



بررسی تئوری و پارامتریک عملکرد میراگر ضربه‌ای قطر متغیر در ارتعاشات آزاد سیستم یک درجه آزادی

حسین صفایی فر^۱ و انوشیروان فرشیدیان فر^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵

چکیده

میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی، نوعی از میراگر ضربه‌ای است که جرم‌های ضربه‌ای به صورت یک زنجیره در امتداد یک خط راست قرار می‌گیرند. این میراگر یکی از انواع میراگرهای ضربه‌ای چند جرمی است که عملکرد آن از عملکرد میراگر ضربه‌ای تک جرمی بهتر است. پژوهش‌های انجام شده در خصوص عملکرد میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی، تاکنون عمدتاً به صورت عددی و آزمایشگاهی بوده است. علاوه بر این تاکنون در خصوص نوع چیدمان جرم‌ها در این میراگر پژوهشی انجام نشده است. در این مقاله بررسی تحلیلی عملکرد میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی صلب در تحلیل ارتعاشات آزاد یک سیستم یک درجه آزادی به صورت پارامتریک انجام شده است. به این منظور، اثر پارامترهایی چون، تعداد جرم، نسبت جرمی، فاصله خالی، ضریب بازگشت و نوع چیدمان جرم‌ها بر عملکرد میراگر مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی اثر چیدمان جرم‌ها، دو نوع میراگر ضربه‌ای سه جرمی و پنج جرمی در نظر گرفته شده است. چیدمان‌های مورد بررسی به صورت چیدمان یکنواخت، هشتی، خطی و لوزی است. پس از بررسی مشخص شده است که کارایی چیدمان لوزی از دیگر چیدمان‌ها بهتر است.

کلمات کلیدی: مطالعه پارامتریک؛ میراگر ضربه‌ای؛ زنجیره ذرات خطی قطر متغیر؛ چیدمان هشتی؛ چیدمان لوزی.

Theoretically and Parametrically Investigation on Operation of Variable Diameter Impact Damper in Free Vibrations of a 1-DOF System

H. Safaeifar¹, A. Farshidianfar^{2,*}

¹ PhD Student, Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Professor, Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

Linear particle chain impact damper (LPCID) is a kind of impact dampers that the impact masses are placed in a chain along the straight line. This damper is one of a kind of multi-mass impact damper whose performance is superior to single-mass impact dampers. Researches on the performance of the linear-particle chain impact damper have been numerically and laboratorial conducted so far. In addition, no research has ever been done on the type of mass layout at this demurrage. In this paper, an analytical analysis of the performance of the rigid LPCID in free vibrations of a 1-DOF system is carried out parametrically. In this regard, the effect of parameters such as mass number, mass ratio, distance gap, restitution coefficient and type of mass layout on the damper function have been investigated. In order to investigate the effect of mass layout, two types Impact Damper, three-mass and five-mass, are considered. The layouts are uniform, eight, linear, and diamond. After review, it has been determined that the efficiency of diamond layout is better than other layouts.

Keywords: Parametric Study; Impact Damper; Variable Diameter Linear Particle Chain (VDLPC); Eight Layout; Diamond Layout.

۱- مقدمه

روش‌های کنترل ارتعاشات سیستم‌های دینامیکی، به چهار دسته فعال، نیمه‌فعال، غیرفعال و ترکیبی تقسیم می‌شود. روش‌های کنترل غیرفعال برای حفظ عملکرد سازه‌ها در برابر حوادث طبیعی با موفقیت، مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱].

میراگر ضربه‌ای یکی از انواع روش‌های کنترل غیر فعال ارتعاشات است. پژوهش‌های آزمایشگاهی و تئوری نشان داده است که این گروه از میراگرهای غیرخطی در مقایسه با خنثی کننده‌های ارتعاشی خطی، عملکرد بهتری در کاهش نوسانات سازه‌ها دارند [۲-۴].

میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی، یک محفظه حاوی چند جرم کمکی است که این جرم‌ها در راستای یک خط راست قرار دارند. وقتی سازه اصلی ارتعاش می‌کند، به خاطر برخورد بین جرم‌های کمکی و محفظه و برخورد بین جرم‌های کمکی، انرژی جنبشی سیستم اصلی به جرم‌های کمکی منتقل می‌شود؛ در نتیجه انرژی جنبشی سیستم اصلی کاهش می‌یابد؛ بنابراین جرم‌های کمکی به عنوان کاهنده ارتعاش سیستم اصلی عمل می‌کنند و به این دلیل، این میراگر، میراگر ضربه‌ای نامیده می‌شود. به منظور افزایش کارایی، میراگر ضربه‌ای در مکان دارای بیشترین دامنه در حرکت ارتعاشی یک سازه نصب می‌شود.

پژوهش‌های انجام شده در خصوص میراگرهای ضربه‌ای، ابتدا در مورد نوع تک جرمی آن شروع شده است و سپس در خصوص نوع چند جرمی ادامه پیدا کرده است. در سال‌های اخیر نیز میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی، مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت مهمترین پژوهش‌های انجام شده در خصوص میراگر ضربه‌ای تک جرمی و میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی، به طور مختصر معرفی می‌شود.

میراگر ضربه‌ای تک جرمی، اولین بار توسط مسری در سال ۱۹۶۵ به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی، مورد بررسی قرار گرفت [۵]. در این پژوهش مشخص شد که با تنظیم پارامترها، میراگر ضربه‌ای می‌تواند به صورت قابل ملاحظه‌ای، دامنه پاسخ سیستم را در تحریک‌های سینوسی، اتفاقی و شوک کاهش دهد. عملکرد میراگر ضربه‌ای چند واحدی در ارتعاشات آزاد یک سیستم یک درجه آزادی، توسط مسری در

سال ۱۹۶۹ بررسی شده است [۶]. نتیجه این پژوهش این بود که اثر میراگر چند واحدی در کاهش دامنه ارتعاشات از اثر میراگر تک واحدی معادل خیلی بیشتر است. استفاده از میراگر ضربه‌ای در پاسخ پایدار ارتعاشات سیستم چند درجه آزادی، توسط مسری در سال ۱۹۷۳ مطالعه شد [۷]. در این پژوهش مشخص شد که میراگر ضربه‌ای، یک عامل موثر در کاهش ارتعاشات سیستم‌های چند درجه آزادی نظیر ساختمان‌های بلند است.

میراگر ضربه‌ای در سال ۱۹۸۵، توسط بابت و سانکر در ارتعاشات آزاد و اجباری یک سیستم یک درجه آزادی مورد استفاده قرار گرفت [۸]. در این پژوهش فاصله خالی بهینه برای بهبود عملکرد میراگر مشخص شد. در سال ۱۹۹۴ یک مطالعه اساسی در مورد میراگر ضربه‌ای تک جرمی توسط ایما و ماروی انجام شده است [۹]. در این پژوهش، میرایی بهینه حاصل از میراگر ضربه‌ای با تنظیم نسبت جرمی و فاصله خالی مشخص شده است. افشارفرد و کلاهان، رفتار میراگر ضربه‌ای تک جرمی را در سال ۲۰۱۳ بر اساس قابلیت اطمینان مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۰]. در این پژوهش تغییرات میرایی میراگر ضربه‌ای و قابلیت اطمینان سیستم نسبت به ضریب بازگشت بدست آمده است.

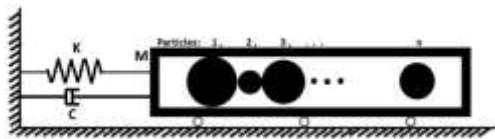
زنجیره ذرات خطی اولین بار در سال ۲۰۱۱ توسط غریب و همکارانش، به عنوان جاذب شوک معرفی شده است [۱۱]. در این پژوهش مشخص شده است که استفاده از جرم‌های کوچک بین جرم‌های بزرگ در زنجیره ذرات خطی، باعث بهبود کارایی این زنجیره در کاهش دامنه ارتعاشات ناشی از شوک می‌شود. استفاده از زنجیره ذرات خطی در ارتعاشات آزاد یک سیستم یک درجه آزادی، توسط غریب و غنی در سال ۲۰۱۳ انجام شد [۱۲]. در این پژوهش مشخص شد که استفاده از میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی در مقایسه با میراگر ضربه‌ای تک جرمی در کاهش دامنه ارتعاشات موثرتر است.

بررسی عملکرد میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی به منظور کنترل ارتعاشات ناشی از شوک در یک سازه یک درجه آزادی در سال ۲۰۱۵، توسط غریب و کرکوب به صورت تجربی انجام شده است [۱۳]. در این پژوهش اثر پارامترهایی نظیر، فاصله خالی، نسبت جرمی و طول زنجیره در عملکرد میراگر ضربه‌ای بررسی شده است. بررسی تجربی

در نظر گرفتن چیدمان خطی و لوزی برای جرم‌های میراگر است.

۲- مدل سازی ریاضی

مدل در نظر گرفته شده برای بررسی حرکت ارتعاشی یک سیستم یک درجه آزادی به همراه میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی صلب به صورت شکل ۱ است.



شکل ۱- مدل ساده شده

معادله حرکت ارتعاشات آزاد سیستم اصلی و جرم‌های کمکی وقتی برخوردی بین سیستم اصلی و جرم‌های کمکی وجود ندارد، به ترتیب به صورت روابط ۱ و ۲ است [۱۷].

$$M\ddot{x}_M + C\dot{x}_M + Kx_M = 0 \quad (1)$$

$$m_j\ddot{x}_j = 0, \quad j = 1:n \quad (2)$$

که در این روابط M ، C و K به ترتیب جرم، میرایی و سختی سیستم اصلی و m_j نیز جرم هر کدام از جرم‌های کمکی است. n نیز بیانگر تعداد جرم‌های کمکی است. x_M پاسخ زمانی سیستم اصلی است و x_j نیز، پاسخ زمانی هر کدام از جرم‌های کمکی است. موقعیت میانی محفظه در حالت اولیه به عنوان مبدا دستگاه مختصات انتخاب شده است. پاسخ این معادلات به صورت روابط ۳ و ۴ است.

$$x_M(t) = e^{-\xi\omega_n t} (x_{0M} \cos(\omega_d (t - t_0)) + \frac{V_{0M} + \xi \omega_n x_{0M}}{\omega_d} \sin(\omega_d (t - t_0))) \quad (3)$$

$$x_j(t) = V_{0j}(t - t_0) + x_0 \quad (4)$$

پارامترهای موجود در این روابط که به صورت $\omega_n = \sqrt{K/M}$ و $\omega_d = (\sqrt{1 - \xi^2}) \omega_n$ ، $\xi = C/(2\sqrt{KM})$ تعریف می‌شود، به ترتیب نسبت میرایی، فرکانس طبیعی نامیرا و فرکانس طبیعی میرا در سیستم اصلی است. t_0 در رابطه ۳ زمان برخورد بین جرم‌های کمکی با دیواره سمت چپ یا سمت راست محفظه و در رابطه ۴، زمان برخورد بین جرم‌های کمکی با دیواره سمت چپ یا سمت راست محفظه

میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی در ارتعاشات آزاد توسط غریب و همکارانش در سال ۲۰۱۶ انجام شد [۱۴]. در این پژوهش مشخص شد که پارامترهایی نظیر، نسبت جرمی، فاصله خالی میراگر و طول زنجیره در عملکرد میراگر ضربه‌ای موثر است.

نوع دیگری از پژوهش‌های انجام شده در خصوص میراگرهای ضربه‌ای، بررسی پدیده ضربه در برخورد دو گوی است که به عنوان نمونه می‌توان به پژوهش انجام شده توسط نادریپور و همکاران در سال ۲۰۱۴ اشاره نمود [۱۵]. در این پژوهش، مدل‌های مختلف محاسبه اثر ضربه بر اساس سرعت برخورد در برخورد دو گوی بررسی شده است.

یک نوع دیگر از پژوهش‌های انجام شده در این خصوص، بررسی میراگر ضربه‌ای ترکیبی است. ژنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۸، رفتار میراگر ضربه‌ای ترکیبی را مورد بررسی قرار داده اند [۱۶]. در این پژوهش، اثر میراگر ضربه‌ای سیستم ذرات ترکیب شده با جاذب دینامیکی کلاسیک در ارتعاشات عرضی یک تیر یکسر درگیر به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است.

همانطور که در بررسی پژوهش‌های پیشین مشخص شد، پژوهش‌ها در زمینه میراگرهای ضربه‌ای زنجیره خطی عمدتاً به صورت عددی و آزمایشگاهی است؛ همچنین نوع چیدمان جرم‌ها نیز در این میراگر مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف از این مقاله، مطالعه اثر پارامترهای موثر بر عملکرد میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی قطر متغیر صلب در ارتعاشات آزاد یک سیستم یک درجه آزادی به صورت تئوری و پارامتریک است. منظور از واژه صلب در این مقاله این است که زمان برخورد به اندازه کافی کوچک است؛ در نتیجه می‌توان تغییر موقعیت ذرات را از ابتدا تا انتهای برخورد صفر فرض نمود. به این منظور ابتدا مدل‌سازی ریاضی این میراگر انجام می‌شود. سپس اثر پارامترهای مختلفی چون تعداد جرم، نسبت جرمی، فاصله خالی، ضریب بازگشت و نوع چیدمان جرم‌ها بر عملکرد این میراگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت نیز نتایج بدست آمده ارائه می‌شود. نوآوری این پژوهش، بررسی تئوری اثر نوع چیدمان جرم‌ها به صورت خطی و لوزی بر عملکرد میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی است. تفاوت اساسی این پژوهش با پژوهش‌های قبلی،

با استفاده از مقادیر عددی جدول ۱، یک نمونه از پاسخ زمانی سیستم یک درجه آزادی در شکل‌های ۲ تا ۴ آورده شده است. برای مشاهده بهتر برخوردهای جرم میراگر با دیواره‌های سمت راست و چپ در سیستم اصلی، قسمتی از شکل ۲ بزرگنمایی شده است.

جدول ۱- مقادیر عددی استفاده شده برای ارزیابی میراگر ضربه‌ای تک‌جرمی

مقدار	عنوان پارامتر
281.25 gr	جرم سیستم اصلی
1026.39 N/m	سختی سیستم اصلی
0.1359 N.s/m	میرایی سیستم اصلی
11.90 gr	جرم میراگر
0.4	ضریب بازگشت
9.5 mm	فاصله خالی
12.7 mm	موقعیت اولیه سیستم
0 mm/s	سرعت اولیه سیستم

جدول ۲- مقادیر عددی استفاده شده برای ارزیابی میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی (سه‌جرمی)

مقدار	عنوان پارامتر
1.35 kg	جرم سیستم اصلی
865 N/m	سختی سیستم اصلی
1.092 N.s/m	میرایی سیستم اصلی
0.11-0.011-0.11 kg	جرم‌های میراگر
0.9	ضریب بازگشت
30 mm	فاصله خالی
18.5 mm	موقعیت اولیه سیستم
0 mm/s	سرعت اولیه سیستم

یا زمان برخورد جرم‌های کمکی با یکدیگر است. شرط برخورد جرم‌های کمکی با دیواره سمت چپ، با یکدیگر یا با دیواره سمت راست به ترتیب به صورت روابط ۵ تا ۷ است که d فاصله خالی میراگر ضربه‌ای است.

$$x_1 - (x_M - d/2) = 0 \quad (5)$$

$$x_{j+1} - x_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (6)$$

$$(x_M + d/2) - x_n = 0 \quad (7)$$

با فرض برخورد صلب و زمان برخورد خیلی کوچک، هنگام برخورد بین دو جسم، موقعیت دو جسم ثابت می‌ماند، ولی سرعت آنها تغییر می‌کند که سرعت‌های جدید طبق روابط حاصل از بقای مومنتوم خطی و ضریب بازگشت برخورد، در برخورد دو جرم با جرم‌های m_1 و m_2 به ترتیب به صورت روابط ۸-الف و ۸-ب محاسبه می‌شود [۱۸].

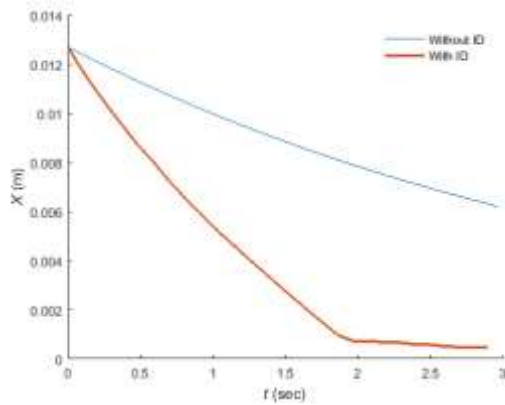
$$V_1' = \frac{(1 - \mu e)V_1 + \mu(1 + e)V_2}{1 + \mu} \quad (8\text{-الف})$$

$$V_2' = \frac{(1 + e)V_1 + (\mu - e)V_2}{1 + \mu} \quad (8\text{-ب})$$

$e = m_2/m_1 = \mu$ به ترتیب ضریب بازگشت و نسبت جرمی در برخورد مستقیم دو جرم و V_1 و V_2 نیز سرعت‌های دو جرم قبل از برخورد است.

برای تحلیل معادلات حرکت، یک برنامه در نرم افزار متلب نوشته شده است. ابتدا با استفاده از شرایط اولیه داده شده، موقعیت هر کدام از جرم‌های کمکی و دیواره‌های سمت چپ و راست محفظه طبق روابط ۳ و ۴ و به کمک این برنامه محاسبه می‌شود. سپس در هر لحظه شرط برخورد طبق روابط ۵ تا ۷ بررسی می‌شود. هر زمانی برخورد اتفاق افتاد، سرعت‌های جدید طبق رابطه ۸ محاسبه می‌شود. این کار به صورت مداوم تا انتهای زمان مورد نیاز برای حل مسئله ادامه پیدا می‌کند.

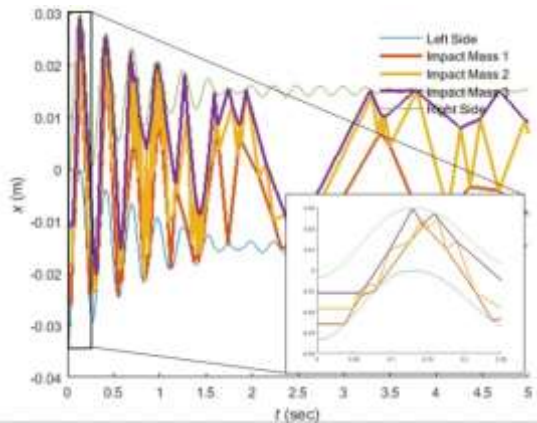
برای ارزیابی مدل، نتایج بدست آمده در حالت تک جرمی با نتایج پژوهش انجام شده توسط باپت و سانکر در سال ۱۹۸۵ [۸] و در حالت سه جرمی با پژوهش انجام شده توسط غریب و غنی در سال ۲۰۱۳ [۱۲] مقایسه می‌شود. در حالت تک جرمی، از داده‌های جدول ۱ و در حالت سه جرمی، از داده‌های جدول ۲ استفاده شده است.



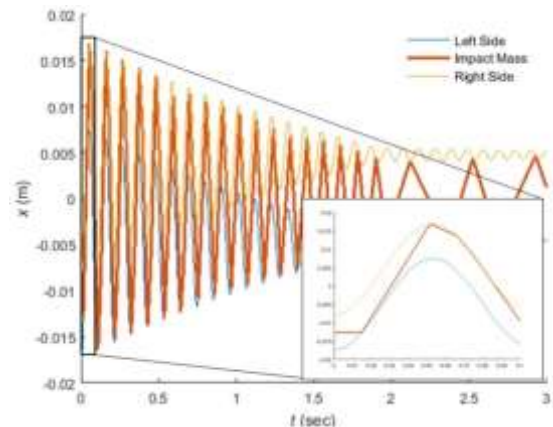
شکل ۴- دامنه ارتعاشات سیستم با و بدون میراگر ضربه‌ای تک جرمی

با استفاده از مقادیر عددی جدول ۲ یک نمونه از پاسخ زمانی سیستم یک درجه آزادی در شکل‌های ۵ تا ۷ آورده شده است. برای مشاهده برخورد های جرم میراگر با دیواره‌های سمت راست و چپ در سیستم اصلی، قسمتی از شکل ۵ بزرگنمایی شده است.

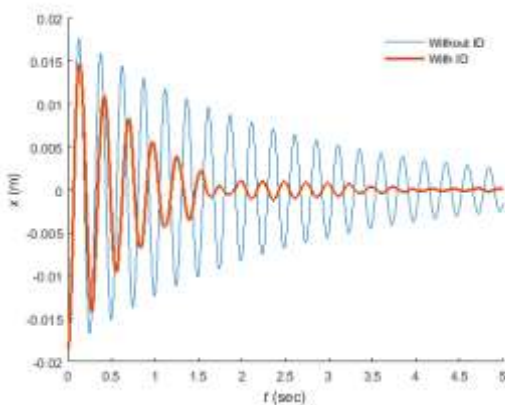
برای ارزیابی مدل، منحنی مقدار دامنه در پاسخ زمانی سیستم یک درجه آزادی با حضور میراگر ضربه‌ای تک جرمی و سه جرمی با پژوهش‌های قبلی مقایسه می‌شود. پس از استفاده از مقادیر عددی جدول‌های ۱ و ۲ در نرم افزار نوشته شده، تغییرات زمانی دامنه ارتعاشات سیستم یک درجه آزادی با میراگر ضربه‌ای تک جرمی و سه جرمی، به ترتیب مطابق شکل‌های ۸ و ۹ است.



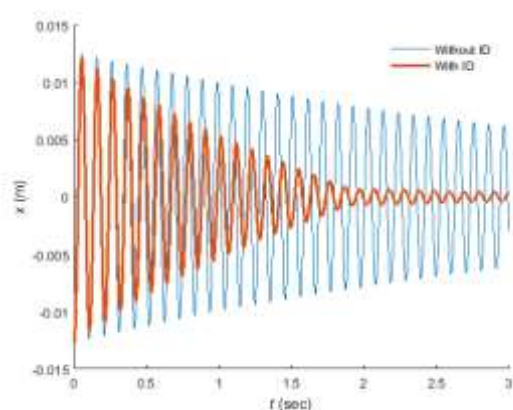
شکل ۵- پاسخ زمانی سیستم و جرم‌های میراگر در میراگر ضربه‌ای سه جرمی



شکل ۶- پاسخ زمانی سیستم و جرم میراگر در میراگر ضربه‌ای تک جرمی



شکل ۷- پاسخ زمانی سیستم با و بدون میراگر ضربه‌ای سه جرمی



شکل ۸- پاسخ زمانی سیستم با و بدون میراگر ضربه‌ای تک جرمی

همانگونه که در این شکل‌ها مشخص است، نتایج این مقاله با نتایج پژوهش‌های قبلی همخوانی کامل دارد. اکنون می‌توان مطالعه پارامتریک عملکرد میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی صلب در ارتعاشات آزاد سیستم یک درجه آزادی را انجام داد.

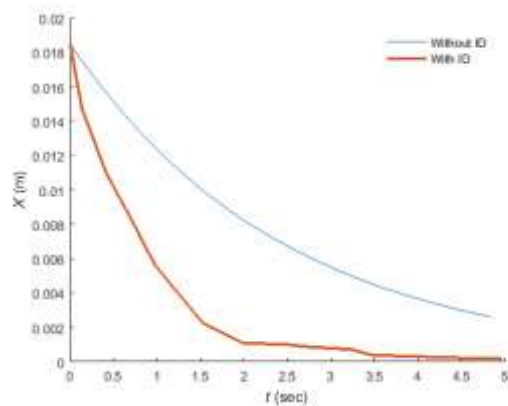
۳- اثر تعداد جرم بر عملکرد میراگر

به منظور بررسی اثر تعداد جرم بر عملکرد میراگر ضربه‌ای، جرم میراگر جدول ۳ به عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود و اثر وجود یک تا پنج جرم در میراگر بر عملکرد آن بررسی می‌شود. مقدار جرم هر کدام نیز به دو حالت فرض می‌شود؛ حالت اول این است که جرم هر کدام برابر جرم میراگر جدول ۳ باشد و حالت دوم به این صورت است که جرم میراگر جدول ۳ به مقدار مساوی بین جرم‌ها توزیع شود. به عنوان مثال در حالت چهار جرمی، جرم هر کدام برابر یک چهارم جرم میراگر جدول ۳ است.

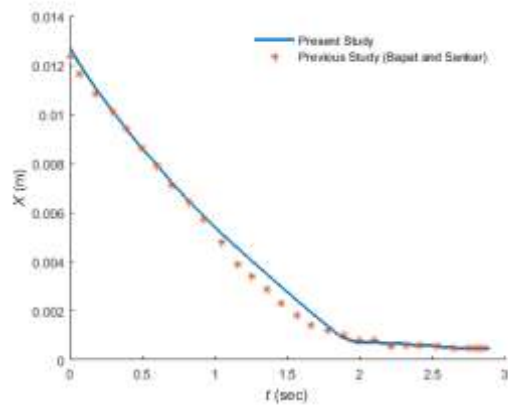
جدول ۳- مقادیر عددی استفاده شده برای مطالعه پارامتریک

مقدار	عنوان پارامتر
1.35 kg	جرم سیستم اصلی
865 N/m	سختی سیستم اصلی
1.092 N.s/m	میرایی سیستم اصلی
0.135 kg	جرم میراگر در میراگر تک‌جرمی
0.135 - 0.0135 - 0.135 kg	جرم‌های میراگر در میراگر سه‌جرمی
0.9	ضریب بازگشت
30 mm	فاصله خالی
18.5 mm	موقعیت اولیه سیستم
0 mm/s	سرعت اولیه سیستم

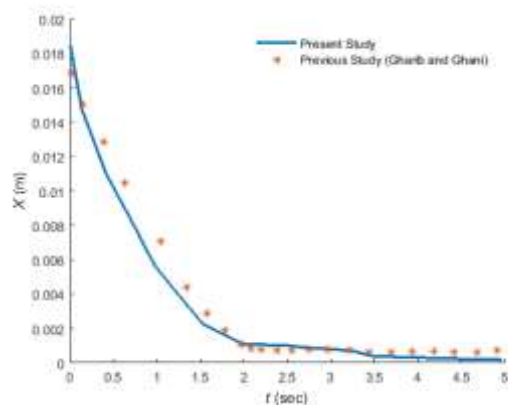
نتیجه بررسی این دو حالت در خصوص دامنه ارتعاشات سیستم یک درجه آزادی به صورت شکل‌های ۱۰ و ۱۱ است. با بررسی شکل ۱۰ مشخص است که با افزایش تعداد جرم به



شکل ۷- دامنه ارتعاشات سیستم با و بدون میراگر ضربه‌ای سه‌جرمی

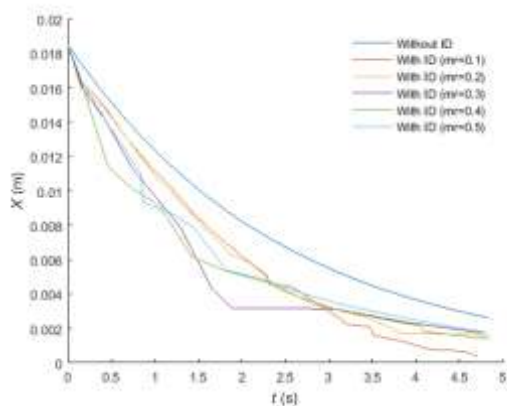


شکل ۸- ارزیابی میراگر ضربه‌ای تک‌جرمی با پژوهش بابت و سانکر [۸]

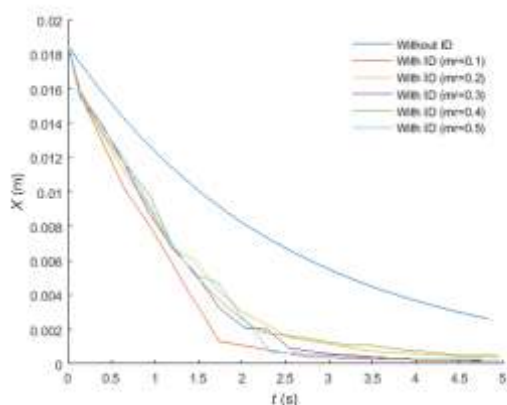


شکل ۹- ارزیابی میراگر ضربه‌ای سه‌جرمی با پژوهش غریب و غنی [۱۲]

نتیجه این بررسی‌ها در خصوص میراگر تک‌جرمی و سه‌جرمی به ترتیب مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳ است. با بررسی این شکل‌ها مشخص است که هر چه نسبت جرمی کوچکتر باشد، کارایی میراگر بهتر است.



شکل ۱۲- اثر نسبت جرمی بر دامنه حرکت با میراگر ضربه‌ای تک‌جرمی

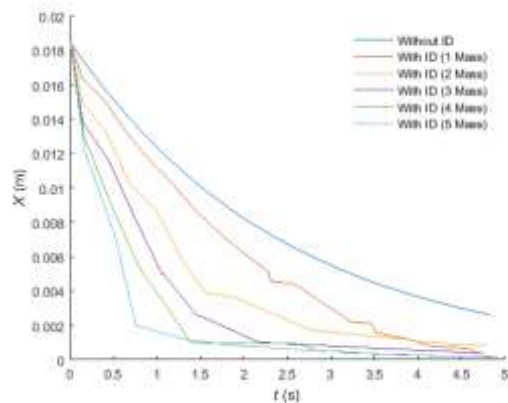


شکل ۱۳- اثر نسبت جرمی بر دامنه حرکت با میراگر ضربه‌ای سه‌جرمی

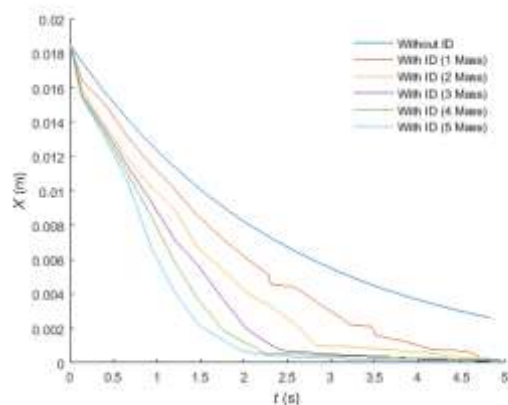
۵- اثر فاصله خالی بر عملکرد میراگر

یکی دیگر از عوامل موثر بر عملکرد میراگر ضربه‌ای، فاصله خالی است. در این قسمت اثر این عامل بر عملکرد میراگر ضربه‌ای تک‌جرمی و سه‌جرمی بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که سایر مقادیر استفاده شده، مطابق با جدول ۳ است.

میراگر، کارایی آن افزایش می‌یابد. با بررسی شکل ۱۱ مشخص است که با توزیع جرم میراگر به جرم‌های کوچکتر، کارایی آن افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰- دامنه حرکت در حالت استفاده از جرم میراگر



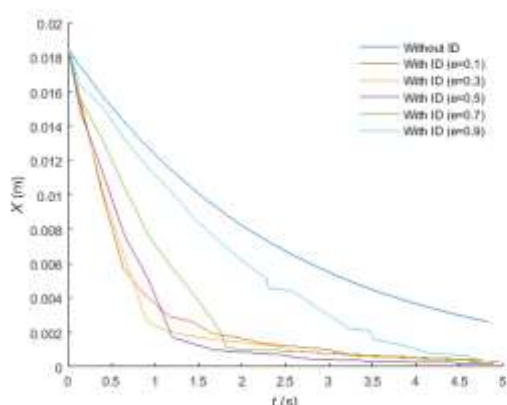
شکل ۱۱- دامنه حرکت در حالت استفاده از جرم میراگر توزیع شده

۴- اثر نسبت جرمی بر عملکرد میراگر

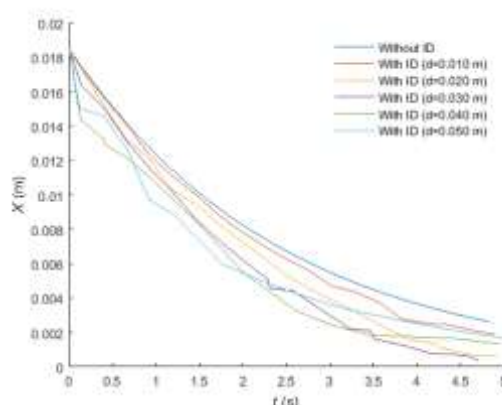
یکی از عوامل موثر بر عملکرد میراگر ضربه‌ای، نسبت جرمی است. در میراگر ضربه‌ای تک‌جرمی، نسبت جرمی به صورت جرم میراگر به جرم اصلی تعریف می‌شود. در میراگر سه‌جرمی نسبت جرمی به صورت نسبت جرم میانی به جرم‌های جانبی در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که در این صورت جرم‌های جانبی مساوی یکدیگر فرض می‌شوند و مجموع جرم‌های ضربه‌ای ثابت و برابر جرم میراگر تک‌جرمی در جدول ۳ در نظر گرفته می‌شود.

نتیجه این بررسی‌ها در خصوص میراگر تک جرمی و میراگر سه جرمی به ترتیب، مطابق شکل‌های ۱۶ و ۱۷ است. با بررسی این شکل‌ها مشخص است، ضریب بازگشت بهینه، نه خیلی کوچک و نه خیلی بزرگ است. ضریب بازگشت بهینه، ضریبی است که برخوردها در آن موثرتر باشند.

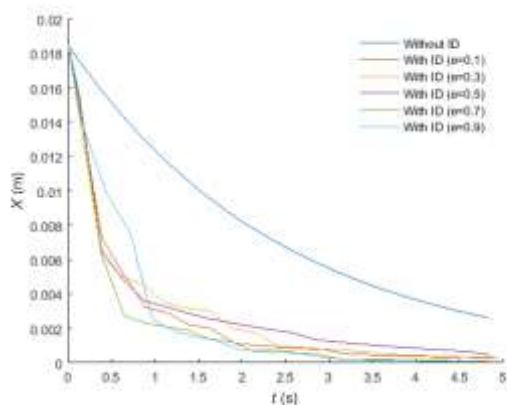
نتیجه این بررسی‌ها در خصوص میراگر تک جرمی و سه جرمی به ترتیب مطابق شکل‌های ۱۴ و ۱۵ است. با بررسی این شکل‌ها مشخص است که فاصله خالی بهینه، نه خیلی کوچک و نه خیلی بزرگ است. فاصله خالی بهینه، تعداد برخوردهای موثر بیشتری در آن اتفاق بیافتد.



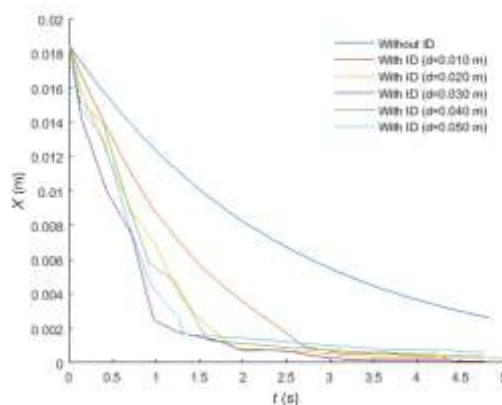
شکل ۱۶- اثر ضریب بازگشت بر دامنه حرکت با میراگر ضربه‌ای تک جرمی



شکل ۱۴- اثر فاصله خالی بر دامنه حرکت با میراگر ضربه‌ای تک جرمی



شکل ۱۷- اثر ضریب بازگشت بر دامنه حرکت با میراگر ضربه‌ای سه جرمی



شکل ۱۵- اثر فاصله خالی بر دامنه حرکت با میراگر ضربه‌ای سه جرمی

۷- اثر چیدمان جرم‌ها بر عملکرد میراگر

به منظور بررسی اثر دو نوع چیدمان مختلف جرم‌ها بر عملکرد میراگر ضربه‌ای در دو میراگر ضربه‌ای سه جرمی و پنج جرمی در نظر گرفته می‌شود. چیدمان اول، چیدمان خطی و چیدمان دوم، چیدمان لوزی است. در نهایت نیز

۶- اثر ضریب بازگشت بر عملکرد میراگر

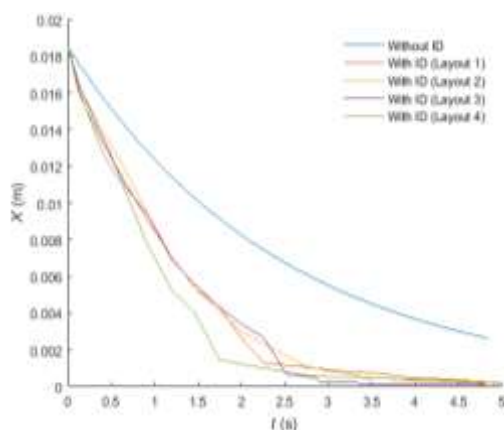
ضریب بازگشت یکی از عوامل موثر بر عملکرد میراگر ضربه‌ای است. در این قسمت اثر این عامل بر عملکرد میراگر ضربه‌ای تک جرمی و سه جرمی بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که سایر مقادیر استفاده شده، مطابق با جدول ۳ است.

نتیجه این بررسی‌ها در خصوص میراگر سه‌جرمی و پنج‌جرمی به ترتیب، مطابق شکل‌های ۲۲ و ۲۳ است. با بررسی این شکل‌ها مشخص است که هر چه شیب تغییرات جرم در چیدمان خطی جرم‌ها بیشتر باشد، کارایی میراگر بهتر خواهد بود.

چیدمان لوزی جرم‌ها برای میراگر ضربه‌ای سه‌جرمی و پنج‌جرمی به ترتیب مطابق جدول‌های ۶ و ۷ است. مجموع جرم‌ها در هر کدام از چیدمان‌ها، ثابت و برابر جرم میراگر تک‌جرمی در جدول ۳ است. سایر پارامترها نیز مطابق جدول ۳ است. نتیجه این بررسی‌ها در خصوص میراگر سه‌جرمی و میراگر پنج‌جرمی به ترتیب مطابق شکل‌های ۲۴ و ۲۵ است. با بررسی این شکل‌ها مشخص است که هر چه تغییرات جرم‌ها در چیدمان لوزی بیشتر باشد، کارایی میراگر بهتر است.

جدول ۵- چیدمان خطی جرم‌ها در میراگر ضربه‌ای پنج‌جرمی

عنوان چیدمان	نسبت جرم‌های میراگر
چیدمان ۱	1-0.95-0.9-0.85-0.8
چیدمان ۲	1-0.9-0.8-0.7-0.6
چیدمان ۳	1-0.85-0.7-0.55-0.4
چیدمان ۴	1-0.8-0.6-0.4-0.2



شکل ۲۲- اثر چیدمان خطی جرم‌ها بر دامنه حرکت با میراگر ضربه‌ای سه‌جرمی

مقایسه چیدمان‌های مختلف انجام می‌شود. لازم به ذکر است که نحوه قرارگیری جرم‌های در چیدمان‌های یکنواخت، هشتی، خطی و لوزی به ترتیب مطابق شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ است.



شکل ۱۸- چیدمان یکنواخت



شکل ۱۹- چیدمان هشتی



شکل ۲۰- چیدمان خطی



شکل ۲۱- چیدمان لوزی

چیدمان خطی جرم‌ها برای میراگر ضربه‌ای سه‌جرمی و پنج‌جرمی به ترتیب، مطابق جدول‌های ۴ و ۵ است. مجموع جرم‌ها در هر کدام از چیدمان‌ها، ثابت و برابر جرم میراگر تک‌جرمی در جدول ۳ است. سایر پارامترها نیز مطابق جدول ۳ است.

جدول ۴- چیدمان خطی جرم‌ها در میراگر ضربه‌ای سه‌جرمی

عنوان چیدمان	نسبت جرم‌های میراگر
چیدمان ۱	1-0.9-0.8
چیدمان ۲	1-0.8-0.6
چیدمان ۳	1-0.7-0.4
چیدمان ۴	1-0.6-0.2

جدول ۶- چیدمان لوزی جرم‌ها در میراگر ضربه‌ای سه جرمی

نسبت جرم‌های میراگر	عنوان چیدمان
0.2-1-0.2	چیدمان ۱
0.4-1-0.4	چیدمان ۲
0.6-1-0.6	چیدمان ۳
0.8-1-0.8	چیدمان ۴

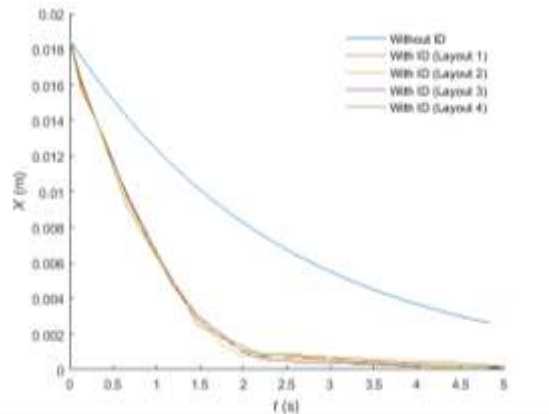
جدول ۷- چیدمان لوزی جرم‌ها در میراگر ضربه‌ای پنج جرمی

نسبت جرم‌های میراگر	عنوان چیدمان
0.2-1-0.2-1-0.2	چیدمان ۱
0.4-1-0.4-1-0.4	چیدمان ۲
0.6-1-0.6-1-0.6	چیدمان ۳
0.8-1-0.8-1-0.8	چیدمان ۴

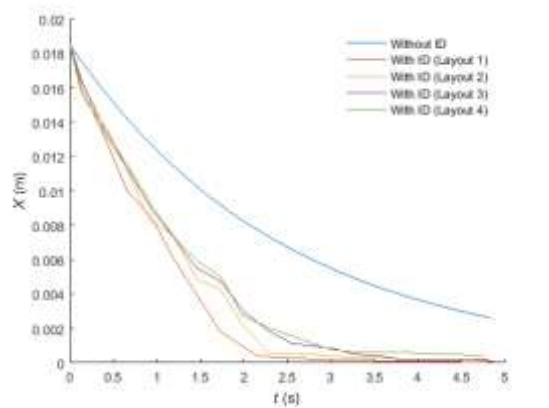
برای مقایسه اثر چیدمان‌های مختلف جرم‌ها بر عملکرد میراگر ضربه‌ای، چهار نوع چیدمان یکنواخت، هشتی، خطی و لوزی در نظر گرفته می‌شود. این چیدمان‌ها برای میراگر ضربه‌ای سه جرمی و پنج جرمی، به ترتیب مطابق جدول‌های ۸ و ۹ است. مجموع جرم‌ها در هر کدام از چیدمان‌ها ثابت و برابر جرم میراگر تک جرمی در جدول ۳ است. سایر پارامترها نیز مطابق جدول ۳ است.

جدول ۸- چیدمان جرم‌ها در میراگر ضربه‌ای سه جرمی

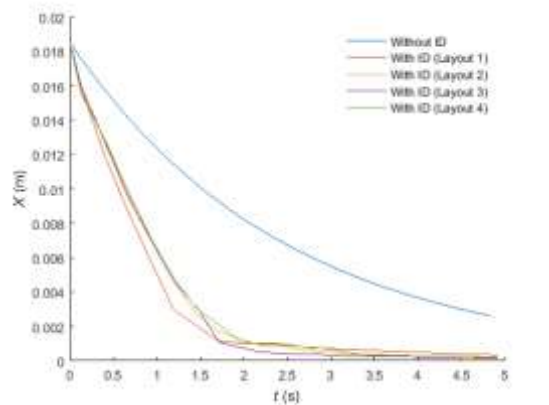
نسبت جرم‌های میراگر	عنوان چیدمان
1-1-1	چیدمان یکنواخت
1-0.1-1	چیدمان هشتی
1-0.7-0.4	چیدمان خطی
0.1-1-0.1	چیدمان لوزی



شکل ۲۳- اثر چیدمان خطی جرم‌ها بر دامنه حرکت با میراگر ضربه‌ای پنج جرمی



شکل ۲۴- اثر چیدمان لوزی جرمی جرم‌ها بر دامنه حرکت با میراگر ضربه‌ای سه جرمی



شکل ۲۵- اثر چیدمان لوزی جرم‌ها بر دامنه حرکت با میراگر ضربه‌ای پنج جرمی

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی صلب در ارتعاشات آزاد یک سیستم یک درجه آزادی بررسی شده است. به منظور ارزیابی مدل استفاده شده، نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های قبلی در دو میراگر ضربه‌ای تک‌جرمی و سه‌جرمی مقایسه شده است که همخوانی خوبی بین این نتایج وجود دارد. سپس اثر عوامل مختلفی همچون، تعداد جرم، نسبت جرمی، فاصله خالی، ضریب بازگشت و نوع چیدمان جرم‌ها بر عملکرد میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی به صورت پارامتری مطالعه شده است. در هر کدام از این حالت‌ها، زمانی میراگر بهینه می‌شود که اثر آن بر کاهش دامنه ارتعاشی سیستم اصلی بیشتر باشد.

با بررسی نمودارهای حاصل از مطالعه پارامتریک عملکرد میراگر ضربه‌ای زنجیره خطی قطر متغیر در ارتعاشات آزاد سیستم یک درجه آزادی نتایج زیر بدست می‌آید:

۱- با افزایش تعداد جرم به میراگر، کارایی آن افزایش می‌یابد.

۲- با توزیع جرم میراگر به جرم‌های کوچکتر، کارایی آن افزایش می‌یابد.

۳- هر چه نسبت جرمی کوچکتر باشد، کارایی میراگر بهتر است.

۴- هر چه شیب تغییرات جرم در چیدمان خطی جرم‌ها بیشتر باشد، کارایی میراگر بهتر خواهد بود.

۵- هر چه تغییرات جرم‌ها در چیدمان لوزی بیشتر باشد، کارایی میراگر بهتر است.

۶- عملکرد چیدمان لوزی در مقایسه با دیگر چیدمان‌ها بهتر است.

به منظور ادامه این پژوهش، می‌توان اثر نوع چیدمان بر عملکرد میراگر ضربه‌ای الاستیک را نیز بررسی کرد؛ همچنین می‌توان این کار را به صورت آزمایشگاهی نیز انجام داد.

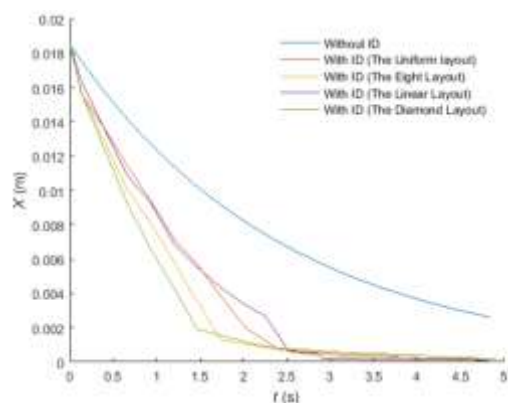
۹- مراجع

- [۱] کشته‌گر ب، اعتدالی ص (۱۳۹۵) مدل‌های ریاضی جدید مبتنی بر رویه تحلیل رگرسیون برای تنظیم بهینه پارامترهای TMD. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۷۵-۵۹ (۴): ۶.

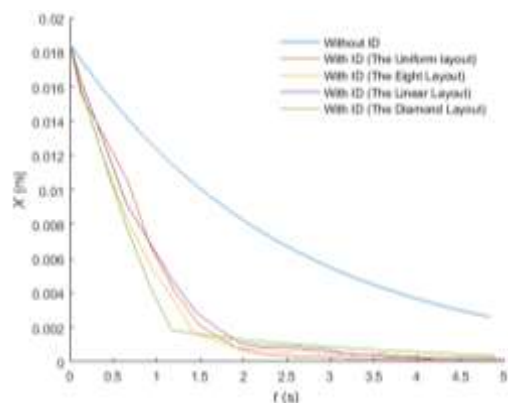
نتیجه این بررسی‌ها در خصوص میراگر سه‌جرمی و میراگر پنج‌جرمی به ترتیب مطابق شکل‌های ۲۶ و ۲۷ است. با بررسی این شکل‌ها مشخص است که عملکرد چیدمان لوزی در مقایسه با دیگر چیدمان‌ها بهتر است.

جدول ۹- چیدمان جرم‌ها در میراگر ضربه‌ای پنج‌جرمی

عنوان چیدمان	نسبت جرم‌های میراگر
چیدمان یکنواخت	1-1-1-1-1
چیدمان هشتی	1-0.1-1-0.1-1
چیدمان خطی	1-0.8-0.6-0.4-0.2
چیدمان لوزی	0.1-1-0.1-1-0.1



شکل ۲۶- اثر چیدمان‌های مختلف جرم‌ها بر دامنه حرکت با میراگر ضربه‌ای سه‌جرمی



شکل ۲۷- اثر چیدمان‌های مختلف جرم‌ها بر دامنه حرکت با میراگر ضربه‌ای پنج‌جرمی

- unit impact dampers. Qual Reliab Engng Int 29: 521-527.
- [11] Gharib M, Celik A, Hurmuzlu Y (2011) Shock absorption using linear particle chains with multiple impacts. J Appl Mech 78(031005): 1-9.
- [12] Gharib M, Ghani S (2013) Free vibration analysis of linear particle chain impact damper. J Sound Vib 332: 6254-6264.
- [13] Gharib M, Karkoub M (2015) Shock-based experimental investigation of the linear particle chain impact damper. J Vib Acoust 137(061012): 1-10.
- [14] Gharib M, ASCE AM, Karkoub M (2016) Experimental investigation of linear particle chain impact dampers in free-vibration suppression. J Struct Engng 04016160: 1-10.
- [۱۵] نادریورج، باروس ر م م ک، خاتمی س م (۱۳۹۲) یک رابطه جدید برای المان‌های پیوند در محاسبه اثر ضربه، بر پایه آثار ضریب استرداد و ضریب برخورد. مجله علمی پژوهشی عمران مدرس ۷۷-۸۵: ۱۳(۲).
- [16] Zhang K, Xi Y, Chen T, Ma Z (2018) Experimental studies of tuned particle damper: Design and characterization. Mech Syst Signal Process 99: 219-228.
- [17] Rao SS (2018) Mechanical vibrations. 6th edn. in SI Units, Pearson.
- [18] Meriam JL, Kraige LG, Bolton JN (2015) Engineering mechanics dynamics. 8th edn. Wiley.
- [۲] افشارفرد ع، گل محمدی م (۱۳۹۰) بررسی عملکرد میراگرهای ضربه‌ای به منظور به کارگیری در سیستم‌های کاهنده ارتعاشات سازه‌ها. مجله مهندسی مکانیک و ارتعاشات ۲۱-۱۷(۱): ۲.
- [۳] زهرائی س م، فرج‌اللهی ر ا (۱۳۹۱) کنترل ارتعاشات به کمک میراگر ضربه‌ای. نشریه صوت و ارتعاش ۱۴-۵: ۱(۱).
- [۴] زهرائی س م، حیصمی ع (۱۳۹۶) مدل‌سازی میراگر ضربه‌ای در قاب‌های ساختمانی به کمک المان GAP. نشریه علمی پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۴، شماره ۱، صص ۱۱۳-۱۲۵.
- [5] Masri SF (1965) Analytical and experimental studies of impact dampers. Ph.D. Thesis, California Institute of Technology.
- [6] Masri SF (1969) Analytical and experimental studies of multiple-unit impact dampers. J Acoust Soc Am 45(5): 1111-1117.
- [7] Masri SF (1973) Steady-State response of a multidegree system with an impact damper. J Appl Mech 127-132.
- [8] Bapat CN, Sankar S (1985) Single impact damper in free and forced vibration. J Sound Vib 99(1): 85-94.
- [9] Ema S, Marui E (1994) A fundamental study on impact dampers. Int J Mach Tools Manuf 34(3): 407-421.
- [10] Afsharfard A, Kolahan F (2013) Reliability-based design for damping behavior of inner mass single-