

بهینه‌سازی عملکرد میراگر غیرخطی ضربه‌ای صلب سه‌جرمی در ارتعاشات آزاد با روش ترکیبی فراکوشی

مجتبی شیخی ازغندی^{*} استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، mojtabasheikhi@birjand.ac.ir
حسین صفایی فر^{*} استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بزرگمهر قانان، قانن، ایران، safaeifar@buqaen.ac.ir

چکیده

هدف از مقاله حاضر کاهش ارتعاشات آزاد یک سیستم مکانیکی با طراحی بهینه نسبت جرمی یک میراگر غیرخطی به نام میراگر ضربه‌ای است. میراگر ضربه‌ای شامل تعدادی جرم متصل به سیستم اصلی است که توانایی حرکت در یک محفظه بسته تعبیه‌شده را دارد و باعث کاهش دامنه سیستم اصلی از طریق انتقال حرکت را دارد. بر اساس تحقیقات انجام شده تاکنون، میراگر ضربه‌ای دارای عملکرد بهتری در کاهش ارتعاشات نسبت به میراگرهای خطی است. مهمترین عامل در عملکرد بهینه این میراگر، انتخاب نسبت جرمی است. با توجه به پیچیدگی و حجم محاسبات زیاد برای تحلیل چگونگی رفتار یک میراگر ضربه‌ای، در این پژوهش از روش بهینه‌سازی ترکیبی فراکوشی برای تعیین نسبت جرمی بهره گرفته شده است. با مقایسه نتایج روش بهینه‌سازی مذکور و طراحی اولیه، قدرت و کارایی بالای روش ارائه شده جهت طراحی میراگر مشهود است. طراحی بهینه پارامترهای مسئله توانسته میزان دامنه ارتعاشات سیستم اصلی را در کمتر از ۲ ثانیه تا مقدار ۵ درصد دامنه اولیه کاهش دهد. استفاده از میراگر ضربه‌ای بهینه انرژی سیستم را نیز به میزان بیش از ۹۰ درصد کاهش داده است.

واژه‌های کلیدی: ارتعاشات آزاد، میراگر ضربه‌ای، نسبت جرمی، بهینه‌سازی، روش فراکوشی، نیروهای اینرسی

Performance Optimization of Three-Mass Nonlinear Rigid Impact Damper by Hybrid Metaheuristic Method in Free Vibration

M Sheikhi Azqandi

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

H. Safaeifar

Department of Mechanical Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran

Abstract

The aim of the present study is to reduce the free vibrations of a mechanical system by optimally designing the mass ratio of a nonlinear damper called the impact damper. The impact damper contains a number of masses connected to the main system that has the ability to move in a closed enclosure and reduce the amplitude of the main system through the transmission of motion. According to research done so far, impact dampers have better performance in reducing vibrations than linear dampers. The most important factor in the optimal performance of this damper is the design of the mass ratio. Due to the complexity and high volume of calculations to analyze the behavior of an impact damper, in this study, the hybrid metaheuristic method has been applied to determine the mass ratio. By comparing the results of the presented optimization method and the conventional design, the high power and efficiency of the proposed method for damper design are evident. The optimal design of problem parameters could reduce the amplitude of system vibrations in less than 2 seconds to 5% of the initial amplitude. The application of optimal impact damper has also decreased the system energy by more than 90%.

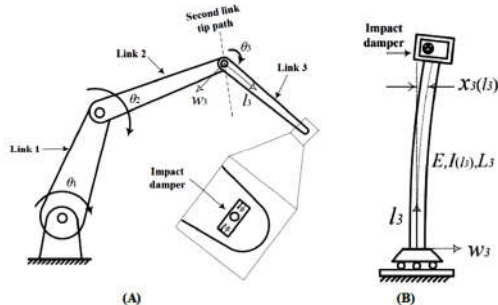
Keywords: Free vibrations, Impact damper, Mass ratio, Optimization, Metaheuristic method, Inertial forces.

راحت‌تر در مقایسه با سایر روش‌ها به طور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱-۲]. یکی از انواع روش‌های کنترل غیرفعال ارتعاشات، استفاده از میراگر ضربه‌ای است. میراگرهای ضربه‌ای در دسته میراگرهای غیرخطی دسته‌بندی می‌شوند. پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که این گروه از میراگرها در مقایسه با سایر میراگرهای ارتعاشات، عملکرد بهتری در کاهش نوسانات سازه‌ها دارد [۳-۵]. میراگر ضربه‌ای شامل یک محفظه حاوی یک یا چند جرم کمکی است که در نقطه‌ای از سازه با بیشترین دامنه ارتعاشی نصب می‌گردد. وقتی سازه اصلی ارتعاش می‌کند، به دلیل به وجود آمدن برخورد بین جرم‌های کمکی و محفظه و همچنین برخورد جرم‌های کمکی با یکدیگر، 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

۱- مقدمه

ارتعاشات در تمامی جنبه‌های مختلف زندگی بشر وجود دارد. ارتعاشات را می‌توان به دو دسته ارتعاشات خوب و ارتعاشات بد تقسیم نمود. ارتعاشات خوب باعث راحتی و آسایش زندگی بشر می‌شود که از جمله آن می‌توان به تولید موسیقی با ارتعاشات سیم‌ها و همچنین استفاده از الک‌های صنعتی با کمک ارتعاشات اشاره نمود. در ارتعاشات بد، راحتی و سلامتی انسان به خطر می‌افتد که از جمله آن می‌توان به ارتعاشات در اکثر سیستم‌های صنعتی اشاره نمود. بشر همیشه به دنبال کاهش و تا حد امکان حذف ارتعاشات بد در زندگی خود بوده است. روش‌های کنترل ارتعاشات سیستم‌های دینامیکی را می‌توان به چهار دسته فعال، نیمه‌فعال، غیرفعال و ترکیبی تقسیم نمود. روش‌های کنترل غیرفعال ارتعاشات به دلیل ساده‌تر بودن ساخت و استفاده

^{*} نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: safaeifar@buqaen.ac.ir



شکل ۲- استفاده از میراگر ضربه‌ای به عنوان کاهنده ارتعاشات ناخواسته یک بازوی رباتیکی (الف) شماییک یک رباتی و (ب) مدل ساده شده حرکت جانبی بازوی رباتیکی شماره ۳ [۱۳]

پژوهش‌های انجام شده در خصوص میراگرهای ضربه‌ای، ابتدا در مورد نوع تک‌جرمی آن شروع شد و سپس محققان از نوع چند جرمی آن جهت کاهش ارتعاشات بهره گرفتند. در سال‌های اخیر میراگر ضربه‌ای چند جرمی با چیدمان‌های مختلف جرمی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۷-۱۹]. در ادامه این بخش مهمترین پژوهش‌های انجام شده در خصوص میراگرهای ضربه‌ای به طور مختصر ارائه می‌شود.

مسری برای اولین بار میراگر ضربه‌ای تک جرمی را در سال ۱۹۶۵ به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد [۲۰]. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با تنظیم پارامترها، میراگر ضربه‌ای می‌تواند به صورت قابل ملاحظه‌ای، دامنه پاسخ سیستم را کاهش دهد. مسری در ادامه عملکرد میراگر ضربه‌ای چند واحدی در ارتعاشات آزاد یک سیستم یک درجه آزادی را بررسی نمود [۲۱]. نتیجه این پژوهش نشان داد که اثر میراگر چند واحدی در کاهش دامنه ارتعاشات از اثر میراگر تک واحدی معادل به مراتب خیلی بیشتر است. در تحقیقی دیگر، استفاده از میراگر ضربه‌ای در پاسخ پایدار ارتعاشات سیستم چند درجه آزادی، توسط مسری مطالعه شد [۲۲]. نتایج این مطالعه نشان داد که میراگر ضربه‌ای می‌تواند به عنوان یک عامل موثر در کاهش ارتعاشات سیستم‌های چند درجه آزادی نظیر ساختمان‌های بلند مورد استفاده قرار گیرد.

افشارفرد و کلاهان رفتار میراگر ضربه‌ای تک جرمی بر مبنای قابلیت اطمینان را مطالعه نموده‌اند [۲۳]. در این پژوهش تغییرات میرایی میراگر ضربه‌ای و قابلیت اطمینان سیستم نسبت به ضریب بازگشت استخراج شده است.

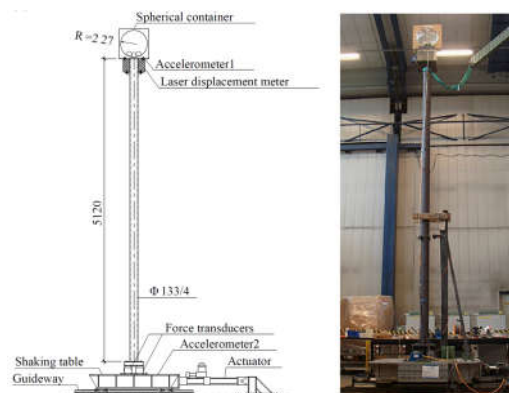
لی و همکارانش اثر پارامترهای مختلف مربوط به سطوح در تماس جرم‌ها و بدنه را بر عملکرد میراگر ضربه‌ای را مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند [۲۴]. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مشخصات گوی‌ها و بدنه از جمله اصطکاک نقش مهمی در عملکرد میراگر ضربه‌ای دارد. منصور و فیلو رفتار میراگر ضربه‌ای چندجرمی با در نظر گرفتن اصطکاک کولمب را بررسی کرده‌اند [۲۵]. نتایج این پژوهش نشان داد که اصطکاک کولمب بر عملکرد میراگر ضربه‌ای تاثیر می‌گذارد. به خصوص وقتی طول میراگر از یک طول بحرانی کوچکتر باشد، اصطکاک کولمب باعث بهبود پاسخ سیستم در تحریک‌های سینوسی می‌شود.

میراگر ضربه‌ای سیستم ذرات اولین بار توسط اراکی و همکاران مطرح شده است [۲۶]. در این پژوهش یک محفظه حاوی ذرات به عنوان

و به این دلیل، این میراگر، میراگر ضربه‌ای نامیده می‌شود. به عبارت بهتر عامل مهم و تاثیرگذار در میراگر ضربه‌ای برای کنترل و کاهش ارتعاشات سیستم اصلی، نیروهای کوچک ایجاد شده توسط جرم‌های کمکی است که بر خلاف حرکت سیستم اصلی به آن وارد می‌شود و در نتیجه باعث کاهش شدید دامنه ارتعاشات سیستم اصلی خواهد شد [۶-۷].

عدم نیاز به عامل فعالسازی و همچنین عدم تغییر کارایی با تغییر دما جزو مزایای عمده این نوع میراگرها می‌باشد. میراگرهای ضربه‌ای در اکثر سیستم‌های ارتعاشی قابل استفاده می‌باشند که از آن جمله می‌توان به کاهش ارتعاشات در تیرها [۸]، سازه‌های ساختمانی [۹] و همچنین قطارها [۱۰-۱۱] اشاره نمود.

شکل ۱ یک نمونه از کاربرد میراگر ضربه‌ای به عنوان کنترل ارتعاشات توربین‌های بادی را نشان می‌دهد [۱۲]. این میراگر که در حقیقت میراگر گوی‌های غلطان قابل تنظیم است یک میراگر دوبعدی است و در تمام جهات افقی قابل فعال شدن می‌باشد.



شکل ۱- استفاده از میراگر ضربه‌ای به عنوان کنترل ارتعاشات توربین‌های بادی [۱۲]

شکل ۲ یک نمونه از کاربرد میراگر ضربه‌ای به عنوان کاهنده ارتعاشات ناخواسته در یک بازوی رباتیکی را نشان می‌دهد [۱۳]. این پژوهش توسط جم و افشارفرد در سال ۲۰۱۳ انجام شده است. نتایج این پژوهش بیانگر کاهش ارتعاشات بازوی رباتیکی با استفاده از میراگر ضربه‌ای است.

میراگر ضربه‌ای به دو نوع صلب و ارتجاعی تقسیم می‌شود. در میراگر ضربه‌ای صلب، زمان برخورد خیلی کوچک است و بنابراین از تغییر موقعیت دو جرم در هنگام برخورد صرف‌نظر می‌شود. در این میراگر تغییرات سرعت دو جرم برخورد کننده پس از برخورد با استفاده از اصل بقای مومنتوم و با کمک روابط برخورد در دینامیک کلاسیک به‌دست می‌آید [۶]. در میراگر ضربه‌ای ارتجاعی، زمان برخورد کوچک نیست و بنابراین تغییر موقعیت دو جرم در هنگام برخورد باید در نظر گرفته شود [۷]. در این میراگر معادلات نیروی تماس باید مد نظر قرار بگیرد که در این حالت معادلات حرکت به صورت غیرخطی تبدیل می‌شود. تاکنون مدل‌های مختلف نیروی تماس بین دو جسم در حال برخورد توسط پژوهشگران مختلفی از جمله فلورس و همکاران [۱۴]، هو و ژو [۱۵] و صفایی‌فر و فرشیدیان‌فر [۱۶] ارائه شده است.

در بازه زمانی کمی مستهلک کرد و بنابراین دامنه ارتعاشات را به صورت قابل توجهی کاهش داد [۳۴].

با بررسی تحقیقات گذشته مشخص می‌شود که مطالعات بسیار کمی بر روی طراحی بهینه میراگر ضربه‌ای انجام پذیرفته است. در تعداد محدودی از مطالعات، با بررسی حالت‌های مختلف مقادیر پارامترهای موثر بر عملکرد میراگر و مقایسه نتایج آنها، مشخصات بهینه میراگر ضربه‌ای انتخاب شده است. در عمل در این صورت صرفاً می‌توان به طرح بهتر میراگر از بین چندین حالت دست پیدا کرد.

هدف از مقاله حاضر گسترش مطالعه انجام شده در مرجع [۳۴] و در نظر گرفتن یک مجموعه چند جرمی در میراگر به جای میراگر تک جرمی است. با توجه به پیچیدگی بیشتر، غیرخطی و بد رفتار بودن تحلیل مسئله ذکر شده جدید، دستیابی به طرح بهینه میراگر ضربه‌ای چند جرمی کار دشوارتری است. به همین منظور برای نیل به این هدف در این پژوهش از روش فراکاوشی ترکیبی رقابت استعماری-مورچه بهره گرفته شده است. در ادامه بخش‌های مقاله مراحل مدل‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی یک میراگر ضربه‌ای با سه جرم ارائه خواهد شد.

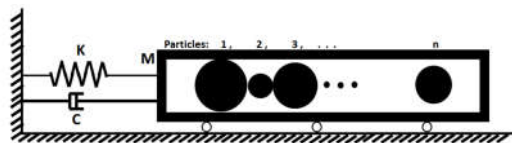
۲- تشریح مسئله

به منظور تحلیل مسائل مهندسی، اکثر سیستم‌های پیوسته را می‌توان با یک سیستم چند درجه آزادی معادل‌سازی نمود. به عنوان نمونه ارتعاشات عرضی یک تیر یکسر درگیر را می‌توان با یک سیستم یک درجه آزادی مطابق شکل ۳ معادل گرفت.

وقتی برخوردی بین سیستم اصلی و جرم‌های کمکی وجود ندارد، معادله حرکت ارتعاشات آزاد سیستم اصلی و جرم‌های کمکی به ترتیب به صورت روابط (۱) و (۲) است [۳۵].

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

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



شکل ۳- مدل میراگر ضربه‌ای چند جرمی صلب

که M ، C و K در این روابط به ترتیب جرم، میرایی و سفتی سیستم اصلی و m_j نیز جرم هر کدام از جرم‌های کمکی است. در این روابط n بیانگر تعداد جرم‌های کمکی است. x_M پاسخ زمانی سیستم اصلی و x_j 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.

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

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

میراگر در ارتعاشات اجباری سیستم یک درجه آزادی در نظر گرفته شد. سپس پاسخ پایدار سیستم به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی به دست آمد.

پاپول و سمرسیگل میراگر ضربه‌ای کیسه‌ای را مطرح کرده‌اند [۲۷]. در این میراگر ذرات کوچک داخل یک کیسه لاستیکی قرار می‌گیرند و کیسه به عنوان جرم میراگر بر روی سیستم اصلی نصب می‌شود. این پژوهش نشان داد که با استفاده از میراگر ضربه‌ای کیسه‌ای علاوه بر کاهش ارتعاشات سیستم اصلی، شدت صدای تولید شده ناشی از برخورد جرم‌ها نیز کاهش می‌یابد.

اواگوا و همکاران یک زنجیر را به عنوان میراگر ضربه‌ای مطرح کرده‌اند [۲۸]. این میراگر در کاهش ارتعاشات ناشی از باد در یک برج استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که این میراگر حتی در مقادیر کوچک دامنه ارتعاشات نیز موثر است.

ژو و همکاران میراگر ضربه‌ای سیستم ذرات را برای کاهش ارتعاشات تیرها و صفحات معرفی کرده‌اند [۲۹]. در این پژوهش ارتعاشات اتفاقی یک تیر و یک صفحه به صورت تجربی بررسی شده‌است. نتایج این پژوهش نشان داد که این میراگر به صورت قابل ملاحظه‌ای در کاهش ارتعاشات موثر است.

دو و همکاران عملکرد یک میراگر ضربه‌ای جدید با ذرات ریز را بررسی کرده‌اند [۳۰]. در این پژوهش سطح جرم ضربه زننده و محفظه اطراف آن با ذرات ریز پوشیده شده‌است. تغییر شکل پلاستیک این ذرات باعث ایجاد میرایی در سیستم اصلی می‌شود. نتایج تجربی این پژوهش نشان داد که استفاده از این میراگر خاص، باعث کاهش دامنه ارتعاشات سیستم اصلی در فرکانس‌های پایین می‌شود.

سمرسیگل و همکاران یک گوی حاوی ذرات را به عنوان میراگر ذره‌ای در ارتعاشات گذرا استفاده کرده‌اند [۳۱]. این گوی در یک فضای نیم‌کروی قرار می‌گیرد. نتایج تجربی این پژوهش نشان می‌دهد که این میراگر در کاهش ارتعاشات موثر است.

میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی توسط غریب و غنی مطرح شده است [۳۲]. در این میراگر، تعدادی جرم که در یک راستا قرار دارند، به عنوان جرم‌های ضربه زننده عمل می‌کنند. در این میراگر، چیدمان جرم‌ها به گونه‌ای است که بین هر دو گوی بزرگ، یک گوی کوچک قرار می‌گیرد. نتایج این پژوهش نشان داد که میراگر ضربه‌ای زنجیره ذرات خطی در مقایسه با میراگر ضربه‌ای تک‌جرمی معادل در کاهش ارتعاشات مؤثرتر است.

استفاده از ذرات نرم توخالی به عنوان میراگر ضربه‌ای در سازه‌های لانه زنبوری توسط میچون و همکاران بررسی شده است [۳۳]. این میراگر به منظور استفاده در سازه‌های هوایی مطرح گردید. در این پژوهش ذرات نرم توخالی در فضای خالی سازه لانه زنبوری قرار گرفته است.

صفایی فر و فرشیدیان‌فر اثر چیدمان‌های مختلف جرمی در میراگر ضربه‌ای چندجرمی صلب را به صورت تئوری و آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند [۷] و [۱۹]. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که چیدمان جرمی لوزی در مقایسه با سایر چیدمان‌های جرمی اثربخشی بهتری دارد.

صفایی فر و شیخی طراحی بهینه پارامترهای یک میراگر تک جرمی را انجام داده‌اند. نتایج آن‌ها حاکی از این است که با طراحی بهینه پارامترهای موثر در میراگر ضربه‌ای می‌توان انرژی زیادی از سیستم را

$$Country = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}}] \quad (10)$$

در حل یک مسئله بهینه‌سازی، این روش به دنبال یافتن کشوری با بهترین موقعیت و به عبارت دیگر به دست آوردن بهترین پارامترهای مسئله است که کمترین مقدار تابع هزینه را تولید می‌کند. هزینه یک کشور با ارزیابی تابع هدف f وابسته به متغیرهای طراحی به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$Cost_i = f(p_1, p_2, \dots, p_{N_{var}}) \quad (11)$$

برای شروع الگوریتم، تعداد N_{coun} کشور اولیه به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. تعداد N_{imp} تا با بهترین مقدار تابع هدف، کشورهای توسعه یافته و بقیه آن‌ها N_{col} ، کشورهای در حال توسعه را تشکیل می‌دهند. برای تقسیم کشورهای در حال توسعه اولیه بین امپراطوری‌ها، به هر امپراطوری تعدادی کشور متناسب با قدرت آن‌ها تعلق می‌گیرد. تعداد اولیه کشورهای در حال توسعه یک امپراطوری به صورت رابطه ۱۲ تعیین می‌گردد [۴۱].

$$NC_n = \text{round} \left\{ \frac{Cost_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} Cost_i} \times N_{col} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{imp} \quad (12)$$

در این رابطه NC_n تعداد اولیه کشورهای در حال توسعه امپراطوری n ام و N_{col} تعداد کل کشورهای در حال توسعه موجود در جمعیت کشورهای اولیه است. پس از تعیین تعداد کشورهای در حال توسعه هر امپراطوری، تعداد NC_n تا از کشورهای در حال توسعه اولیه به صورت تصادفی انتخاب شده و به امپراطوری n ام اختصاص داده می‌شود. قدرت کل یک امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور توسعه یافته به اضافه درصدی از میانگین قدرت کشورهای در حال توسعه آن تعریف می‌شود [۴۲].

$$TC_n = Cost(imp) + \% \xi (avg(Cost(col))) \quad (13)$$

در رابطه فوق، TC_n قدرت کل امپراطوری n ام و ξ عددی مثبت و معمولاً بین صفر و یک و نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود. کوچک در نظر گرفتن ξ باعث می‌شود که قدرت کل یک امپراطوری، تقریباً برابر با هزینه حکومت مرکزی آن (کشور توسعه یافته) شود.

دو رکن اصلی این الگوریتم، سیاست جذب و رقابت است. بر این اساس کشورهای در حال توسعه به طرف کشورهای توسعه یافته گرایش پیدا می‌کنند [۴۳]. در شکل ۴ این پدیده به تصویر کشیده شده است. در این شکل، پارامترهای θ و x اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت و d فاصله بین هر کدام از کشورهای در حال توسعه و کشور توسعه یافته است.



شکل ۴ - حرکت کشور در حال توسعه به سمت کشور توسعه یافته [۴۳]

پارامترهای موجود در این روابط که به صورت $\xi_j = C/(2\sqrt{KM})$ 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 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. در این روابط d بیانگر 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 اینکه میراگر صلب باشد، آنگاه زمان برخورد خیلی کوچک خواهد بود و هنگام برخورد بین دو جسم، موقعیت آن‌ها ثابت می‌ماند، ولی سرعت آن‌ها تغییر می‌کند. سرعت‌های جدید V_1' و V_2' طبق روابط حاصل از بقای مومنتوم خطی و ضریب بازگشت برخورد، ناشی از برخورد دو جرم m_1 و m_2 به ترتیب به صورت روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌شود [۳۶].

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

$$V_2' = \frac{(1 + e)V_1 + (\mu - e)V_2}{1 + \mu} \quad (9)$$

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

برای تحلیل معادلات حرکت، یک برنامه در نرم افزار MATLAB 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 روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌شود. این کار به صورت مداوم تا انتهای زمان مورد نیاز برای حل مسئله ادامه پیدا می‌کند.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی فراکاوشی

در این تحقیق یک روش بهینه‌سازی ترکیبی فراکاوشی قدرتمند با سرعت همگرایی بالا ارائه شده است. برای این منظور ابتدا به بررسی نقاط قوت و ضعف روش بهینه‌سازی رقابت استعماری پرداخته شده و سپس با استفاده از ترکیب این الگوریتم با الگوریتم گروه مورچه‌ها، نقاط ضعف الگوریتم رقابت استعماری بر طرف گردیده و نقاط قوت نیز تقویت شده است. الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری از مدل‌سازی ریاضی رقابت‌های سیاسی بین کشورها الهام گرفته شده است [۳۷] و تاکنون در مقالات زیادی به نتایج خوبی دست پیدا کرده است [۳۸-۴۰].

برای پیاده‌سازی این الگوریتم، در ابتدا یک آرایه $1 \times N_{var}$ بعدی (کشور) از متغیرهای مسئله $(p_1, p_2, \dots, p_{N_{var}})$ در نظر گرفته می‌شود.

حالتی می‌شود که تنها یک امپراطوری باقی بماند و تمام کشورهای در حال توسعه و کشور توسعه یافته در یک جایگاه به لحاظ قدرت باشند. بیشتر روش‌های بهینه‌سازی فراکاشی برای رسیدن به حل بهینه دارای دو فاز مهم با عنوان اکتشاف و استخراج (بهره‌برداری) هستند. وظیفه مرحله اکتشاف، جستجو در کل فضای مجاز و شناختن مناطق بهتر به لحاظ تابع هدف است. در مرحله استخراج (جستجوی محلی)، الگوریتم به جستجوی دقیق‌تر مناطقی که در مرحله اکتشاف شناخته شده‌اند، می‌پردازد. یکی از نقاط ضعف الگوریتم رقابت استعماری، قدرت کمتر فاز استخراج نسبت به فاز اکتشاف بخصوص در زمانی است که الگوریتم در دام بهینه محلی گیر کرده باشد و از طرفی دیگر فقط یک امپراطوری در کل فضای مجاز وجود داشته باشد. با کمک روش الگوریتم مورچه در این مقاله این نقص بر طرف شده است. در الگوریتم ترکیبی رقابت استعماری- مورچه، از الگوریتم رقابت استعماری به عنوان ابزار فاز اکتشاف و از الگوریتم گروه مورچه به عنوان تقویت کننده فاز بهره‌برداری استفاده شده است. به عبارتی از الگوریتم گروه مورچه‌ها با استفاده از مکانیزم فرمون برای اصلاح موقعیت کشورها در الگوریتم رقابت استعماری استفاده می‌شود. در مرحله جستجوی محلی توسط الگوریتم گروه مورچه‌ها، ابتدا به تعداد کشورهای در حال توسعه هر امپراطوری، مورچه اطراف کشورهای توسعه یافته آن امپراطوری تولید می‌شود [۴۶].

$$Ant_{j,n}^k = N(imperialist_n, \sigma), \quad (18)$$

$$j = 1, 2, \dots, N.C_n,$$

$$n = 1, 2, \dots, N_{imp}$$

در رابطه فوق $N.C_n$ تعداد کشورهای در حال توسعه امپراطوری n -ام است. بنابراین تعداد کل مورچه‌های تولیدی به صورت رابطه (۱۹) است.

$$Ant^k = \begin{bmatrix} Ant_{1,1} \\ \vdots \\ Ant_{NC_1,1} \\ Ant_{1,2} \\ \vdots \\ Ant_{NC_2,2} \\ \vdots \\ Ant_{NC_{imp},N_{imp}} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$NC_1 + NC_2 + \dots + NC_{N_{imp}} = N_{col}$$

عبارت $Ant_{j,n}^k$ مورچه n ام در امپراطوری n ام در تکرار k ام الگوریتم و $N(imperialist_n, \sigma)$ یک عدد تصادفی در بازه با مقدار میانگین موقعیت کشور توسعه یافته n ام و انحراف σ می‌باشد. مقدار σ نیز از رابطه ۲۰ به دست می‌آید.

$$\sigma = (U^b - L^b) \times \eta \quad (20)$$

در رابطه فوق U^b و L^b به ترتیب حدود بالا و پایین متغیرهای طراحی مسئله و η پارامتری برای کنترل اندازه انحراف است که در مراحل اولیه الگوریتم برابر با یک و با جلو رفتن الگوریتم و نزدیک شدن به نقطه بهینه به تدریج از مقدار آن کاسته شده و به سمت صفر میل می‌کند [۴۵]. الگوریتم گروه مورچه در الگوریتم ترکیبی رقابت استعماری-گروه مورچه نقش یک ابزار برای کمک به جستجوی کلی و همچنین افزایش کنترل بر روی جستجوی محلی را دارد.

$$x \approx U(0, \beta \times d), \beta > 1 \quad (14)$$

$$\theta \approx U(-\gamma, \gamma) \quad (15)$$

در روابط فوق، β و γ اعداد اختیاری بوده و معرف محدوده‌ای است که کشورهای در حال توسعه به طور تصادفی در اطراف کشور توسعه یافته در حال جستجو می‌باشند. افزایش پارامتر γ باعث انحراف بیشتر از خط واصل شده و کاهش آن نیز باعث می‌شود تا کشورهای در حال توسعه تا حد ممکن، در جهت بردار واصل بین آن دو حرکت کنند. با در نظر گرفتن واحد رادیان برای θ ، عددی نزدیک به $\pi/4$ در اکثر پیاده سازی‌ها، انتخاب مناسبی بوده است. پارامتر β عددی بزرگتر از یک و نزدیک به دو است. یک انتخاب مناسب می‌تواند $\beta = 2$ باشد. وجود ضریب $\beta > 1$ باعث می‌شود تا کشور در حال توسعه در حین حرکت به سمت کشور توسعه یافته، از جهت‌های مختلف به آن نزدیک شود.

اگر در حین این حرکت، یک کشور در حال توسعه‌ای نسبت به کشور توسعه یافته، به موقعیت بهتری دست پیدا کند، جای آن دو باهم عوض می‌شود. به عبارتی کشور در حال توسعه، کل کشورهای آن امپراطوری را تحت سلطه خود در می‌آورد و به یک کشور توسعه یافته تبدیل می‌شود. بر اساس رقابت استعماری، هر امپراطوری که نتواند بر قدرت خود بیفزاید و قدرت رقابت خود را از دست بدهد، حذف خواهد شد [۴۳]. این حذف شدن، به صورت تدریجی صورت می‌پذیرد. بدین معنی که به مرور زمان، امپراطوری‌های ضعیف، کشورهای در حال توسعه خود را از دست داده و امپراطوری‌های قوی‌تر، این کشورها را جذب کرده و بر قدرت خویش می‌افزایند. برای تصاحب کشورهای در حال توسعه امپراطوری ضعیف‌تر، رقابتی میان کلیه امپراطوری‌ها ایجاد می‌شود. برای محاسبه احتمال تصاحب این کشورها توسط هر امپراطوری، ابتدا باید از روی هزینه کل هر امپراطوری، هزینه نرمالیزه شده آن را تعیین کرد.

$$NTC_n = \max_i \{TC_n\} - TC_n \quad (16)$$

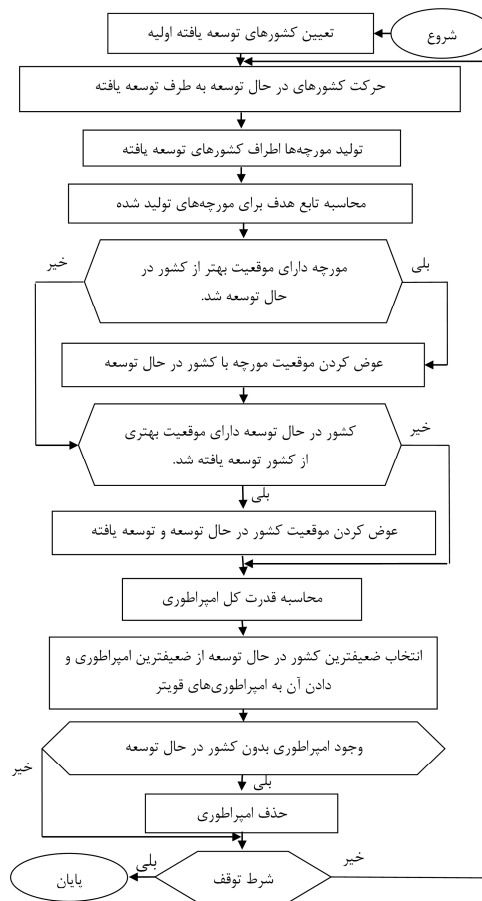
در این رابطه TC_n هزینه کل امپراطوری n ام و NTC_n هزینه کل نرمالیزه شده آن امپراطوری است. با داشتن هزینه کل نرمالیزه شده، احتمال تصاحب کشور در حال توسعه، توسط هر امپراطوری از رابطه (۱۷) به دست می‌آید.

$$P_n = \frac{NTC_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} NTC_n}, n = 1, 2, \dots, N_{imp} \quad (17)$$

باید توجه داشت که کشورهای در حال توسعه مذکور توسط قویترین امپراطوری، تصاحب نخواهد شد، بلکه امپراطوری‌های قوی‌تر، احتمال تصاحب بیشتری دارند [۴۴].

با داشتن احتمال تصاحب هر امپراطوری، مکانیزمی همانند چرخه رولت مورد نیاز است تا کشور در حال توسعه مورد رقابت را با احتمالی متناسب با قدرت امپراطوری‌ها در اختیار یکی از آن‌ها قرار دهد. در کنار امکان استفاده از چرخ رولت، مکانیزم جدیدی در این فرایند استفاده شده است که نسبت به چرخ رولت دارای هزینه محاسباتی بسیار کمتری است [۴۵]. در نهایت الگوریتم رقابت استعماری منجر به

بعد از تولید مورچه‌ها، مقدار تابع هدف برای هر یک از آنها ($f(Ant_{j,n}^k)$) محاسبه می‌شود. در صورتی که مقدار تابع هدف برای مورچه ($f(Ant_{j,n}^k)$) کمتر از مقدار تابع هدف برای کشور در حال توسعه ($f(Colony_{j,n}^k)$) باشد، موقعیت مورچه ($Ant_{j,n}^k$) جایگزین موقعیت کشور ($Colony_{j,n}^k$) می‌شود. در شکل ۵ نمودار جریان‌ی روش بهینه‌سازی فراکوشی ترکیبی رقابت استعماری-مورچه ارائه شده است [۴۶].



شکل ۵- نمودار جریان‌ی الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی رقابت استعماری-مورچه [۴۶]

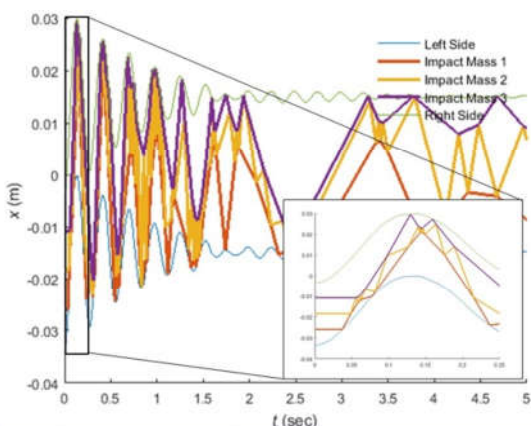
۴- اعتبار سنجی مدل و حل مسئله

برای ارزیابی مدل، نتایج به‌دست آمده در میراگر سه جرمی با پژوهش انجام شده توسط غریب و غنی [۱۷] مقایسه می‌شود. در این حالت از داده‌های جدول ۱ استفاده شده است.

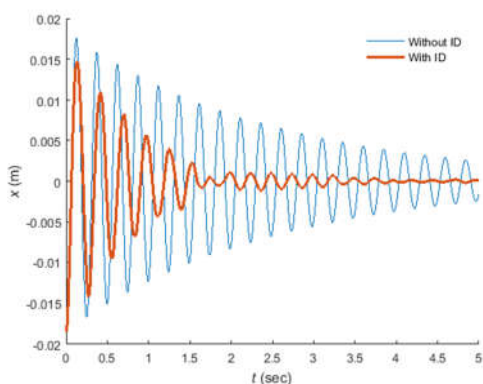
با استفاده از مقادیر عددی جدول ۱، یک نمونه از پاسخ زمانی سیستم یک درجه آزادی در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است. برای مشاهده بهتر برخوردهای جرم میراگر با دیواره‌های سمت راست و چپ در سیستم اصلی، قسمتی از شکل ۶ بزرگ‌نمایی شده است.

جدول ۱- مقادیر عددی استفاده شده برای ارزیابی میراگر ضربه‌ای سه جرمی [۱۷]

عنوان پارامتر	مقدار	واحد
جرم سیستم اصلی	۱/۳۵	kg
سختی سیستم اصلی	۸۶۵	N/m
میرایی سیستم اصلی	۱/۰۹۲	N.s/m
جرم‌های میراگر	۰/۱۱ - ۰/۱۱ - ۰/۱۱	kg
ضریب بازگشت	۰/۹	-
فاصله خالی	۳۰	mm
موقعیت اولیه سیستم	۱۸/۵	mm
سرعت اولیه سیستم	۰	mm/s



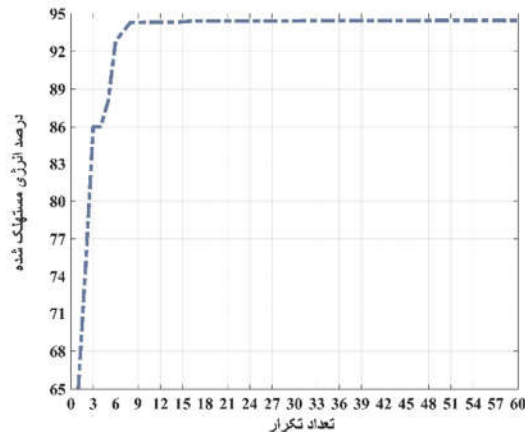
شکل ۶- پاسخ زمانی سیستم و جرم‌های میراگر در میراگر ضربه‌ای سه جرمی



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

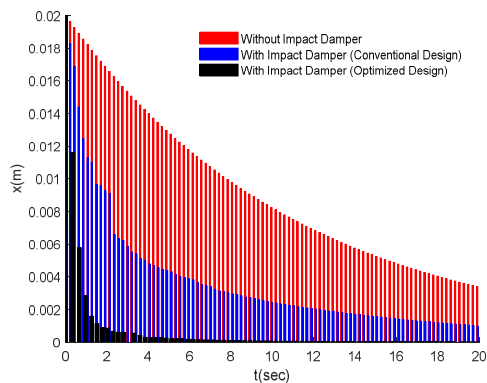
برای ارزیابی مدل، منحنی مقدار دامنه در پاسخ زمانی سیستم یک درجه آزادی با حضور میراگر ضربه‌ای سه جرمی با پژوهش‌های قبلی مقایسه می‌شود. پس از استفاده از مقادیر عددی جدول ۱ در برنامه نوشته شده، تغییرات زمانی دامنه ارتعاشات سیستم یک درجه آزادی با میراگر ضربه‌ای سه جرمی مطابق شکل ۸ است. در این شکل علامت-های ستاره از تحقیق غریب و غنی [۱۷] استخراج شده و منحنی آبی رنگ نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر است.

انرژی بیشتر می‌شود. نکته مهمی که در این تحقیق مد نظر بوده است این بوده که مقادیر نسبت جرمی در محدوده عملیاتی قرار گیرد. مقدار حد بالا برای انتخاب نسبت جرمی در هر یک از سه جرم در این تحقیق برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان جرم میانی تاثیر بیشتری در جرم کناری داشته و به همین منظور دارای بیشترین مقدار جرم نیز شده است. لازم به ذکر است که مقادیر بهینه بدست آمده از نظر فیزیک مسئله منطقی هستند.



شکل ۹ - نمودار همگرایی در طرح بهینه میراگر ضربه‌ای سه جرمی

تغییرات دامنه ارتعاشات سیستم اصلی بدون میراگر ضربه‌ای (ستون قرمز رنگ)، با میراگر ضربه‌ای اولیه (ستون آبی رنگ) و با میراگر ضربه‌ای بهینه (ستون مشکی رنگ) در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

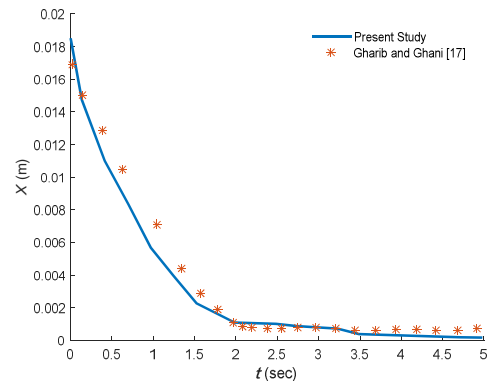


شکل ۱۰ - تغییرات دامنه ارتعاشات سیستم بدون میراگر ضربه‌ای، با میراگر ضربه‌ای اولیه و با میراگر ضربه‌ای بهینه

با بررسی نمودارهای شکل ۱۰ مشخص می‌شود که کاهش دامنه در حالت بدون میراگر به آهستگی و یکنواخت رخ خواهد داد به گونه‌ای که بعد از حدود ۲۰ ثانیه همچنان دامنه به صفر نزدیک نشده است. این در حالی است که استفاده از میراگر بهینه باعث کاهش دامنه می‌شود. البته همانگونه که در این شکل مشخص است سرعت کاهش دامنه زیاد می‌باشد.

با انتخاب پارامترهای بهینه و استفاده از میراگر ضربه‌ای بهینه شده در سیستم ارتعاشی اصلی، میراگر ضربه‌ای بهینه توانسته است در زمانی

همانگونه که در شکل ۸ مشخص است، نتایج این مقاله با نتایج پژوهش‌های قبلی همخوانی کامل دارد. بنابراین اکنون می‌توان بهینه‌سازی عملکرد میراگر ضربه‌ای سه جرمی صلب در ارتعاشات آزاد سیستم یک درجه آزادی را انجام داد. با دقت در این شکل مشخص می‌شود که بیشینه درصد خطا بین مدل‌سازی انجام شده و پژوهش‌های قبلی کمتر از هشت درصد می‌باشد. البته این خطا فقط در یک نقطه (زمان یک ثانیه) اتفاق می‌افتد ولی در مجموع میانگین خطا کمتر از یک درصد می‌باشد.



شکل ۸ - ارزیابی میراگر ضربه‌ای سه جرمی با روش ارائه شده

در این بخش به طراحی یک میراگر ضربه‌ای سه جرمی با استفاده از روش فراکاوشی ترکیبی رقابت استعماری-مورچه پرداخته شده است. مسئله در نظر گرفته شده در این‌جا میراگر ضربه‌ای سه جرمی است که مشخصات اصلی آن مطابق مرجع [۳۴] است. مقادیر فاصله خالی و ضریب بازگشت با توجه به مقادیر ارائه شده در مرجع مذکور به ترتیب برابر با ۰/۰۲۹۲۶ متر و ۰/۰۲۲۳۴ انتخاب گردید. تعداد جرم‌های موجود در میراگر ضربه‌ای سه جرمی بوده و متغیرهای طراحی مسئله نسبت‌های جرمی این اجسام می‌باشد. برای تحلیل مسئله یک برنامه کامپیوتری نرم‌افزار MATLAB نوشته شد که توانایی محاسبه میزان انرژی مستهلک شده در اثر ارتعاشات آزاد در طول زمان بر اساس متغیرهای طراحی را دارا می‌باشد. در حین فرآیند بهینه‌سازی برای انتخاب نسبت جرمی در اینجا سعی شده است که قابل کاربرد بودن نتایج مد نظر قرار گیرد. به همین منظور در صورت قرارگیری در یک محدوده مناسب قابل قبول خواهد بود.

در شکل ۹ نمودار همگرایی به طرح بهینه ارائه شده است. الگوریتم رقابت استعماری-مورچه در کمتر از ۱۰ تکرار توانسته به طرح بهینه میراگر دست یابد. بهترین طرح به دست آمده به منظور مستهلک کردن انرژی سیستم در طرح‌های اولیه در نظر گرفته در شروع فرآیند بهینه‌سازی (جمعیت اولیه الگوریتم) حدود ۶۵ درصد بوده است. این مقدار در تکرار دهم به حدود ۳۰ درصد افزایش یافته و به ۹۵ درصد افزایش پیدا کرده است.

مشخصات میراگر ضربه‌ای سه جرمی به دست آمده از روش بهینه‌سازی ترکیبی فراکاوشی رقابت استعماری-مورچه برای نسبت‌های جرمی میراگر برابر با ۰/۰۴۳۵۸۷، ۰/۰۵۰۰۰۰ و ۰/۰۳۳۹۶۰ به دست آمده است. با افزایش مقادیر نسبت‌های جرمی در میراگر میزان استهلاک

- [۴] زهرائی س. م. و فرج اللهی راد، کنترل ارتعاشات به کمک میراگر ضربه‌ای، *نشریه صوت و ارتعاش*، د ۱، ش ۱، ص ۵-۱۴، ۱۳۹۱.
- [۵] زهرائی س. م. و حصیمی ع.، مدل سازی میراگر ضربه‌ای در قاب‌های ساختمانی به کمک المان GAP، *نشریه علمی پژوهشی مهندسی سازه و ساخت*، د ۴، ش ۱، ص ۱۱۳-۱۲۵، ۱۳۹۶.
- [6] Afsharfard A., Farshidianfar A., Free vibration analysis of nonlinear resilient impact dampers. *Nonlinear Dynamics*, Vol. 73, No. 2, pp. 155-166, 2013.
- [۷] صفایی فرح. و فرشیدیان فر. ا.، بررسی تئوری و پارامتریک عملکرد میراگر ضربه‌ای قطر متغیر در ارتعاشات آزاد سیستم یک درجه آزادی، *مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها*، د ۹، ش ۱، ص ۱۵-۲۶، ۱۳۹۸.
- [8] Zurawski, M., Zalewski R., Damping of Beam Vibrations Using Tuned Particles Impact Damper, *Applied Science*, 10, 6334, 2020, doi:10.3390/app10186334.
- [9] J. Wang, B. Wang, Z. Liu, H. Li, C. Zhang, Seismic response mitigation of building structures with a novel vibro-impact dual-mass damper, *Engineering Structures*, 215, 110673, 2020.
- [10] Jin, J., Yang, W., Koh, H., Park, D., Development of tuned particle impact damper for reduction of transient railway vibrations, *Applied Acoustics*, 169, 107487, 2020.
- [11] Vikovych, I., Krainyk, L., Zinko, R., Popovych, V., Horbai, O., Design of impact dampers for transporting cargoes by two-link vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (110)), 85-94, 2021, doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229447.
- [12] Chen, J., Georgakis, C.T., Tuned rolling-ball dampers for vibration control in wind turbines, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332, No. 21, pp. 5271-5282, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.05.019
- [13] Jam, J.E., Fard, A.A., Application of Single Unit Impact Dampers to Reduce Undesired Vibration of the 3R Robot Arms, *International Journal of Aerospace Sciences*, Vol. 2, No. 2, pp. 49-54, 2013. https://doi.org/10.5923/j.aerospace.20130202.04
- [14] Flores P., Machado M., Silva M. T., Martins J. M., On the continuous contact force models for soft materials in multibody dynamics. *Multibody Sysytem Dynamics*, Vol. 25, No. 3, pp. 357-375, 2011.
- [15] Hu S., Guo X., A dissipative contact force model for impact analysis in multibody dynamics. *Multibody Sysytem Dynamics*, Vol. 35, No. 2, pp. 131-151, 2015.
- [16] Safaeifar H., Farshidianfar A., A new model of the contact force for the collision between two solid bodies. *Multibody Sysytem Dynamics*, Vol. 50, No. 3, pp. 233-257, 2020.
- [17] Gharib M., Ghani S., Free Vibration Analysis of Linear Particle Chain Impact Damper. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332, pp. 6254-6264, 2013.
- [18] Gharib M., Karkoub M., Experimental Investigation of Linear Particle Chain Impact Dampers in Free-Vibration Suppression. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 143, No. 2, pp. 1-10, 2017.
- [19] Safaeifar H., Farshidianfar A., Experimental Investigation of Vibratory and Acoustical Behavior of Multiple-unit Impact Dampers in Free Vibration Reduction. *International Journal of Steel Structures*, 2021, https://doi.org/10.1007/s13296-021-00518-6.
- [20] Masri S. F., *Analytical and Experimental Studies of Impact Dampers*, Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, 1965.

کمتراز ۲ ثانیه مقدار دامنه نوسان سیستم اصلی را تا کمتر از ۵ درصد کاهش دهد و میزان اتلاف انرژی سیستم اصلی به خاطر وجود میراگر ضربه‌ای بیش از ۹۰ درصد بوده است. این در حالی است که در این مدت دامنه سیستم اصلی با میراگر اولیه فقط تا ۴۵ درصد کاهش یافته است و میزان کاهش انرژی در سیستم اصلی به خاطر وجود میراگر ضربه‌ای اولیه تقریباً ۶۰ درصد می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان دهنده تاثیر چشم‌گیر و قابل ملاحظه انتخاب نسبت جرمی بهینه در این نوع میراگرها است. یکی از ایرادات میراگرهای ضربه‌ای ایجاد نویز به خاطر برخورد بین گوی‌های میراگر با یکدیگر و با بدنه سیستم اصلی است که با استفاده از میراگر ضربه‌ای سه جرمی بهینه شده در این مقاله، علاوه بر جذب بیش از ۹۴ درصد انرژی اولیه سیستم، نویزهای ایجاد شده نیز به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۱۳].

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، بهینه‌سازی عملکرد میراگر ضربه‌ای سه جرمی در ارتعاشات آزاد با روش ترکیبی فراکاوشی انجام شده است. یکی از عوامل مهم در عملکرد میراگر ضربه‌ای، انتخاب نسبت جرمی است. با توجه به پیچیدگی و حجم زیاد محاسبات برای تحلیل چگونگی رفتار بهینه یک میراگر ضربه‌ای، از روش بهینه‌سازی ترکیبی فراکاوشی رقابت استعماری-مورچگان برای تعیین نسبت جرمی بهینه بهره گرفته شده است. برای اعتبار سنجی برنامه نوشته شده برای تحلیل مسئله، نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج تحقیقات گذشته مقایسه گردید و تطابق خوبی با آنها داشت. با مقایسه نتایج طرح بهینه با طرح اولیه و همچنین همگرا شدن مسئله در کمتر از ۱۰ تکرار، قدرت و کارایی بالای روش ارائه شده در طراحی بهینه میراگر ضربه‌ای مشهود است. با طراحی بهینه نسبت‌های جرمی در میراگر ضربه‌ای سه جرمی، میزان دامنه ارتعاشات آزاد سیستم یک درجه آزادی در کمتر از ۲ ثانیه به میزان کمتر از ۵ درصد دامنه اولیه کاهش یافته است و میزان کاهش انرژی در میراگر ضربه‌ای بهینه طراحی شده، بیش از ۹۰ درصد می‌باشد.

۶- تشکر و قدردانی

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی شماره ۳۹۲۱۷ و با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه بزرگمهر قائنات انجام شده است که بدینوسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

۷- مراجع

- [1] Blazejczyk-Okolewska B., Analysis of an impact damper of vibrations. *Chaos Solitons Fractals*, Vol. 12, No.11, pp.1983-1988, 2001.
- [2] Shinde V. L., Pathak A. K., Review on particle damping technique for vibration suppression. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 3, pp. 2890-2895, 2016.

[۳] افشارفرد ع. و گل محمدی م.، بررسی عملکرد میراگرهای ضربه‌ای به منظور به کارگیری در سیستم‌های کاهنده ارتعاشات سازه‌ها، *مجله مهندسی مکانیک و ارتعاشات*، د ۲، ش ۱، ص ۱۷-۲۱، ۱۳۹۰.

- [۳۹] نیکخواه، ا.، پاکرو، ف.، بهبود عملکرد الگوریتم رقابت استعماری و کاربرد آن در کنترل پرواز بالگرد، *مجله مهندسی مکانیک تبریز*، دوره ۵۱، شماره ۳ - شماره پیاپی ۹۶، پاییز ۱۴۰۰، صفحه ۲۳۹-۲۴۹.
- [۴۰] بیاتی چالشتی م. ح.، ملک زاده فرد ک.، جعفری م.، پورمومید ع.، بررسی تأثیر زاویه‌ی بار در تعیین پارامترهای بهینه‌ی مؤثر بر صفحه‌های ارتوروپیک نامحدود حاوی گشودگی شبه مربعی، *مجله مهندسی مکانیک تبریز*، دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۶۵-۷۴.
- [۴۱] قدوسیان ع.، شیخی م.، روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری در مهندسی، انتشارات دانشگاه سمنان، ۱۳۹۲.
- [42] Roustaei R., Yousefi Fakhr F., A Hybrid Meta-Heuristic Algorithm based on Imperialist Competition Algorithm. *Journal of AI and Data Mining*, Vol 6, No 1, pp. 59-67, 2018.
- [43] Chaudhary H., Panwar V., Sukavanam N., Chahar B., Imperialist Competitive Algorithm Optimised Adaptive Neuro Fuzzy Controller for Hybrid Force Position Control of an Industrial Robot Manipulator: A Comparative Study, *Fuzzy Information and Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 435-451, 2021.
- [44] Khabbazi A., Atashpaz-Gargari E., Lucas C., Imperialist Competitive Algorithm for Minimum Bit Error Rate Beamforming, *International Journal of Bio Inspired Computation*, Vol. 1, No. 1, pp. 125-133, 2009.
- [45] Hosseini Nasab E., Khezri M., Khodamoradi M. S., Atashpaz Gargari E., An Application of Imperialist Competitive Algorithm to Simulation of Energy Demand Based on Economic Indicators: Evidence from Iran. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 43, No. 4, pp. 495-506, 2010.
- [46] Ghoddosian A., Sheikhi Azqandi M., A Hybrid Imperialist Competitive Ant Colony Algorithm for Optimum Geometry Design of Frame Structures. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 46, No. 3, pp. 403-416, 2013.
- [21] Masri S. F., Analytical and Experimental Studies of Multiple-Unit Impact Dampers. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 45, No. 5, pp. 1111-17, 1969.
- [22] Masri S. F., Steady-State Response of a Multidegree System with an Impact Damper. *Journal of Applied Mechanics*, pp. 127-132, 1973.
- [23] Afsharfard A., Kolahan F., Reliability-based Design for Damping Behavior of Inner Mass Single-unit Impact Dampers. *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 29, pp. 521-527, 2013.
- [24] Li X., Yang Y., Shi W., Study on the Damping Effect of Particle Dampers considering Different Surface Properties. *Shock and Vibration*, Vol. 2019, Article ID 8293654, 16 pages, 2019.
- [25] Mansour W. M., Filho D. R. T., Impact dampers with Column friction, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 33, No. 3, pp. 247-265, 1974.
- [26] Araki Y., Yokomichi I., Inoue J., *Impact damper with granular materials*: 2nd report, Bulletin of JSME, Vol. 28, No. 241, pp. 1466-1472, 1985.
- [27] Poplewell N., Semercigil S. E., Performance of the bean bag impact damper for a sinusoidal external force. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 133, No. 2, pp. 193-223, 1989.
- [28] Ogawa K., Sakai Y., Sakai F., Control of wind-induced vibration using an impact mass damper. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 43, No. 1-3, pp. 1881-1882, 1992.
- [29] Xu Z., Wang M. Y., Chen T., An experimental study of particle damping for beams and plates. *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 126, No. 1, pp. 141-148, 2004.
- [30] Du Y., Wang S., Zhu Y., Li L., Han G., Performance of a new fine particle impact damper. *Advances in Acoustics and Vibration*, Vol. 2008, 140894, pp. 1-7, 2008.
- [31] Semercigil S. E., Turan O. F., Kopp G. A., A particle damper for transient oscillations, *Modal Analysis Topics*, Vol. 3, pp. 153-160, 2011.
- [32] Gharib M., Ghani S., A novel impact damper consisting of a linear chain of particles. In *the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Houston, Texas, USA, 2012.
- [33] Michon G., Almajid A., Aridon G., Soft hollow particle damping identification in honeycomb structures. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332, No. 3, pp. 536-544, 2013.
- [34] Safaeifar H., Sheikhi Azqandi M., Optimal design of the impact damper in free vibrations of SDOF system using ICACO. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 461-479, 2021.
- [35] Rao S. S., *Mechanical Vibrations*, 6th edition in SI Units, Pearson, 2018.
- [36] Meriam J. L., Kraige L. G., Bolton J. N., *Engineering Mechanics Dynamics*, 8th edn, John Wiley & Sons, 2015.
- [37] Atashpaz-Gargari E., Lucas C., Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialistic Competition”, In: *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Singapore, 2007.
- [۳۸] مختاری کرچکگانی م.، واردی کولایی س. م.، سنتز بهینه مکانیزم نرم صفحه ای با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری، *مجله مهندسی مکانیک تبریز*، 10.22034/jmeut.2021.42966.2796، ۱۴۰۰.