه‌ی دو کیلوگرمی و زاویه ضربه‌زن 60 به‌گونه‌ای است که حداکثر شتاب در راستای محوری و دو راستای عرضی قبل از ایزولاتور به ترتیب 7220/14، 2974/06 و 3521/29 متر بر مجذور ثانیه است و نسبت‌های انتقال محوری و دو راستای عرضی به ترتیب برابر با 15/88، 8/02 و 1/26 درصد است.

نسبت انتقال به‌دست‌آمده از تحلیل آزمایشگاهی نشان می‌دهد ایزولاتور الاستومری شتاب‌های عرضی را به‌خوبی مستهلک می‌کند اما در راستای محوری که تحریک نیز در این راستا بوده است میزان استهلاک نسبت به دو راستای عرضی خیلی کمتر است. نتایج تحلیل آزمایشگاهی انجام‌شده در این تحقیق نشان می‌دهد علی‌رغم تحریک ایزولاتور با دامنه‌ی شتاب بسیار بالا در راستای طولی و عرضی، مقدار دامنه‌ی شتاب در راستای عرضی به‌شدت



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 1 الف- مجموعه تیر، ضربه‌زن، ایزولاتور و مجموعه اندازه‌گیری شتاب ب- مجموعه ایزولاتور و پایه‌های متصل‌کننده از نمای نزدیک تر ج- بلوک حسگر و حسگر مورد استفاده در آزمایش

استفاده از شش حسگر مقدار شتاب در سه راستای عمود برهم قبل و بعد از ایزولاتور اندازه‌گیری می‌شود. پایه‌ی حسگر و ایزولاتور به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که فرکانس طبیعی اول آنها از حداکثر مقدار فرکانس داده‌برداری قابل ثبت توسط سیستم اندازه‌گیری بیشتر باشد تا ارتعاشات این قطعات اثر ناچیزی در نتایج آزمایشگاهی داشته باشد. راستای اعمال نیروی ضربه در راستای محور ایزولاتور است و با انتخاب ضخامت بالای تیر رزونانسی در مقایسه با ابعاد ایزولاتور، امواج با محتوای فرکانسی بالایی در مقایسه با فرکانس طبیعی ایزولاتور ایجاد می‌شود. هدف از این تحقیق مطالعه‌ی رفتار ایزولاتور تحت اثر نیروی ضربه است که موجب تحریک آن با اعمال سیگنال نیرو/ شتاب با محتوای فرکانسی در طیف وسیعی می‌گردد. نیروی ضربه اعمالی به تیر رزونانسی موجب تحریک تعدادی از شکل مدهای آن شده و امواجی با محتوای فرکانسی متناظر با فرکانس‌های طبیعی تیر، به ایزولاتور متصل به آن منتقل می‌گردد. ضخامت تیر رزونانسی اثر قابل‌توجهی بر

1- National Instruments  
2- real-time  
3- Lab view signal express

دامنه شتاب مختلف و میرایی ماده الاستومری را در خروجی ایزولاتور تحلیل نمود. در ادامه مدلی برای تحلیل پاسخ ضربه ایزولاتور ارائه می‌شود که پایه‌ی آن در راستای محوری تحت اثر شتاب محوری اندازه‌گیری شده در آزمایش ضربه برای زوایای 30 و 60 درجه آونگ قرار می‌گیرد. این مدل برای تعیین پاسخ ضربه ایزولاتور و تعیین شتاب خروجی استفاده می‌شود.

### 3- مدل‌سازی پاسخ ضربه ایزولاتور

در این بخش مدل اجزای محدودی برای مجموعه ایزولاتور الاستومری شامل ایزولاتور، پایه‌ی ایزولاتور و پایه‌ی حسگر ارائه می‌شود که جابه‌جایی گره‌های آن در لحظه دلخواه  $t$  با بردار  $u_t$  توصیف می‌گردد که تعداد ردیف این بردار برابر با تعداد گره‌های المان بندی ایزولاتور است. جابه‌جایی گره‌های ایزولاتور تحت اثر تحریک پایه را می‌توان به صورت مجموع دو بردار توصیف کرد، یعنی

$$u_t(t) = u_b(t) + u(t) \quad (1)$$

که  $u_b$  بردار جابه‌جایی پایه‌ی ایزولاتور و  $u$  جابه‌جایی نسبی گره‌های ایزولاتور است. معادله‌ی حرکت گره‌های ایزولاتور برحسب جابه‌جایی پایه و جابه‌جایی نسبی به صورت رابطه (2) بیان می‌شود [10]:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -M\ddot{u}_b(t) \quad (2)$$

که  $M$  ماتریس جرم،  $C$  ماتریس استهلاک و  $K$  ماتریس سفتی است. علامت نقطه در بالای متغیرها بیان گر مشتق آن‌ها برحسب زمان است. بردار حرکت پایه را می‌توان برحسب بردار جابه‌جایی صلب ایزولاتور ( $T$ ) بصورت رابطه (3) بیان می‌شود:

$$u_b(t) = TZ(t) \quad (3)$$

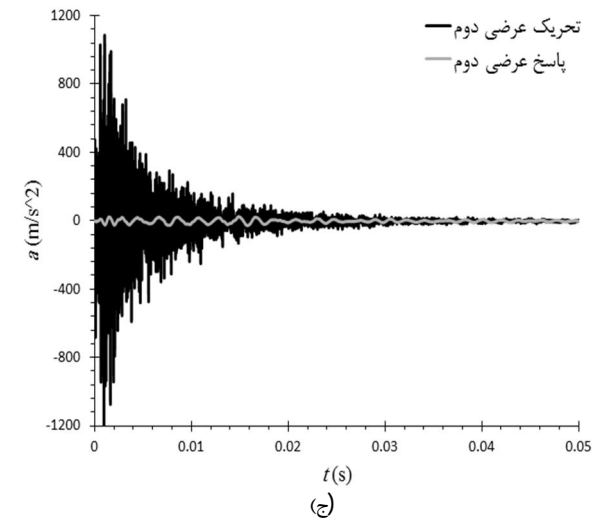
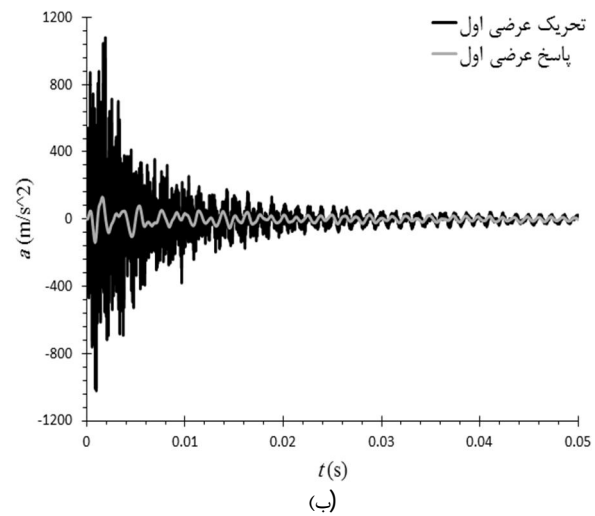
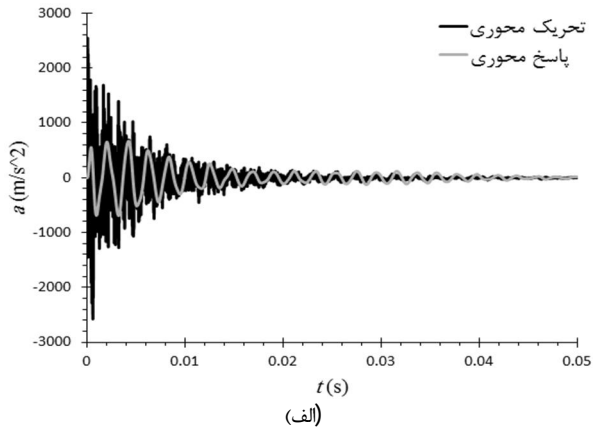
که  $Z(t)$  متغیر وابسته به زمان است. اگر ایزولاتور دارای  $n$  درجه آزادی باشد می‌توان حرکت آن را با مجموعه‌ی شکل مدهای  $\phi_m$  که دارای فرکانس طبیعی  $\omega_m$  می‌باشند توصیف نمود که  $m$  عدد طبیعی بین 1 تا  $n$  است. جابه‌جایی گره‌های ایزولاتور را می‌توان برحسب ترکیب خطی از شکل مدها بصورت رابطه (4) بیان کرد [10].

$$u(t) = \sum_{m=1}^N \phi_m q_m(t) \quad (4)$$

که توابع زمانی  $q_m(t)$  مختصات تعمیم‌یافته مربوط به شکل مد  $m$  ایزولاتور است. بر اساس رابطه‌ی (4) تحلیل پاسخ ضربه ایزولاتور با استفاده از جمع آثار تعداد  $N$  شکل مد، از فضای فیزیکی خود به مختصات تعمیم‌یافته انتقال می‌یابد و با این روش یک سیستم پیوسته به یک سیستم با  $N$  درجه آزادی تبدیل می‌گردد که مقدار  $N$  کوچک‌تر یا مساوی  $n$  است. با جایگذاری روابط (3) و (4) در (2) رابطه‌ی (5) حاصل می‌شود [10، 11، 12]:

$$\sum_{m=1}^N M\phi_m \ddot{q}_m(t) + C\phi_m \dot{q}_m(t) + K\phi_m q_m(t) = -\sum_{m=1}^N M\phi_m TZ(t) \quad (5)$$

ماتریس جرم در تحلیل اجزای محدود با استفاده از روش متمرکزسازی [13، 14] به صورت قطری بیان می‌گردد و با استفاده از تعریف مختصات تعمیم‌یافته می‌توان ماتریس سفتی را در معادله‌ی حرکت قطری نمود. در این مقاله مدل میرایی بر اساس استهلاک مودال<sup>2</sup> بیان شده است که یکی از روش‌های مناسب برای در نظر



شکل 2 شتاب پاسخ و تحریک ایزولاتور الف-راستای محوری ب-راستای عرضی اول ج-راستای عرضی دوم، برای زاویه اولیه‌ی آونگ 30 درجه

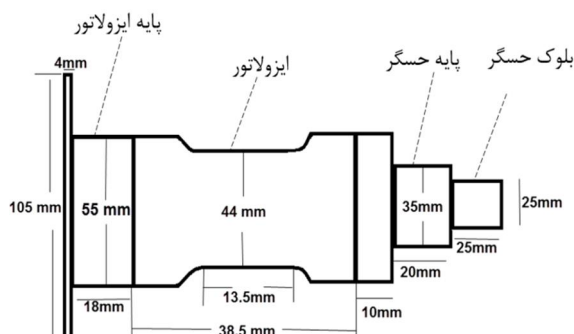
کاهش می‌یابد و مشکل اصلی ایزولاتور الاستومری مورد بحث در کاهش دامنه‌ی شتاب در راستای محوری است و قطعات متصل به ایزولاتور، ممکن است تحت اثر دامنه‌ی شتاب بالا در راستای محور ایزولاتور تخریب شوند. لذا این مقاله به پاسخ محوری ایزولاتور می‌پردازد و برای مدل‌سازی عملکرد ایزولاتور در راستای محوری، ایزولاتور به صورت میله‌ی الاستومری در نظر گرفته می‌شود که ارتعاش طولی خروجی ایزولاتور تحت اثر تحریک پایه را می‌توان با این مدل ارزیابی کرد. با استفاده از این مدل می‌توان اثر تحریک با

1- Lumped method  
2- Modal Damping

#### 4- نتایج تحلیل پاسخ ایزولاتور

در این تحلیل به پایه ایزولاتور شتاب اندازه‌گیری شده در آزمایش ناشی از برخورد آونگ با زاویه‌ی اولیه 30 درجه اعمال می‌شود و پاسخ قسمت‌های مختلف آن با توجه به خواص ایزولاتور تعیین می‌گردد و برای صحت‌سنجی نتایج شتاب ایجاد شده در انتهای آزاد ایزولاتور با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. در شکل 3 تصویر شماتیکی از مدل مجموعه‌ی ایزولاتور در نرم‌افزار اجزای محدود نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود مقاطع ابتدا و انتهای ایزولاتور دارای قطر 54/3 و طول 12/5 میلی‌متر و وسط آن دارای قطر 44 و طول 13/5 میلی‌متر است. قطر و طول پایه‌ی ایزولاتور در مقطع بزرگ خود به ترتیب 105 و 4 میلی‌متر و در مقطع کوچک خود به ترتیب 55 و 18 میلی‌متر است. همچنین قطعه پایه حسگر در مقطع بزرگ خود دارای قطر 55 و طول 10 میلی‌متر و در مقطع کوچک خود دارای قطر 35 و طول 20 میلی‌متر است بلوک حسگر دارای شکل مکعب مربع با طول ضلع 25 میلی‌متر است. این چهار قطعه توسط المان دو نقطه‌ای شبیه‌سازی می‌شوند. در این تحقیق، مدول الاستیسیته ایزولاتور با استفاده از آزمایش فشار تک محوره تعیین شد. برای این منظور قطعه‌ی استوانه‌ای از ایزولاتور مورد نظر بریده شد و با بارگذاری فشاری این قطعه در بین دو فک دستگاه یونیورسال، نمودار تنش - کرنش با اندازه‌گیری همزمان نیرو و جابه‌جایی استخراج شد و با استفاده از این نمودار مقدار مدول الاستیک برابر با 35 مگاپاسکال تعیین گردید. ضریب پواسون برابر با مقدار 0/5 و بر اساس فرض تراکم‌ناپذیری مواد الاستومری انتخاب شد [15]. در قطعات آلومینیومی چگالی 2700 کیلوگرم بر مترمکعب و مدول الاستیک برابر با 70 گیگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود. در این مرحله از تحلیل میرایی برای سازه در نظر گرفته نمی‌شود. گام زمانی برابر با 5 میکروثانیه، مدت‌زمان تحلیل برابر با 0/04999 ثانیه، تعداد گره 181 متناظر با 180 المان دو گره‌ای برای تحلیل استفاده می‌شود که هر گره آن یک درجه آزادی محوری دارد. از آنجاکه مدل مورد استفاده دارای 181 درجه آزادی است که یک درجه آزادی آن به علت شرط مرزی پایه ایزولاتور حذف شده است از تحلیل مودال تعداد 180 شکل مد استخراج می‌گردد که کلیه این شکل مدها برای تعیین پاسخ ایزولاتور استفاده می‌شوند. از آنجاکه فرکانس داده‌برداری در تحلیل آزمایشگاهی 20 کیلوهرتز بود و سازه در مد 180 دارای فرکانس طبیعی 8000 کیلوهرتز است بنابراین تغییر شکل‌ها با فرکانس بالاتر از آنچه در آزمایش قابل اندازه‌گیری بود در تحلیل عددی قابل رویت است. نسبت شتاب حداکثر ناشی از مدل عددی تقریباً 1/53 برابر نتایج آزمایشگاهی است و نتیجه می‌شود میرایی ایزولاتور نقش به‌سزایی در پاسخ دینامیکی آن دارد. اثر متغیرهای مختلف مؤثر بر تعیین پاسخ ایزولاتور شامل



شکل 3 هندسه و ابعاد مجموعه‌ی ایزولاتور

گرفتن استهلاک تناسبی است [10, 11, 12]. در این صورت معادله حرکت در دستگاه مختصات تعمیم یافته از سه ماتریس قطری تشکیل می‌گردد که حل این معادله را در دستگاه مختصات تعمیم یافته امکان پذیر می‌نماید. اثر کوپل بین مدهای مختلف با انتقال دستگاه مختصات تعمیم یافته به دستگاه مختصات اصلی به خوبی مدل سازی می‌شود.

اگر طرفین معادله‌ی فوق در ترانپاده شکل مدها ضرب شود با توجه به تعامد شکل مدها نسبت به یکدیگر رابطه‌ی (6) نتیجه می‌شود [10, 11, 12]:

$$\ddot{q}_m(t) + \frac{c_m}{m_m} \dot{q}_m(t) + \frac{k_m}{m_m} q_m(t) = -\Gamma_m z(t) \quad (6)$$

این رابطه برای  $N$  شکل مد سازه بیان می‌شود که  $k_m$ ,  $c_m$  و  $m_m$  به ترتیب ضرایب سفتی، استهلاک و جرم مودال و  $\Gamma_m$  ضریب تأثیر مشارکت مودال تحریک پایه بر شکل مد  $m$  ایزولاتور است که بصورت رابطه (7) تعریف می‌شوند [10, 11, 12]:

$$k_m = \Phi_m^T C \Phi_m \quad (7-الف)$$

$$c_m = \Phi_m^T C \Phi_m \quad (7-ب)$$

$$m_m = \Phi_m^T M \Phi_m \quad (7-ج)$$

$$\Gamma_m = \frac{1}{m_m} \Phi_m^T M T \quad (7-د)$$

فرکانس طبیعی متناظر هر شکل مد برابر است با:

$$\omega_{n_m} = \sqrt{\frac{k_m}{m_m}} \quad (8)$$

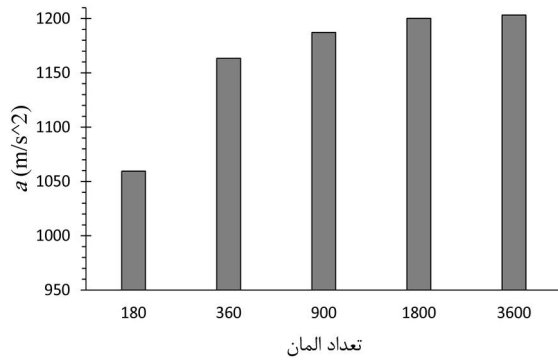
اگر نسبت میرایی مربوط به هر شکل مد بصورت رابطه (9) تعریف گردد:

$$\xi = \frac{c_m}{2\sqrt{k_m m_m}} \quad (9)$$

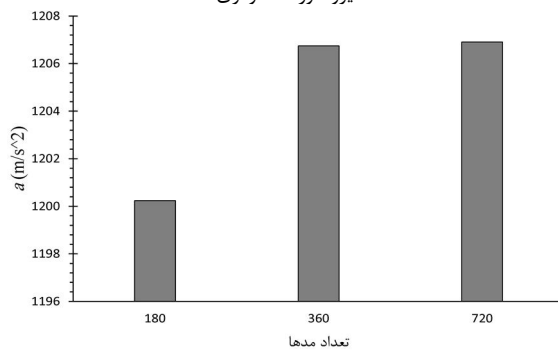
پس معادله‌ی دیفرانسیل مربوطه به هر یک از مختصات تعمیم یافته با جایگذاری روابط (8) و (9) در (6) بصورت رابطه (10) نوشته می‌شود [10, 11]:

$$\ddot{q}_m(t) + 2\xi\omega_{n_m}\dot{q}_m(t) + \omega_{n_m}^2 q_m(t) = -\Gamma_m z(t) \quad (10)$$

از حل معادله دیفرانسیل فوق برای هر شکل مد و تعیین مختصات تعمیم یافته مربوط به هر شکل مد، مقدار جابه‌جایی گره‌های المان بندی ایزولاتور با استفاده از رابطه‌ی (4) تعیین می‌شود. برای این منظور پاسخ ضربه ایزولاتور در این تحقیق در دو مرحله تعیین می‌شود. شکل مدهای ایزولاتور و فرکانس طبیعی متناظر آن‌ها در مرحله‌ی اول تحلیل با آنالیز مودال تعیین می‌گردد. سپس پاسخ زمانی سازه در مرحله‌ی دوم تحت اثر تابع تحریک پایه با استفاده از نتایج آنالیز مودال و جمع آثار شکل مدها به دست می‌آید. ایزولاتور در قسمت تکیه‌گاه خود دارای شرایط مرزی یک‌سرگیردار است و تحریکی در راستای محوری و به صورت شتاب به این تکیه‌گاه اعمال می‌شود در صورتی که شرایط مرزی آزاد در انتهای میله در نظر گرفته می‌شود. در ادامه تحلیل مودال و تعیین پاسخ گذرای ایزولاتور با استفاده از نرم‌افزار اباکوس ارائه می‌شود و نتایج به دست آمده با روش آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. سپس با پیدا کردن مدل مناسب عددی برای ایزولاتور، این مدل تحت تحریک با دامنه بالاتری قرار می‌گیرد.



شکل 5 مقایسه میزان اوج شتاب برای تعداد المانهای متفاوت مورد استفاده در تحلیل ایزولاتور الاستومری



شکل 6 مقایسه اوج شتاب خروجی محاسبه شده با تعداد شکل مد مختلف در تحلیل ایزولاتور الاستومری

علت استفاده از مواد الاستومری در ایزولاتور کاهش میزان شتاب اعمالی به تجهیزات متصل به ایزولاتور است اما همان گونه که در نتایج تحلیل عددی مشاهده شد میزان حداکثر شتاب اندازه گیری شده در انتهای آزاد ایزولاتور از میزان حداکثر شتاب نتایج آزمایشگاهی بیشتر است. علت اصلی افزایش دامنه‌ی شتاب انعکاس پیاپی امواج در ایزولاتور از سطوح تکیه‌گاهی است و در صورتی که اثر میرایی در نظر گرفته نشود دامنه شتاب افزایش چشمگیری در مقایسه با نتایج واقعی دارد.

اکنون سعی می‌شود تا با انتخاب ضریب میرایی مناسب بر اساس خواص مواد الاستومری، مدل مناسبی، از پاسخ واقعی ایزولاتور تحت اثر بار ضربه به دست آورد تا نتایج دقیقی از لحاظ حداکثر مقدار شتاب و نحوه تغییرات شتاب نسبت به زمان مطابق با نتایج آزمایشگاهی به دست آید.

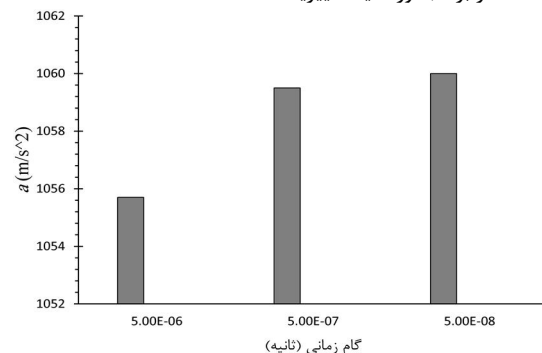
تاریخچه‌ی تغییرات شتاب محوری انتهای ایزولاتور با انتخاب نسبت میرایی برابر با 0/05 در شکل 7 نشان داده شده است که این ضریب بر اساس خواص مواد الاستومری رایج انتخاب شده است [16]. در واقع بررسی اطلاعات ارائه شده توسط تولیدکنندگان ایزولاتورهای الاستومری [16، 17، 18، 19] نشان داده است با دقت مناسبی می‌توان ضریب میرایی یکسانی برای کلیه شکل‌مدها در نظر گرفت که محدوده‌ی تغییرات این ضرایب میرایی 0/03 الی 0/1 بیان شده است. لذا در این تحقیق با بررسی پاسخ عددی ایزولاتور و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی مقدار ضریب میرایی یکسان 0/05 برای کلیه شکل‌مدهای ایزولاتور الاستومری در نظر گرفته شده است.

شتاب محاسبه شده با تحلیل عددی از لحاظ قدر مطلق برابر با 714/80 متر بر مجذور ثانیه و حداکثر شتاب نتایج آزمایشگاهی 692/19 متر بر مجذور ثانیه است که خطای نسبی نتایج عددی نسبت به آزمایشگاهی 3/27 درصد است و تاریخچه تغییرات شتاب محاسبه شده تطابق بسیار مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. شکل 8 نمودار طیف پاسخ شوک برای تحریک ضربه

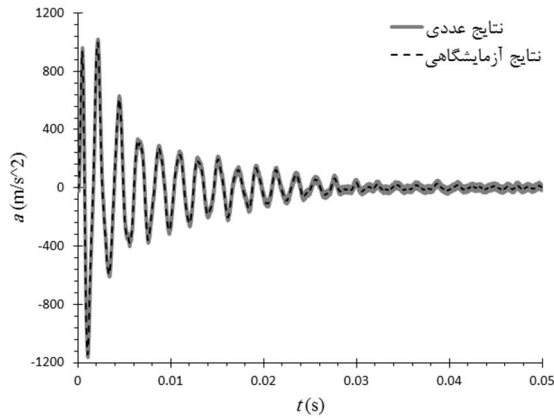
تعداد المان، نمو زمانی انتگرال گیری معادله دیفرانسیل بقای اندازه حرکت خطی و تعداد مدهای در نظر گرفته شده برای دستیابی به نتایج همگرا علاوه بر اثر میرایی در بخش بعد بررسی می‌شود سپس با یافتن مدل همگرا شده تحریک در راستای محوری مربوط به نتایج حاصل از تحریک پایه ایزولاتور با زاویه ضربه‌زن 60 درجه به تکیه‌گاه میله اعمال می‌شود و نتایج حاصل از آن با روش آزمایشگاهی صحت‌سنجی می‌شود.

## 5- بحث و بررسی

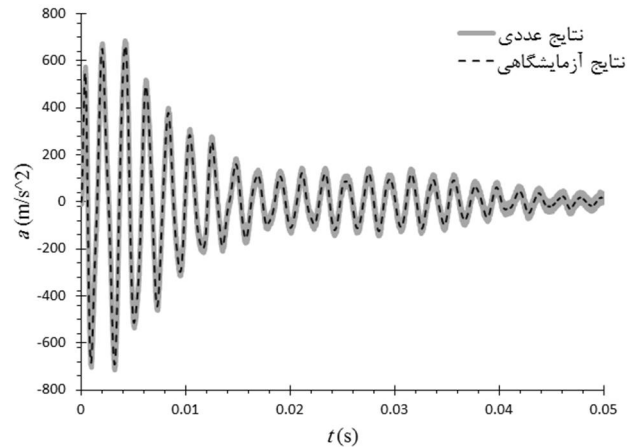
به منظور اطمینان از دقت نتایج تحلیل عددی نمو زمانی انتگرال گیری معادله ی حرکت برای دستیابی به نتایج همگرا بررسی می‌شود. مقدار نمو زمانی به میزان 10 و 100 برابر کاهش داده می‌شود و پاسخ دینامیکی ایزولاتور با انتخاب گام‌های زمانی 0/5 و 0/05 میکروثانیه تعیین می‌گردد در این بخش تعداد 180 شکل مد و المان برای تحلیل انتخاب شده است. میزان حداکثر شتاب محاسبه شده در انتهای آزاد ایزولاتور برای مقایسه نتایج حاصل از تغییر نمو زمانی در شکل 4 نشان داده شده است به طوری که این مقدار حداکثر شتاب در انتهای آزاد ایزولاتور از تغییر گام زمانی از مقدار 5 میکروثانیه به 0/5 میکروثانیه تغییر زیادی دارد ولی کاهش بیشتر گام زمانی اثر بسیار ناچیزی بر حداکثر شتاب دارد و مقدار گام زمانی 0/5 میکروثانیه برای تحلیل مناسب است. تعداد المان عامل دیگری است که بر دقت نتایج مؤثر است و تعداد آن از 180 به 360، 900، 1800 و 3600 المان افزایش داده می‌شود. شکل 5 حداکثر شتاب محوری انتهای آزاد محاسبه شده متناظر با هر المان بندی را نشان می‌دهد در صورتی که گام زمانی برابر با 0/5 میکروثانیه و تعداد 180 شکل مد برای این تحلیل انتخاب شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود مقدار حداکثر شتاب در انتهای آزاد میله با افزایش تعداد المان از مقدار 900 به مقدار 1800 تغییر زیادی دارد اما افزایش بیشتر تعداد المان اثر بسیار ناچیزی بر حداکثر شتاب دارد لذا تعداد المان مطلوب برابر با 1800 انتخاب می‌شود. نتایج تحلیل برای تعیین تعداد مدهای مناسب برای تحلیل پاسخ ضربه با 180 شکل مد با نتایج به دست آمده از تعداد 360 و در نهایت 720 شکل مد با یکدیگر مقایسه می‌شوند. از مقایسه نتایج حداکثر شتاب محاسبه شده در انتهای ایزولاتور مطابق با شکل 6 نتیجه می‌شود تعداد شکل مد برابر با 360 منجر به همگرایی نتایج می‌شود. با مقایسه نتایج عددی حاصل از 360 شکل مد، گام زمانی 0/5 میکروثانیه و تعداد المان 1800 با تحلیل اولیه که در آن تعداد شکل مد 180 عدد، گام زمانی 5 میکروثانیه و تعداد المان 180 عدد بوده است مشخص می‌گردد که میزان اوج شتاب در انتهای آزاد ایزولاتور از لحاظ قدر مطلق از 1059/55 متر بر مجذور ثانیه به 1206/75 متر بر مجذور ثانیه تغییر یافته است.



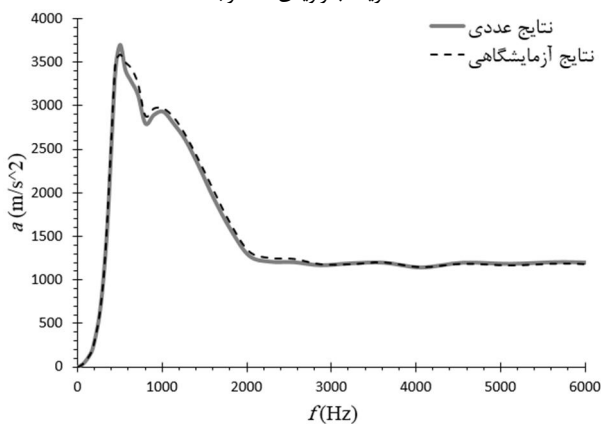
شکل 4 نمودار میله‌ای مقایسه میزان اوج شتاب برای گام‌های زمانی متفاوت در تحلیل ایزولاتور الاستومری



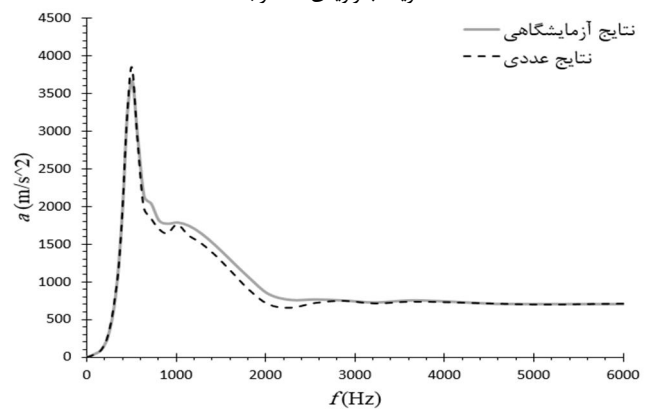
شکل 9 مقادیر شتاب محاسبه شده از تحلیل عددی بر حسب زمان با لحاظ نمودن اثر میرایی و همچنین مقایسه نتایج عددی با مقادیر آزمایشگاهی برای ایزولاتور تحت تحریک با زاویه 60 درجه



شکل 7 مقادیر شتاب محاسبه شده از تحلیل عددی بر حسب زمان با لحاظ نمودن اثر میرایی و همچنین مقایسه نتایج عددی با مقادیر آزمایشگاهی برای ایزولاتور تحت تحریک با زاویه 30 درجه



شکل 10 مقایسه طیف پاسخ شوک نتایج عددی و آزمایشگاهی برای ایزولاتور تحت تحریک با زاویه 60 درجه



شکل 8 مقایسه طیف پاسخ شوک نتایج عددی و آزمایشگاهی برای ایزولاتور تحت تحریک با زاویه 30 درجه

مشاهده می‌گردند. در واقع بر مبنای شکل 10 علاوه بر فرکانس 507/97 که شتاب دارای مقدار بیشینه است یک مقدار بیشینه شتاب در فرکانس 1015 هرتز مشاهده می‌شود که با بررسی فرکانس طبیعی ایزولاتور مشخص می‌گردد که این فرکانس نیز در همسایگی فرکانس طبیعی‌های ایزولاتور قرار دارد.

به منظور مقایسه عملکرد مدل ارائه شده در این تحقیق با مدل یک درجه آزادی ایزولاتور، رفتار ایزولاتور و جرم‌های متصل به آن با یک مجموعه جرم-فنر و میراکننده یک درجه آزادی شبیه‌سازی می‌گردد که معادله دیفرانسیل حاکم بر حرکت جرم آن با استفاده از روش عددی نیومارک<sup>1</sup> [13] و اعمال شرط مرزی مربوط به شتاب پایه حل می‌شود و تاریخچه شتاب در خروجی با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه می‌گردد. معادله دیفرانسیل حاکم بر حرکت جرم مدل یک درجه آزادی بصورت رابطه (11) بیان می‌شود:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{y} \quad (11)$$

که  $x$  و  $y$  به ترتیب جابه‌جایی جرم و پایه،  $k$  سفتی معادل،  $c$  ضریب میرایی و  $m_{\text{eff}}$  جرم مؤثر است. مقدار سفتی با استفاده از آزمایش فشار تک محوره و از شیب نمودار نیرو - جابه‌جایی برابر با 5 مگانیوتن بر متر تعیین می‌گردد. مقدار جرم مؤثر ایزولاتور با توجه به شرط مرزی مقید بودن حرکت یک انتهای آن بدین صورت تعیین می‌گردد [20]:

$$m_{\text{eff}} = 0.2235 \rho \cdot A \cdot L \quad (12)$$

با زاویه 30 درجه در فرکانس‌های مختلف را نشان می‌دهد که این مقادیر در حوزه فرکانس نیز با نتایج آزمایشگاهی تطابق بسیار مناسبی دارند. مدل اجزای محدود با توجه به مقادیر بهینه به دست آمده برای متغیرهای آن برای تعیین پاسخ ضربه‌ای ایزولاتور استفاده می‌شود که به پایه‌ی آن شتاب حاصل از ضربه راهسازی آونگ در زاویه 60 درجه اعمال می‌شود. تاریخچه - ی شتاب محوری خروجی ایزولاتور در شکل 9 نشان داده شده است که بیشینه شتاب نتایج عددی از لحاظ قدر مطلق برابر با 1170/57 متر بر مجذور ثانیه است و بیشینه شتاب نتایج آزمایشگاهی برابر با 1146/61 متر بر مجذور ثانیه است و خطای نسبی نتایج عددی برابر با 2/10 درصد می‌گردد. شکل 10 نمودار طیف پاسخ شوک سازه را نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین پاسخ عددی و آزمایشگاهی دیده می‌شود.

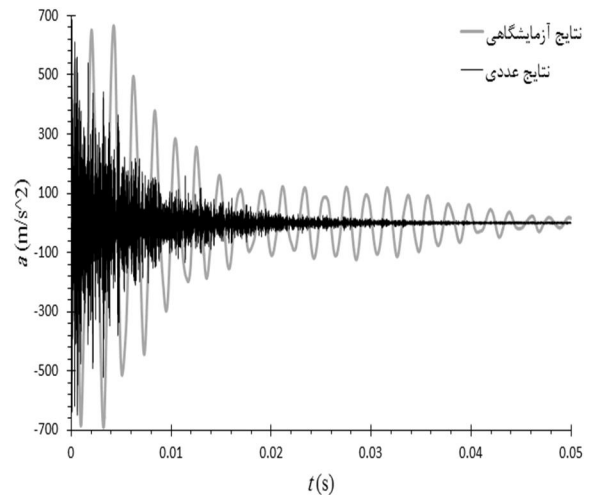
نمودار طیف پاسخ شوک به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و عددی مستقل از شدت امواج ورودی و برای زاویه برخورد 30 و 60 درجه آونگ دارای مقدار حداکثر در فرکانس 507/97 هرتز است که مقدار آن با فرکانس طبیعی اول ایزولاتور برابر است. بنابراین از تحلیل طیف پاسخ شوک ایزولاتور تحت اثر بارگذاری ضربه با دقت مناسبی می‌توان فرکانس طبیعی آن را تعیین نمود. از آنجاکه سطح شتاب در فرکانس طبیعی ایزولاتور به بیشترین مقدار می‌رسد بنابراین فرکانس طبیعی اجزای متصل به ایزولاتور باید بالاتر از فرکانس طبیعی ایزولاتور باشد تا از تخریب اجزای متصل به آن در اثر ضربه اعمالی به پایه ایزولاتور جلوگیری شود. همچنین با افزایش سطح تحریک در نمودار طیف پاسخ شوک تعداد بیش‌تری از فرکانس طبیعی‌های ایزولاتور قابل

1- Newmark

ایزولاتور الاستومری را در حوزه زمان تعیین می‌نماید و با مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی می‌توان نمودار طیف پاسخ شوک در خروجی را با دقت مناسبی در محدوده‌ی وسیع فرکانسی تعیین کرد. اثر متغیرهای مختلف در مدل‌سازی پاسخ ضربه ایزولاتورها در این تحقیق ارزیابی شده است و مقادیر بهینه‌ی متغیرهایی مانند اندازه المان، نمو زمانی انتگرال‌گیری و تعداد شکل مدهای مؤثر در پاسخ ایزولاتور با استفاده از مدل ارائه‌شده تعیین می‌گردند. نحوه‌ی تغییرات نمودار طیف پاسخ شوک به‌دست‌آمده با این مدل نشان می‌دهد مقادیر ماکزیمم نسبی در این نمودار برای تعیین فرکانس‌های طبیعی ایزولاتور قابل استفاده است و این نمودار فرکانس غالب در خروجی را به‌خوبی نشان می‌دهد. نمودار طیف پاسخ شوک با دقت مناسبی احتمال تخریب در مجموعه‌های متصل به ایزولاتور بر اساس فرکانس طبیعی آن‌ها و میزان سطح شتاب انتقالی به آن‌ها را ارزیابی می‌نماید.

## 7-مراجع

- [1] L. J. Ryul, Ch. C. Chia, Review of pyroshock wave measurement and simulation for space systems, Measurement, no.45, pp.631-642, 2012.
- [2] R. A. Ibrahim, Recent advances in nonlinear passive vibration isolators. Journal of Sound and Vibration, no. 314, pp.371-452, 2008.
- [3] M. Tahaye Abadi, M. Alizadeh, M. A. Farsi, M. Ebrahimi, Wave propagation experimental analysis of space probe, Journal of Space Sciences and Technology, 2014. (In Persian)
- [4] A. J. L. Harrison, Nonlinear dynamic modeling of rubber isolators using six parameters based on parabolic spring, springpot and smooth-slip friction element, Polymer Testing, no. 29, pp. 857-865, 2010.
- [5] R. Sharp, Ballistic Shock attenuation for armored ground vehicle electronics analysis and validation, Proceeding of the Shock and Vibration Symposium, no.64, pp. 237-246, 2010.
- [6] Z. Xiao, X. Jing, L. Cheng, The transmissibility of vibration isolators with cubic nonlinear damping under both force and base excitations, Journal of Sound and Vibration, No.332, pp. 1335-1354, 2013.
- [7] G. S. Dutta, C. Venkatesan, Analytical and empirical modeling of multilayered elastomeric isolators from damping experiments, Journal of Sound and Vibration, no.332, pp.6913-6923, 2013.
- [8] P. Angeli, G. Russo, A. Paschini, Carbon fiber-reinforced rectangular isolators with compressible elastomer: Analytical solution for compression and bending, International. Journal of Solids and Structures, no. 50, pp. 3519-3527, 2013.
- [9] P. Bastia, T. Demerville, Original elastomeric damper for the expert reentry vehicle, in The 14th European Space Mechanisms & Tribology Symposium, Constance, Germany, 2011.
- [10] ABAQUS User's manual. 2001a. Version 6.2. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. USA.
- [11] R. R. Craig, A. J. Kurdila, Fundamentals of Structural Dynamics, Second Edition, New York: Wiley, 2006.
- [12] R. W. Clough, J. Penzien, Dynamics of Structures, Third Edition, California: Computers & Structures, 2003.
- [13] D. Logan, A First Course in The Finite Element method, Fourth Edition, Madison: Thomson, 2007.
- [14] J. N. Reddy, An Introduction to The Finite Element method, Second Edition, New York: McGraw-Hill, 1993.
- [15] R. Brown, Physical testing of Rubber, Fourth Edition, New York: Springer, 2006.
- [16] Vibration and shock isolation products, Accessed 14 November 2014; <http://www.Novibes.com/Resources/Product-Catalog>.
- [17] T. T. Soong, M. C. Constantinou, Passive and Active Structural Vibration control in civil engineering, New York: Springer, 1994.
- [18] T. Andersen, A. Enwark, Integrated modeling of Telescopes, New York: Springer, 2011.
- [19] C. W. Desilva, Vibration and shock handbook, US: Taylor&Francis, 2005.
- [20] T. Irvine, Application Newton Raphson method to vibration problems, First Edition, New York: Vibration data, 2010.



شکل 11 مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ناشی از رهاسازی وزنه دو کیلوگرمی در زاویه‌ی 30 درجه با نتایج عددی مدل یک درجه آزادی

که  $\rho$  چگالی،  $L$  طول و  $A$  سطح مقطع متوسط ایزولاتور می‌باشد. جرم مؤثر براساس خواص ایزولاتور برابر با 184/0 گرم تعیین می‌گردد. ضریب میرایی مدل یک درجه آزادی طوری تعیین می‌گردد که حداکثر شتاب خروجی حداقل خطا نسبت به نتایج آزمایشگاهی داشته باشد. شکل 11 پاسخ سیستم یک درجه آزادی به همراه نتایج آزمایشگاهی ناشی از رهاسازی آونگ با زاویه 30 درجه را نشان می‌دهد که مقدار حداکثر شتاب پایه از 2566/62 متر بر مجذور ثانیه در ورودی به 684/48 متر بر مجذور ثانیه در خروجی می‌رسد. اگرچه شتاب اولیه در خروجی ایزولاتور با دقت مناسبی با مقدار آزمایشگاهی مطابقت دارد ولی تفاوت زیادی بین پاسخ عددی مدل یک درجه آزادی و نتایج آزمایشگاهی در زمان‌های مختلف وجود دارد زیرا تعدادی از شکل مدهای مؤثر بر پاسخ ایزولاتور در مدل یک درجه آزادی در نظر گرفته نمی‌شود. از طرف دیگر، مدل یک درجه آزادی برخلاف مدل ارائه‌شده در این مقاله، اثرات افزایش نسبی دامنه‌ی شتاب در اثر انعکاس امواج از تکیه‌گاه ایزولاتور را شبیه‌سازی نمی‌نماید. بنابراین مدل یک درجه آزادی توانایی لازم برای شبیه‌سازی پاسخ به ضربه‌ی ایزولاتور را ندارد و با این مدل فقط می‌توان برآورد اولیه‌ای از حداکثر شتاب خروجی ایزولاتور را ناشی از ضربه به پایه آن بدست آورد.

## 6- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی برای تحلیل پاسخ ایزولاتورهای الاستومری ارائه شده است که پاسخ به تحریک از پایه در دامنه‌ی شتاب بالا با محتوای فرکانسی وسیع را با دقت مناسبی مدل‌سازی می‌نماید و با در نظر گرفتن شکل‌مدهای مؤثر بر پاسخ به ضربه در مدت زمان کم و فرکانس بالا، نتایج دقیقی نسبت به مدل‌های پیشین یک درجه آزادی بدست می‌آورد. آزمایش ضربه به تیر رزونانسی در این تحقیق روشی مناسبی برای تعیین نسبت انتقال ایزولاتور متصل به آن ارائه می‌کند. مدل ارائه‌شده میزان افت شتاب با توجه به میرایی