



Validation of the Results of the Fuzzy Control Systems Method in Optimizing the Dynamic Behavior of Viscoelastic Dampers

Mohammad Reza Eskafi¹, Mohammad Ali Afshar Kazemi^{2*}, Koros Nikofer³

1. Department of Industrial Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
 2. Department of Industrial Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. (Corresponding Author).
 3. Department of Mechanical Engineering, Electronic Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- ❖ Corresponding Author Email: dr.mafshar@gmail.com

Journal Info:

Volume 2, Issue 4 Winter 2024
Pages: 128-143

Article Dates:

Receive: 2023/12/03
Accept: 2024/02/12
Published: 2024/03/15

Keywords:

Damper, Fuzzy Control, Viscoelastic, Optimization

The use of shock absorbers in various industries in order to reduce the fluctuations of equipment and air from premature depreciation and increase the useful life of parts has a special feature. In this research, the design and construction of the hydraulic shock absorber and the analysis of the characteristics and components of the parts and the impact of the working fluid used in the shock absorber have been discussed. In common shock absorbers used in the industry, hydraulic oil with a constant viscosity (Newtonian fluid) is used, and in this condition, due to the constant viscosity of the fluid, the stopping acceleration of the shock impacting the shock absorber is initially high, and with the passage of time, the acceleration . The stop is reduced, and this issue causes motion shock and hitting the body, and may cause injury or death. In this research, researchers and decision makers have investigated the rheological properties of the working fluid used in shock absorbers by applying the science of rheology, which has been highly regarded over the years. In fact, by using fluids whose viscosity is not constant (non-Newtonian) and whose viscosity changes due to various reasons such as shear stress change, the intelligent function of the receiver is affected. The use of these fluids is such that when the body collides with the bumper, due to the impact and the high cutting rate, the viscosity of the fluid is reduced and causes the body to experience less acceleration and stop. decrease with The shear rate and consequently the increase in viscosity of the fluid, the acceleration of the stop is increased until it finally becomes an object. It should be noted that the construction of such shocks is of interest in the world, and this is the first experience of industrial use of this shock in the world, which can confirm the laboratory results of improving the damping conditions. These shock absorbers are used in various industries, such as automotive industry, aviation, strengthening of buildings against earthquakes, as well as the elevator industry.

Article Cite:

Eskafi MR, Afshar Kazemi MA, Nikofer K. (2024). Validation of the Results of the Fuzzy Control Systems Method in Optimizing the Dynamic Behavior of Viscoelastic Dampers, *Dymanic Management and Business Analysis*; 2(4): 128-143



[10.22034/dmbaj.2024.2035663.2410](https://doi.org/10.22034/dmbaj.2024.2035663.2410)



Creative Commons: CC BY 4.0



اعتبار سنجی نتایج حاصل از روش سیستم های کنترل فازی در بهینه سازی رفتار دینامیکی میراگرهای ویسکوالاستیک

محمد رضا اسکافی^۱، محمد علی افشار کاظمی^{۲*}، کوروس نکوفر^۳

۱. گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (نویسنده مسئول).

۳. گروه مهندسی مکانیک، واحد الکترونیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

✉ ایمیل نویسنده مسئول: dr.mafshar@gmail.com

اطلاعات نشریه:

دوره ۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲

صفحات: ۱۴۳-۱۲۸

تاریخ های مقاله:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱

انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵

واژگان کلیدی:

میراگر، کنترل فازی، ویسکوالاستیک، بهینه سازی

استفاده از ضربه گیرها در صنایع مختلف به منظور کاهش لرزش و نوسانات تجهیزات و پیشگیری از استهلاک زودرس و افزایش عمر مفید قطعات، دارای اهمیت ویژه ای می باشد. در این تحقیق علاوه بر طراحی و ساخت ضربه گیر هیدرولیک و بررسی مشخصات و پارامترهای فیزیکی قطعات تشکیل دهنده و به بررسی تاثیر سیال عامل مورد استفاده در ضربه گیر پرداخته شده است. در ضربه گیرهای رایج مورد استفاده در صنعت از روغن هیدرولیک با ویسکوزیته ثابت (سیال نیوتنی) استفاده می شود و در این شرایط با توجه به ثابت بودن میزان لزجت سیال، شتاب توقف جسم برخورد کننده به ضربه گیر ابتدا زیاد بوده و با گذشت زمان شتاب توقف کم می شود و این موضوع باعث ایجاد شوک حرکتی و ضربه اولیه به جسم برخورد کننده می شود و ممکن است باعث بروز خسارت و یا صدمات جانی شود. لذا در این پژوهش با بکارگیری علم رئولوژی که طی سالیان اخیر به شدت مورد توجه پژوهشگران و دانشمندان قرار گرفته است به بررسی خواص رئولوژی سیال عامل مورد استفاده در ضربه گیر پرداخته شده است. در واقع با استفاده از سیال هایی که ویسکوزیته آنها ثابت نیست (غیرنیوتنی) و بدلائل مختلف مانند تغییر تنش برشی ویسکوزیته آنها تغییر می کند، به هوشمند سازی عملکرد ضربه گیر پرداخته شده است. استفاده از این سیالات به گونه ای است که در زمان برخورد جسم به ضربه گیر، با توجه بر ضربه اولیه و ایجاد نرخ برش بالا، ویسکوزیته یا همان لزجت سیال کاهش یافته و باعث می شود جسم شتاب توقف کمتری را تجربه کند و در ادامه با کاهش نرخ برشی و به تبع آن افزایش لزجت سیال، شتاب توقف افزایش یافته تا در نهایت جسم متوقف شود. لازم بذکر ساخت چنین ضربه گیرهایی در جهان مورد توجه قرار گرفته است و این پژوهش اولین تجربه استفاده صنعتی از این ضربه گیرها در جهان می تواند باشد که نتایج آزمایشگاهی بهبود شرایط دمپینگ را تایید می نماید. این ضربه گیرها در صنایع مختلف از جمله خودرو سازی، صنایع هوایی، مقاوم سازی بناها در مقابل زلزله و همچنین صنعت آسانسور مورد استفاده می باشند.

استناد به مقاله:

اسکافی، ر، افشار کاظمی م ع، نکوفر ک. (۱۴۰۲). اعتبار سنجی نتایج حاصل از روش سیستم های کنترل فازی در بهینه سازی رفتار دینامیکی میراگرهای ویسکوالاستیک: کلان شهر مشهد. مدیریت پویا و تحلیل کسب و کار (۴): ۱۴۳-۱۲۸



مقدمه

امروزه اهمیت استفاده از میراگرها در صنایع مختلف بمنظور کاهش لرزش‌های مخرب و به حداقل رساندن استهلاک تجهیزات بیش از پیش حائز اهمیت می‌باشد. برای اولین بار در سال ۱۹۶۹ بمنظور کاهش ارتعاشات سازه ساختمان در برج‌های دوقلو تجاری نیویورک از دمپر ویسکوالاستیک استفاده شده‌است. همچنین در سال ۱۹۸۰ در ایالات متحده این نوع دمپرها برای کاهش ارتعاشات ناشی از باد بکار گرفته شده‌اند. در سال ۱۹۹۴ در شهر تاییه کشور تایوان برای کاهش ارتعاشات ناشی از باد در سقف ایستگاه راه آهن چیئن‌تان از دمپر ویسکوالاستیک استفاده شد. اخیراً مطالعاتی که در خصوص زلزله در دانشگاه‌های مختلف انجام شده، مزیت استفاده از دمپر ویسکوالاستیک را برای سازه‌های فلزی و بتونی بیان کرده‌است. در شهر سانتاکلارا از ایالت کالیفرنیا در سال ۱۹۹۴ بمنظور کاهش ارتعاشات ناشی از زلزله سیزده ساختمان با سازه فلزی با استفاده از دمپرها ویسکوالاستیک تجهیز شده‌است. همچنین در سال ۱۹۹۶ ساختمانی با سازه بتنی در شهر سن‌دیگو از ایالت کالیفرنیا با بکارگیری دمپر ویسکوالاستیک مقاوم سازی شده‌است [۱].

از اینرو با توجه به اهمیت استفاده از اینگونه دمپرها و اشتیاق عمومی در بکارگیری آنها در سازه‌های مختلف با عملکردهای گوناگون، تحلیل حرکت این دمپرها و یافتن تنش برشی و نیروی اعمالی در ماده ویسکوالاستیک موجود در آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و می‌تواند در بکارگیری علمی و طراحی دمپرهایی با کارایی بیشتر مفید واقع گردد.

منطق فازی توسط دکتر لطفی علی عسکرزاده (لطفی زاده) در دانشگاه کالیفرنیا، برکلی در مقاله‌ای در سال ۱۹۶۵ ارائه گردید. وی در مقاله‌ای در سال ۱۹۷۳ ایده‌های خود را در خصوص مفهومی بنام متغیرهای زبانی، به عنوان متغیری که در یک مجموعه فازی تعریف شده‌است، معرفی کرد. اولین کاربرد آن در صنعت، به یک کوره سیمان ساخته شده در کشور دانمارک و در سال ۱۹۷۵ بر می‌گردد [۲،۳].

لازم بذکر است تاکنون استفاده از تکنیک سیستم‌های فازی جهت بهینه کردن رفتار و دستیابی به قابلیت اطمینان مورد نظر ضربه گیرهای غیرنیوتنی استفاده نشده است و لذا نتایج این مقاله زمینه را برای بررسی دقیق‌تر رفتار ضربه گیرها در فضای فازی و مقایسه نتایج بدست آمده با داده‌های آزمایشگاهی و تحلیلی میسر می‌سازد.

امروزه مدل‌های مختلفی از دمپر برای کاربردهای متفاوت طراحی شده و بمنظور دمپ و کنترل ارتعاشات، ضربه و بارهای وارده به سازه در اختیار صنایع مختلف قرار داده شده‌است. با توجه به مصارف مختلف و نیاز به ایجاد استهلاک انرژی در نقاط مختلف سازه انواع گوناگونی از دمپرها طراحی و ساخته شده‌است. در این تحقیق با توجه به کارایی فراوان دمپر ویسکوالاستیک به بررسی و تحلیل حرکت و نیرو اینگونه از دمپرها پرداخته شده‌است [۴].

دمپره‌ای رایج مورد استفاده در صنایع مختلف بمنظور کاهش خسارات ناشی از لرزش و نواسانات اغلب شامل موارد زیر می‌باشد:

- دمپره‌ای ویسکوز (انرژی توسط سیال سیلیکونی که بین سیلندر و پیستون قرار دارد، جذب شده‌است).
- دمپره‌ای اصطکاکی (انرژی توسط سطوح و بعلت اصطکاکی که بین سطوحی که روی هم در لغزش هستند جذب شده‌است).
- دمپره‌ای تسلیمی (انرژی توسط المان‌های فلزی که تسلیم می‌شوند، جذب شده‌است).
- دمپره‌ای ویسکوالاستیک (انرژی با برش بوجود آمده در ماده ویسکوالاستیک جذب شده‌است).

بنابراین با تجهیز سازه با چنین وسایلی که ظرفیت میرایی بالایی دارند، می‌توان بطور قابل توجهی انرژی اعمال شده را کاهش داد.

بیان مساله

شناخت ساختار درونی میراگرها و آشنایی با پارامترهای موثر در عملکرد آنها، منجر به یافتن راهی برای بهبود عملکرد و بهینه شدن رفتار دینامیکی میراگرها شود. لذا لازم است که ابتدا عوامل تاثیرگذار در رفتار دینامیکی ضربه گیرها مورد تحلیل قرار گیرد و سپس با استفاده از روش‌های مختلف مانند کنترل فازی، نسبت به بهینه کردن پارامترها اقدام شود.

در این خصوص در سال‌های اخیر پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه تولید انواع ضربه‌گیرها حاصل شده است که بصورت کلی در قالب دو نوع میراگر جمع‌کننده انرژی و اتلاف‌کننده انرژی تقسیم شده‌اند. در میراگر اتلاف‌کننده انرژی از سیالاتی مانند روغن جهت مستهلک کردن انرژی جنبشی حاصل از بار وارده بر ضربه‌گیر استفاده می‌شود. همچنین بمنظور افزایش کارایی میراگرها استفاده از سیالات غیرنیوتنی مانند سیالات ویسکوالاستیک به جای روغن مورد توجه قرار گرفته است.

اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

با توجه به محدودیت‌های مهندسی در طراحی سازه‌ها و همچنین جانمایی تجهیزات، همواره حداکثر کارایی با حداقل ابعاد مورد توجه صنایع مختلف بوده و ضمن بکارگیری تکنولوژی با کاهش متریکال مصرفی می‌توان هزینه‌های ساخت را کاهش داد.

با توجه به اهمیت موضوع استفاده از ضربه گیرهای غیرنیوتنی در صنایع مختلف و بازده بالای آنها، تحقیق در خصوص عملکرد و چگونگی افزایش بهره وری آنها در سال های گذشته مورد اهمیت قرار گرفته است. در این راستا عمدتاً با مدل سازی ریاضی ضربه گیرها و استفاده از المان های معادل و همچنین با استفاده از شبیه سازی عملکرد آنها در محیط های نرم افزاری و یا ساخت نمونه های آزمایشگاهی به تحلیل رفتار آنها در زمان وقوع ضربه و یا ارتعاشات پرداخته شده است [۵،۶].

لذا در این تحقیق به دنبال آن هستیم که با استفاده از سیالات غیرنیوتنی، کارایی ضربه گیرها افزایش داده شود. در این شرایط می توان با کاهش اندازه ضربه گیر، خروجی یکسانی در مقایسه با یک ضربه گیر بزرگتر بدست آورد که این مهم می تواند جهش بزرگی در صنایع مختلف و حتی تغییراتی در محدودیت های استاندارد عمل نماید که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

اهداف تحقیق

دستیابی به خواص سیال غیرنیوتنی ویسکوالاستیکی که با استفاده از آن در میراگرهای صنعتی به عنوان سیال عامل، بتوان بیشترین بازده و راندمان کاری را برای آن میراگر محقق کرد. این هدف با بکارگیری روش سیستم های کنترل فازی بر روی پارامترهای موثر در عملکرد ضربه گیر قابل دستیابی می باشد. لازم بذکر است که نتایج بدست آمده از این تحقیق قابل بسط و تعمیم در صنایع مختلف خواهد بود و باید به این نکته توجه داشت که استفاده از ضربه گیرهایی با قابلیت اطمینان بالا می تواند مقاومت سازه ها و ساختمان ها را در برابر لرزش و ارتعاش در زمان وقوع زمین لرزه افزایش دهد. این تحقیق روی ضربه گیرهای هیدرولیک (مستهلك کننده انرژی) مورد استفاده در صنعت آسانسور تمرکز داشته که نتایج آن می تواند ایمنی مسافران آسانسور را افزایش و همچنین محدودیت فضاهای کاری در چاه آسانسور را برطرف نماید. با انجام چندین آزمایش در برج تست، بهبود رفتار میراگر در شرایط یکسان مشاهده گردید که در ادامه به بررسی دقیق آن خواهیم پرداخت [۷].

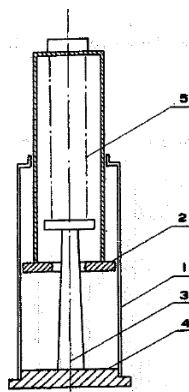
فرضیه های تحقیق

بمنظور دستیابی به همگرایی نتایج حاصل از حل معادلات حاکم بر رفتار سیال عامل مورد استفاده در میراگر، در این پژوهش فرض هایی بکارگرفته شده است. فرضیه های بکار گرفته شده شامل استفاده از سیال غیرنیوتنی تراکم ناپذیر در ضربه گیر، عدم وجود نشتی سیال در زمان برخورد، وجود نیروی یکنواخت در سر ضربه گیر در زمان برخورد و برخی ساده سازی در حل معادلات حاکم می باشند. همچنین بار وارده بصورت ضربه به میراگر برخورد کرده و در سطح آن یکنواخت اعمال شده است.

روش شناسی تحقیق

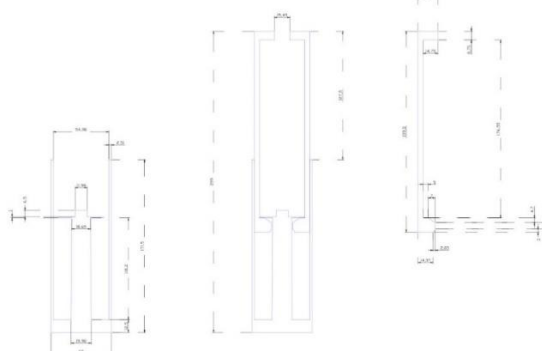
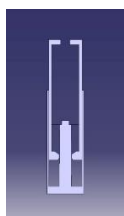
با توجه به نحوه عملکرد ضربه گیر، استفاده از سیال ویسکوالاستیک رقیق شونده (Shear thinning) امکان ایجاد توقف یکنواخت را فراهم می کند. بدین صورت که در ابتدا و پس از برخورد جسم به سر ضربه گیر و بدلیل افزایش نرخ برش در اثر شدت ضربه، ویسکوزیته سیال کاهش یافته و رقیق می شود که مانع از شوک در لحظه برخورد شده و به مرور زمان با کاهش نرخ برش، ویسکوزیته سیال افزایش یافته و سیال سفت تر شده و منجر به ایجاد یک منحنی حرکت توقف ملایم با شتاب ثابت نزدیک به حد مجاز می شود. لذا می توان با بدست آوردن میزان شتاب توقف بر اساس شرایط فیزیکی ضربه گیر و جرم و سرعت جسم برخوردکننده، ویژگی سیال مورد نظر را یافته و سپس به ساخت آن اقدام گردد [۸].

در شکل ۱ یک ساختار تا حدودی متفاوت از ضربه گیر هیدرولیک نشان داده می شود. وقتی که پیستون (۲) به پایین و داخل سیلندر روغن (۱) بوسیله کابین یا وزنه تعادل فشرده می شود، روغن از طریق یک سوراخ کوچک حلقوی از داخل محفظه داخلی جک بیرون می رود و نرخ جریان (دبی) بوسیله میله مخروطی (۳) کنترل می شود. سوراخ بتدریج کوچکتر می شود زیرا که پیستون پایین می رود و در نتیجه یک نیروی بازدارندگی ثابتی اعمال می شود. یک فنر فشرده (۵) در داخل جک آنرا به محض اینکه کابین یا وزنه تعادل از روی ضربه گیر برداشته شوند، به موقعیت عملیاتی قبلی بر می گرداند. لازم به ذکر است نمونه ساخته شده در این پژوهش بر اساس این مدل می باشد [۱۲].



شکل ۱. ضربه گیر هیدرولیک با میله مخروطی فولادی

۱- سیلندر هیدرولیک ۲- پیستون ۳- میله مخروطی فولادی ۴- صفحه پائینی ضربه گیر ۵- فنر برگردان
پس از اندازه گیری اجزای آن با استفاده از ابزار دقیق، طراحی و مدل سازی ضربه گیر در فضای نرم افزاری صورت پذیرفته است تا امکان مهندسی معکوس و ساخت اجزای آن با استفاده از ماشین آلات میسر شود. در شکل ۲ نمونه هایی از اجزای ضربه گیر که مدل شده اند، نشان داده شده است.



شکل ۲. ضربه گیر هیدرولیک مدل شده در محیط نرم افزار

سپس به بررسی جنس قطعات تشکیل دهنده ضربه گیر و متالورژی مواد پرداخته شده و نسبت به ساخت قطعات مشابه با استفاده از ابزار دقیق اقدام گردیده است. پس از مونتاژ قطعات ساخته شده و کنترل عملکرد آنها، نمونه ساخته شده جهت انجام تست به آزمایشگاه مربوطه ارسال شده است. حال با دانستن فیزیک و ساختار ضربه گیر هیدرولیک و بدست آوردن فرمول های مربوط به شتاب توقف و نیروی بازدارنده، می توان به تحلیل رفتار ضربه گیر در زمان اصابت جسم برخوردکننده پرداخت و سپس با بررسی عوامل موثر بر عملکرد ضربه گیر، رفتار آن را بهینه سازی نمود. عوامل موثر بر عملکرد ضربه گیر هیدرولیک:

الف) عوامل فیزیکی و ظاهری ضربه گیر

ب) نوع سیال استفاده شده در ضربه گیر

عوامل فیزیکی و ظاهری ضربه گیر شامل موارد زیر می باشد:

مساحت پیستون

مجموع مساحت های عبوری روغن

سرعت برخورد جسم بر پیستون

وزن اعمال شده بر سر پیستون

پارامترهای مربوط به نوع سیال استفاده شده در ضربه گیر شامل موارد زیر می باشد:

دانسیته یا چگالی سیال

ویسکوزیته سیال

الاستیسیته سیال

عموماً در ضربه گیرها از روغن هیدرولیک با ویسکوزیته ثابت (حدود ۶۸ سانتی استوک) استفاده می شود. به منظور بررسی تاثیر ویسکوزیته سیال عامل در عملکرد ضربه گیرها، در این تحقیق از سیالات مشابه با درجه ویسکوزیته متفاوت استفاده شده است و تاثیر آن بر روی حرکت ضربه گیر در هنگام توقف مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است یکی از پارامترهای حائز اهمیت در ضربه گیرها، شتاب کاهنده توقف می باشد که در واقع میزان شوک به ضربه وارده به سر ضربه گیر را بیان می کند. طبق استانداردهای مرتبط، حداکثر شتاب متوسط توقف برای ضربه گیرهای استفاده شده در صنعت آسانسور برابر با شتاب جاذبه زمین (۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه) می باشد و شتاب منفی بیش از ۲/۵ برابر جاذبه زمین، نباید بیش از ۰/۰۴ ثانیه طول بکشد [۹، ۱۲].

همچنین با توجه به استفاده از فنر در ضربه گیرهای هیدرولیک بمنظور بوجود آمدن خاصیت برگشت پیستون به حالت اولیه پس از اعمال ضربه و همچنین ایجاد خاصیت میرایی بیشتر بدلیل ذخیره انرژی ناشی از ضربه، از خاصیت الاستیک می توان به عنوان پارامتری موثر در ضربه گیرها یاد کرد.

لذا در صورت استفاده از سیال عامل ویسکوالاستیک (سیال غیرنیوتنی) به جای روغن هیدرولیک که تواماً خاصیت ویسکوز و الاستیک را دارا می باشند، می توان در بهبود خاصیت میرایی ضربه گیرها گام مهمی برداشت. در این راستا چالش های قابل توجهی پیش رو می باشد که در ادامه به بیان هریک از آنها پرداخته می باشد.

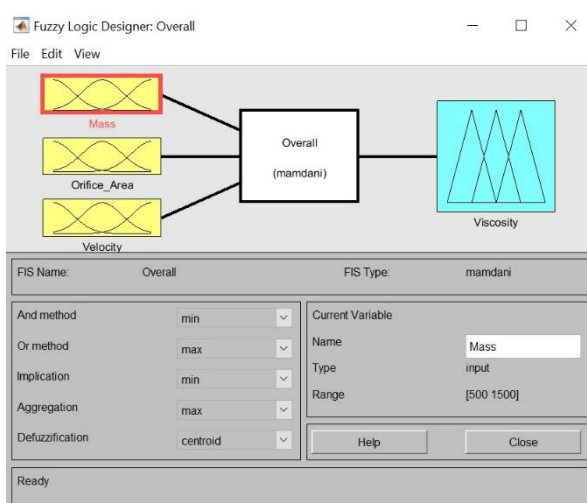
برای این منظور ابتدا لازم است که میزان ویسکوزیته سیال که بیانگر میزان سفتی و نرمی آن است بمنظور دستیابی به شتاب میانگین توقف مورد نظر در هر لحظه مشخص گردد. لازم بذکر است که عوامل مختلفی مانند جرم و سرعت جسم برخورد کننده به ضربه گیر و ساختار فیزیکی ضربه گیر در دستیابی به میزان ویسکوزیته مورد نیاز موثر می باشد. لذا می بایست کلیه عوامل تاثیرگذار را همزمان مورد بررسی قرار داد تا نتایج بدست آمده نزدیک به واقعیت باشد.

با استفاده از روش های مدل سازی فازی، امکان بررسی همزمان چند پارامتر و تاثیر آنها روی پارامتر مورد مطالعه ممکن می باشد. ضمن اینکه با تعریف کیفی از پارامترهای مورد بررسی، امکان ساده سازی مسئله و ملموس شدن نتایج بدست آمده میسر می شود. در ادامه به تعریف پارامترهای موثر در رفتار ضربه گیر در قالب پارامترهای کیفی و فازی سازی آنها و طراحی مدل فازی برای دستیابی به خروجی مورد نظر پرداخته می شود. همانطور که در مباحث پیشین مورد اشاره قرار گرفت، استفاده از سیال های غیرنیوتنی ویسکوالاستیک به عنوان سیال عامل در ضربه گیرهای هیدرولیک، می تواند در کنترل ضربه ناشی از برخورد اجسام و شتاب توقف آنها نقش مهمی ایفا نماید. در این راستا بمنظور انتخاب صحیح سیال عامل که ویژگی های قابل قبول را داشته باشد با چالش هایی مواجه هستیم. در ادامه برای تسهیل چالش های پیش رو، به معرفی مدل های منطق فازی پرداخته می شود و با استفاده از این مدل ها سعی می شود با بکارگیری نتایج آزمایشگاهی و پیاده سازی این نتایج در مدل های مذکور، به تحلیل اثر استفاده از سیال غیرنیوتنی ویسکوالاستیک در ضربه گیرها پرداخته شود.

یکی از پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد ضربه گیر، مساحت پیستون و مجموع مساحت های عبوری روغن می باشد. این مساحت ها مطابق با مدل ساخته شده و از مهندسی معکوس نمونه موجود در نظر گرفته شده است. همچنین چگالی و الاستیسیته روغن ثابت در نظر گرفته می شود تا نتایج حاصل از تغییر ویسکوزیته مورد بررسی قرار گرفته شود.

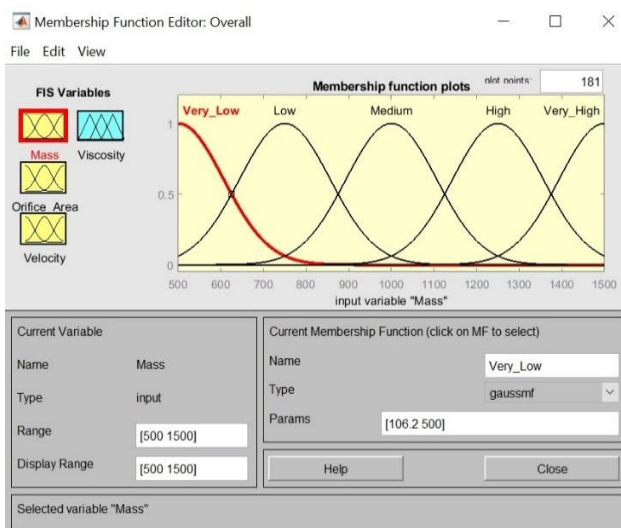
در ادامه پارامترهای موثر در قالب کیفی معرفی می گردد تا بتوان با طراحی مدل فازی به بررسی تاثیر تغییر همزمان پارامترها روی کارای ضربه گیر پرداخت. این پارامترها شامل سرعت و جرم جسم برخورد کننده به سر ضربه گیر و ویسکوزیته سیال عامل می باشد [۱۰].

در ادامه برای دستیابی به مشخصات سیال غیرنیوتنی ویسکوالاستیک مورد نظر جهت ساخت و بکارگیری در ضربه گیرهای هیدرولیک، با استفاده از مدل سازی فازی سیستم به بررسی همزمان پارامترهای موثر در عملکرد ضربه گیر پرداخته می شود. در شکل ۳، ورودی های سیستم کنترل فازی که شامل جرم جسم، مساحت روزه های خروجی و سرعت جسم می باشد و همچنین ویسکوزیته سیال عامل به عنوان خروجی سیستم کنترل فازی، نشان داده شده است.

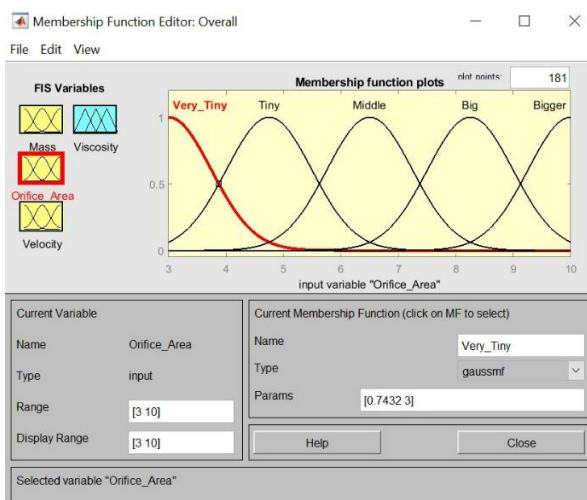


شکل ۳. ساختار سیستم کنترل فازی برای ضربه‌گیر هیدرولیک

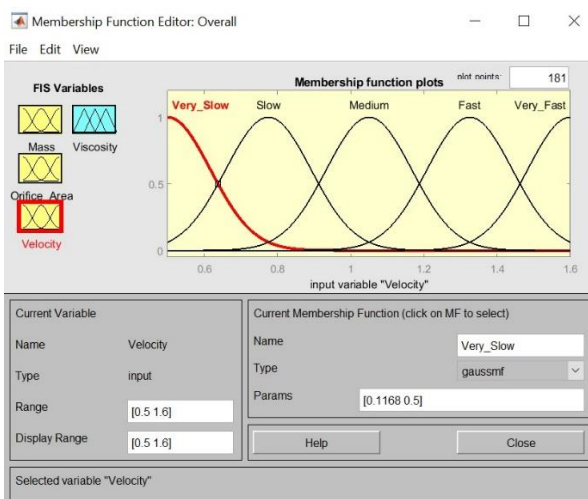
مطابق با مطالب گفته شده، ابتدا به کیفی سازی پارامترهای موثر بر عملکرد سیستم میراگر پرداخته می شود. در شکل های ۴، ۵، ۶ و ۷ به ترتیب نمودارهای مربوط به کیفی سازی پارامترهای جرم، اوریفیس، سرعت و ویسکوزیته سیال عامل با استفاده از روش تابع گوسین نشان داده شده است.



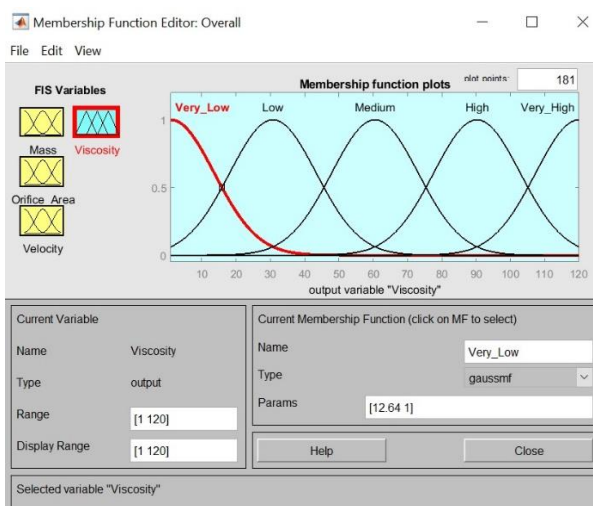
شکل ۴. روند کیفی سازی جرم جسم برخوردکننده در سیستم کنترل فازی ضربه‌گیر هیدرولیک



شکل ۵. روند کیفی سازی مجموع مساحت های خروجی روغن(اوریفیس) در سیستم کنترل فازی ضربه‌گیر هیدرولیک

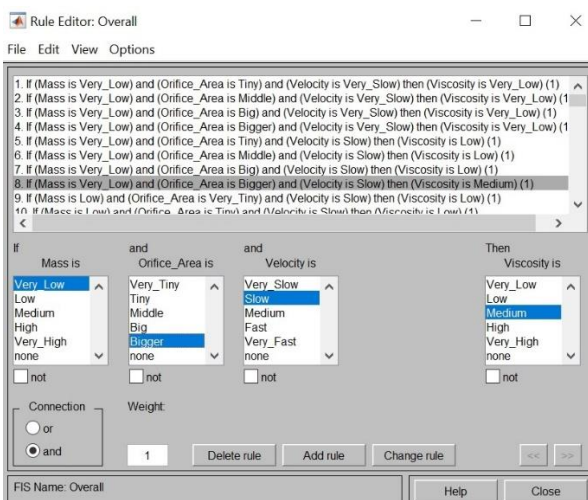


شکل ۶. روند کیفی سازی سرعت جسم برخوردکننده در سیستم کنترل فازی ضربه گیر هیدرولیک



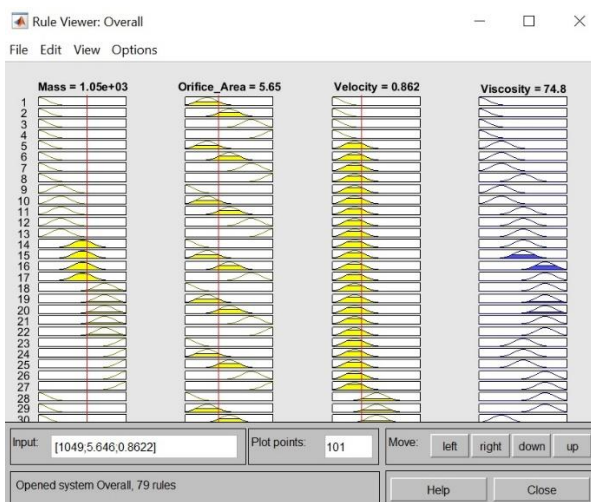
شکل ۷. روند کیفی سازی ویسکوزیته سیال عامل در سیستم کنترل فازی ضربه گیر هیدرولیک

در ادامه قوانین فازی مربوط به سیستم ضربه گیر هیدرولیک مورد مطالعه از محاسبات و فرمول های گسسته مورد نیاز نوشته می شود. در شکل ۸ قوانین فازی در بخش سیمپولینک محیط نرم افزار متلب نشان داده شده است.



شکل ۸. قوانین فازی سیستم کنترل فازی ضربه گیر هیدرولیک در Simulink متلب

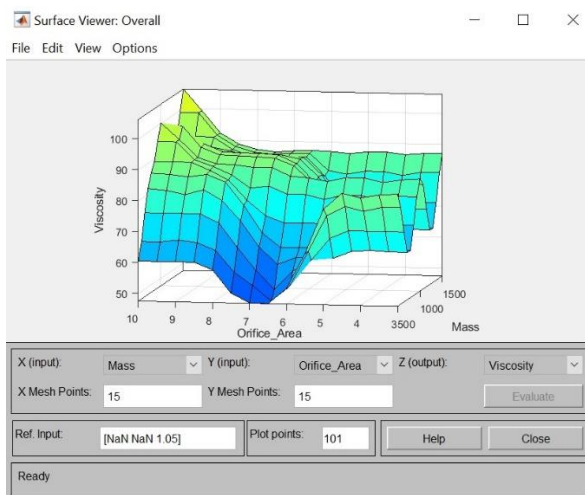
همچنین در شکل ۹، قوانین فازی در نظر گرفته شده بین پارامترهای موثر در عملکرد ضربه گیر هیدرولیک در قالب نمودار نشان داده شده است.



شکل ۹. فرمت نموداری قوانین فازی سیستم کنترل فازی ضربه گیر هیدرولیک در Simulink متلب

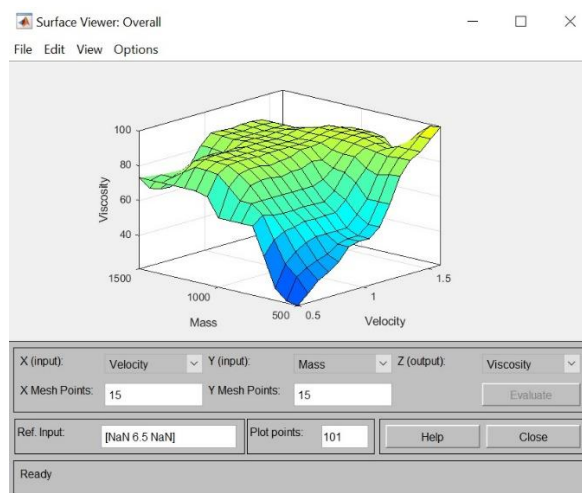
یادآور می شود هدف از بررسی همزمان پارامترهای موثر در عملکرد میراگر هیدرولیک، دستیابی به شرایطی است که با وجود تغییرات پارامترهای ورودی، ویسکوزیته سیال عامل به میزانی باشد که شتاب توقف جسم برخوردکننده به ضربه گیر نزدیک به حداکثر مجاز استاندارد (g) باشد. در واقع برای یک جسم برخوردکننده به ضربه گیر که دارای جرم و سرعت برخورد مشخصی است، با توجه به اینکه مجموع مساحت های خروجی روغن(اوریفیس) در حال کاهش می باشد، میزان ویسکوزیته سیال عامل موجود در ضربه گیر در هر لحظه چه میزانی باید باشد که شتاب توقف جسم برخوردکننده به ضربه گیر نزدیک به حد مجاز شتاب توقف (برابر با شتاب جاذبه زمین) باشد تا در چنین شرایطی امکان دستیابی به حداکثر بهره وری و قابلیت اطمینان سیستم ضربه گیر میسر گردد[۱۱].

در شکل ۱۰ تغییرات ویسکوزیته سیال عامل متناسب با کاهش مساحت خروجی روغن(اوریفیس) و تغییرات جرم نشان داده شده است. همانطور که در نمودار مشخص است جهت دستیابی به حداکثر شتاب توقف مجاز، در لحظه برخورد و با کاهش مساحت خروجی روغن، ویسکوزیته سیال عامل می بایست کاهش یابد و به مرور زمان ویسکوزیته افزایش یافته است. این خاصیت تغییرات ویسکوزیته سیال را می توان در سیالات غیرنیوتنی رقیق شونده جستجو کرد. لذا مطابق با نتایج بدست آمده می توان با استفاده از سیالات غیرنیوتنی رقیق شونده و یا سیالات ویسکوالاستیک عملاً با کنترل میزان ویسکوزیته و سفتی سیال عامل، بر روی رفتار ضربه گیر در زمان برخورد جسم کنترل داشت و با حداکثر مجاز شتاب توقف ارتعاشات را به حداقل رساند.



شکل ۱۰. نمودار سه بعدی تغییرات ویسکوزیته نسبت به مساحت اوریفیس و جرم جسم برخورد کننده به ضربه گیر هیدرولیک

در شکل ۱۱ نمودار سه بعدی تغییرات ویسکوزیته سیال عامل نسبت به جرم و سرعت جسم برخوردکننده نشان داده شده است.



شکل ۱۱. نمودار سه بعدی تغییرات ویسکوزیته نسبت به جرم و سرعت جسم برخورد کننده به ضربه گیر هیدرولیک

لذا بر اساس اطلاعات بدست آمده از نتایج فوق، برای دستیابی به شتاب توقف g (۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه) می‌بایست ویسکوزیته سیال در ابتدا تا حدود ۵۰ سانتی استوک کاهش یافته و با ادامه روند دمپینگ ویسکوزیته به مرور افزایش یابد تا نهایتاً جسم برخورد کننده متوقف شود. لازم بذکر است نتایج بدست آمده برای ضربه گیری با مشخصات مورد بررسی در این تحقیق (سرعت و جرم جسم برخورد کننده و مساحت اوریفیس) می‌باشد و واضح است که با تغییر مشخصات فنی ضربه گیر، نتایج نیز تغییر می‌کند و احتمالاً در ویسکوزیته متفاوت به شتاب توقف نزدیک به عدد g خواهیم رسید. در این تحقیق با استفاده از نتایج بدست آمده از سیستم کنترل فازی، ویسکوزیته مورد نیاز جهت دستیابی به شتاب توقف مطلوب بر اساس پارامترهای مربوط به مساحت خروجی اوریفیس، جرم و سرعت جسم برخورد کننده بدست آمده و سپس در آزمایشگاه پلیمر، سیال عامل ویسکوالاستیک بر اساس اطلاعات مربوطه ساخته شده است. پس از ساخت نمونه سیال ویسکوالاستیک آزمایشگاهی نسبت به تست عملکرد ضربه گیر در صورت استفاده از سیال مذکور به عنوان سیال عامل و ثبت نتایج و اثربخشی آن سیال اقدام شده است. لازم بذکر است تغییر میزان درصد پلیمر اضافه شده به حلال، می‌تواند به شدت بر خواص سیال ویسکوالاستیک تاثیر داشته باشد و لذا تولید طیف گسترده سیال ویسکوالاستیک و تست عملکرد هر یک از آنها در ضربه گیرهای هیدرولیک، در عمل بسیار زمانبر و پرهزینه خواهد بود. لذا منطقی می‌باشد ابتدا نسبت به دستیابی به خواص سیال ویسکوالاستیک مورد نظر به عنوان سیال عامل ضربه گیر، از طریق حل معادلات رفتار سیال و یا مدل سازی در محیط نرم افزارهای تخصصی سیالات پرداخته شود و پس از دستیابی به بهترین عملکرد، تولید و ساخت سیال با مشخصات فیزیکی مشخص شده آغاز شود و در نهایت نسبت به تست آزمایشگاهی سیال در ضربه گیر ساخته شده در آزمایشگاه تخصصی اقدام شود. لازم بذکر است همانطور که پیش از این مورد اشاره قرار گرفت، نوشتن و حل معادلات حاکم بر رفتار ضربه گیر با حضور سیال غیرنیوتنی و یا مدل سازی آن در فضای نرم افزاری، بسیار دشوار و همراه با خطا ساده سازی خواهد بود و لذا در این پژوهش به شکل نوآورانه از روش سیستم های کنترل فازی جهت دستیابی به خواص سیال مورد نظر پرداخته شده است [۱۳]. این فرآیند با توجه به گسترده بودن اقدامات پژوهشی مربوط به ساخت ضربه گیر، استفاده از روش های سیستم کنترل فازی، ساخت سیال عامل ویسکوالاستیک و نهایتاً تست آزمایشگاهی جهت کنترل صحت نتایج بدست آمده، می‌توان گفت که برای اولین بار در فضای علم رئولوژی در دنیا انجام شده است.

یادآور می‌شود که مجموعه ای از عوامل و پارامترها در رفتار ضربه گیرهای هیدرولیک با سیال عامل ویسکوالاستیک، تاثیر گذار است. این عوامل را می‌توان به دو دسته فیزیکی و ظاهری ضربه گیر (مساحت پیستون، مجموع مساحت های عبوری روغن، سرعت برخورد جسم بر پیستون، وزن اعمال شده بر سر پیستون) و پارامترهای مربوط به سیال عامل ضربه گیر (دانسیته سیال، ویسکوزیته یا لزجت سیال، الاستیسیته سیال) تقسیم بندی کرد. در عمل بررسی همزمان تاثیر تمامی پارامترهای مذکور بسیار پیچیده و حتی غیر ممکن می‌باشد و لازم است بصورت جداگانه تاثیر پارامترها بر رفتار ضربه گیر و شتاب توقف در زمان برخورد ضربه مورد بررسی قرار گرفته شود. در چنین شرایطی استفاده از روش های مدل سازی فازی در پیچیده ای تازه برای بررسی تاثیر پارامترهای درگیر در رفتار سیال و به تبعیت از آن شتاب توقف جسم برخورد کننده به ضربه گیر را در پیش رو می‌گشاید.

یافته های پژوهش

در ادامه با استفاده از نتایج حاصل شده از مدل سازی فازی و دستیابی به ویسکوزیته بهینه، نسبت به ساخت روغن (سیال عامل ویسکوالاستیک) و انجام تست ضربه گیرهای هیدرولیک در محیط آزمایشگاه جهت کنترل صحت نتایج بدست آمده و اعتبار سنجی آنها پرداخته شده است. در شکل ۱۲، تصاویر مربوط به برج تست آسانسور جهت شبیه سازی برخورد جسم به ضربه گیر نشان داده شده است. سنسورهای دقیق و کاملاً کالیبره جهت ثبت مکان، سرعت و شتاب جسم برخورد کننده در هر لحظه، در محل مناسب تعبیه شده است تا نتایج مورد نیاز ثبت گردند.



شکل ۱۲. برج تست آسانسور شرکت بازرسی ISQI واقع در کردان کرک

پس از انجام تست های مربوط به جرم های مختلف جسم برخورد کننده (۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم) که با سرعت های مختلف (۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه) به ضربه گیر برخورد می نماید، نتایج حاصل از استفاده از سیال ویسکوالاستیک در مقایسه با سیال هیدرولیک با ویسکوزیته ثابت در جداول زیر نشان داده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که در صورت استفاده از سیال ویسکوالاستیک به طور شگفت انگیزی کارایی ضربه گیر افزایش یافته و عملاً با وجود افزایش شتاب توقف متوسط، شوک حرکتی در لحظه برخورد کاهش یافته است.

نتایج بدست آمده در صورت استفاده از سیال نیوتنی (ویسکوزیته ثابت) در ضربه گیر هیدرولیک به شرح جداول زیر ارائه شده است.

سرعت برخورد ۰/۵ متر بر ثانیه

ردیف	جرم (kg)	سرعت برخورد (m/s)	حداکثر سرعت (m/s)	شتاب متوسط (m/s ²)	حداکثر شتاب (m/s ²)	مسافت طی شده (cm)
۱	۱۵۰۰	۰/۷۹۲	۱/۲۴۶	۰/۳۸	۲/۱	۱۲
۲	۱۰۰۰	۰/۷۷۷	۱/۳۵۶	۰/۳۲	۲/۰	۱۱/۸
۳	۵۰۰	۰/۷۲۲	۱/۳۸۳	۰/۳۶	۴/۷	۱۳

سرعت برخورد ۱ متر بر ثانیه

ردیف	جرم (kg)	سرعت برخورد (m/s)	حداکثر سرعت (m/s)	شتاب متوسط (m/s ²)	حداکثر شتاب (m/s ²)	مسافت طی شده (cm)
۱	۱۵۰۰	۰/۹۶۷	۱/۳۹۳	۰/۴۹	۲/۲	۱۳
۲	۱۰۰۰	۰/۹۸۷	۱/۳۹۷	۰/۴۱	۲/۶	۱۲/۸
۳	۵۰۰	۰/۹۴۳	۱/۴۹۵	۰/۴۱	۴/۷	۱۳/۲

سرعت برخورد ۱/۵ متر بر ثانیه

ردیف	جرم (kg)	سرعت برخورد (m/s)	حداکثر سرعت (m/s)	شتاب متوسط (m/s ²)	حداکثر شتاب (m/s ²)	مسافت طی شده (cm)
۱	۱۵۰۰	۱/۴۶۶	۱/۷۵۹	۰/۸۰	۲/۸	۱۲/۶
۲	۱۰۰۰	۱/۴۴۱	۱/۷۳۹	۰/۷۵	۴/۱	۱۲/۵
۳	۵۰۰	۱/۴۷۶	۱/۷۰۰	۰/۳۲	۵/۱	۱۳

نتایج بدست آمده در صورت استفاده از سیال غیرنیوتنی (ویسکوزیته متغیر) در ضربه گیر هیدرولیک به شرح جداول زیر ارائه شده است.

سرعت برخورد ۰/۵ متر بر ثانیه

ردیف	جرم (kg)	سرعت برخورد (m/s)	حداکثر سرعت (m/s)	شتاب متوسط (m/s ²)	حداکثر شتاب (m/s ²)	مسافت طی شده (cm)
۱	۱۵۰۰	۰/۷۳۸	۱/۰۰۷	۰/۳۳	۱/۴	۱۰/۵
۲	۱۰۰۰	۰/۷۷۷	۱/۰۳۶	۰/۲۹	۱/۱	۱۰/۱
۳	۵۰۰	۰/۶۷۴	۰/۹۲۸	۰/۱۸	۱/۳	۱۰

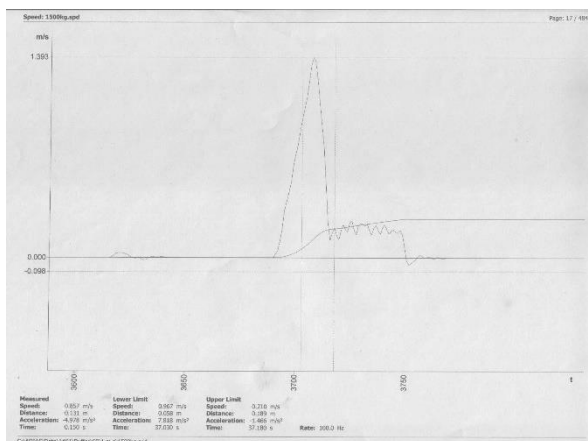
سرعت برخورد ۱ متر بر ثانیه

ردیف	جرم (kg)	سرعت برخورد (m/s)	حداکثر سرعت (m/s)	شتاب متوسط (m/s ²)	حداکثر شتاب (m/s ²)	مسافت طی شده (cm)
۱	۱۵۰۰	۱/۰۳۱	۱/۱۰۴	۰/۵۰	۱/۴	۱۰/۶
۲	۱۰۰۰	۱/۰۵۵	۱/۳۵۸	۰/۶۷	۲/۱	۱۰/۳
۳	۵۰۰	۰/۹۷۷	۱/۰۹۹	۰/۳۲	۱/۵	۹/۲

سرعت برخورد ۱/۵ متر بر ثانیه

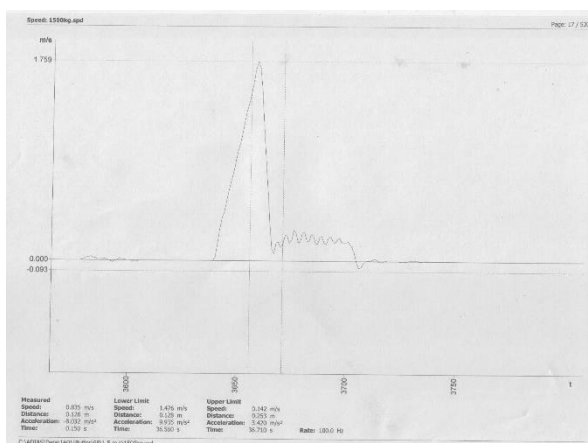
ردیف	جرم (kg)	سرعت برخورد (m/s)	حداکثر سرعت (m/s)	شتاب متوسط (m/s ²)	حداکثر شتاب (m/s ²)	مسافت طی شده (cm)
۱	۱۵۰۰	۱/۴۶۶	۱/۶۰۳	۰/۹۵	۲/۵	۱۱/۳
۲	۱۰۰۰	۱/۴۶۱	۱/۷۱۵	۰/۸۹	۳/۷	۱۱/۲
۳	۵۰۰	۱/۳۸۸	۱/۵۳۹	۰/۶۲	۳/۴	۱۰

منحنی های حرکت جسم برخورد کننده به ضربه گیر در ادامه نشان داده شده است. لازم بذکر است سنسورهای فوق حساس تعبیه شده در مسیر حرکت جسم برخورد کننده به ضربه گیر بصورت دقیق ارتعاشات آن را ثبت و در هر لحظه موقعیت، سرعت و شتاب را ثبت می نمایند. در شکل ۱۳ نمودار حرکتی جسم برخورد کننده با وزن ۱۵۰۰ کیلوگرم و با سرعت ۱ متر بر ثانیه در حالتی که از روغن به عنوان سیال عامل در ضربه گیر استفاده شده است، نشان داده شده است.



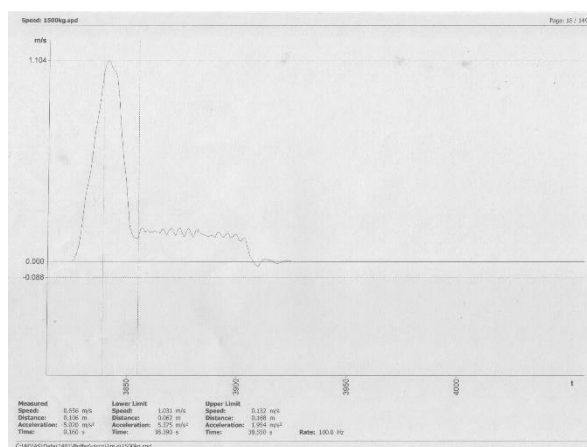
شکل ۱۳. نمودار حرکتی (1500kg, 1m/s, Oil)

در شکل ۱۴ نمودار حرکتی جسم برخورد کننده با وزن ۱۵۰۰ کیلوگرم و با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه در حالتی که از روغن به عنوان سیال عامل در ضربه گیر استفاده شده است، نشان داده شده است.



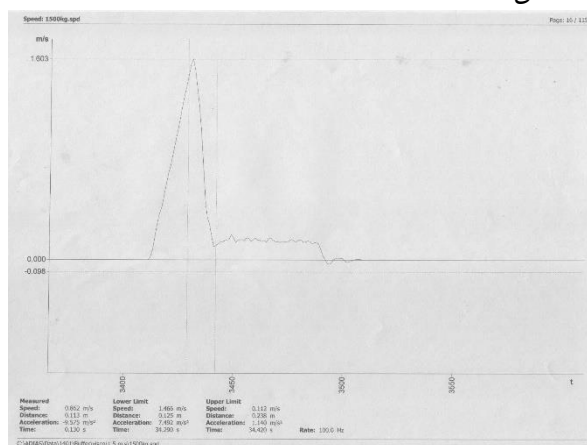
شکل ۱۴. نمودار حرکتی (1500kg, 1.5m/s, Oil)

در شکل ۱۵ نمودار حرکتی جسم برخورد کننده با وزن ۱۵۰۰ کیلوگرم و با سرعت ۱ متر بر ثانیه در حالتی که از سیال ویسکوالاستیک به عنوان سیال عامل در ضربه گیر استفاده شده است، نشان داده شده است.



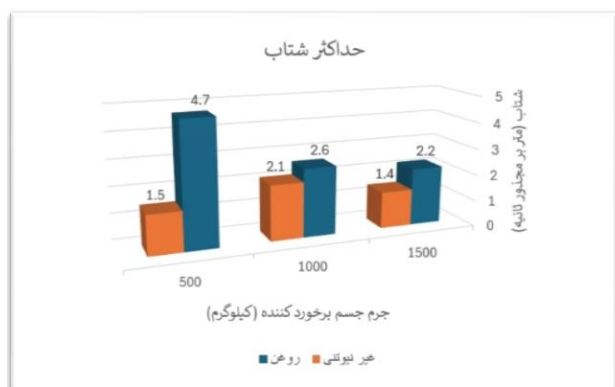
شکل ۱۵. نمودار حرکتی (1500kg, 1m/s, Viscoelastic)

در شکل ۱۶ نمودار حرکتی جسم برخورد کننده با وزن ۱۵۰۰ کیلوگرم و با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه در حالتی که از سیال ویسکوالاستیک به عنوان سیال عامل در ضربه گیر استفاده شده است، نشان داده شده است.

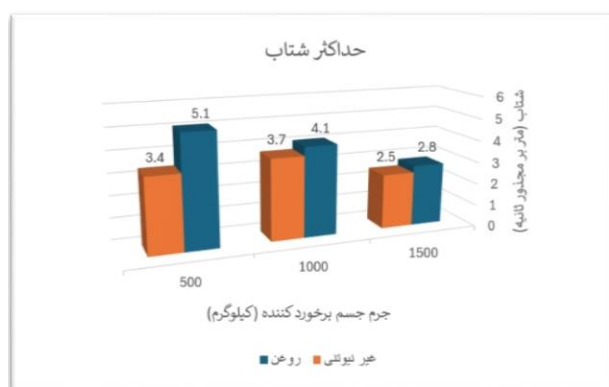


شکل ۱۶. نمودار حرکتی (1500kg, 1.5m/s, Viscoelastic)

برای بررسی دقیق تر نتایج بدست آمده، در ادامه نمودارهای مقایسه ای مربوط به حداکثر شتاب، شتاب متوسط، مسافت توقف و حداکثر سرعت نشان داده شده است. مقایسه حداکثر شتاب توقف:

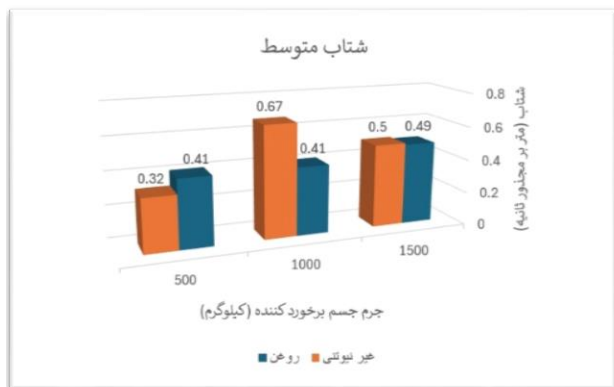


سرعت برخورد ۱ متر بر ثانیه

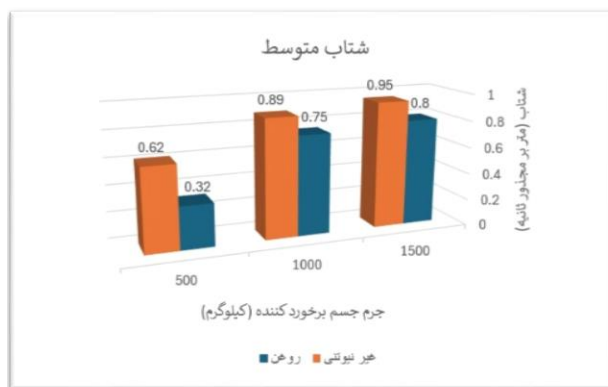


سرعت برخورد ۱/۵ متر بر ثانیه

مقایسه شتاب متوسط توقف:

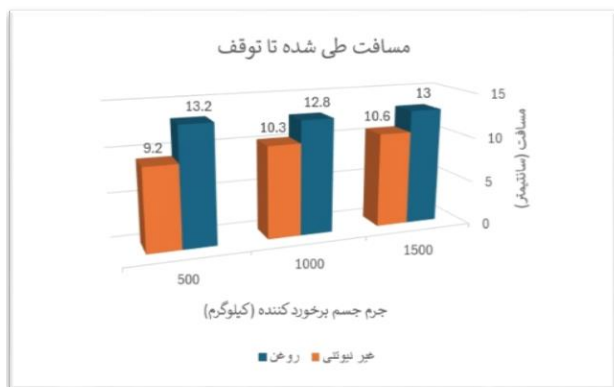


سرعت برخورد ۱ متر بر ثانیه

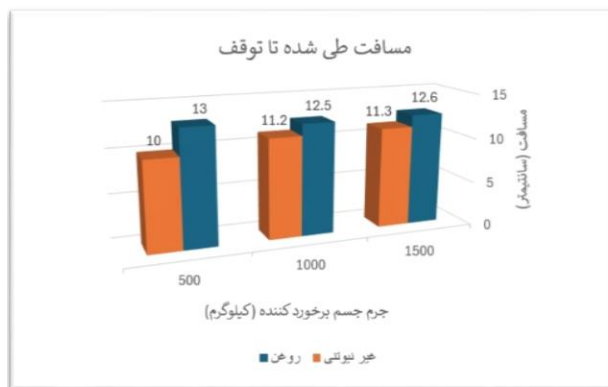


سرعت برخورد ۱/۵ متر بر ثانیه

مقایسه مسافت توقف:

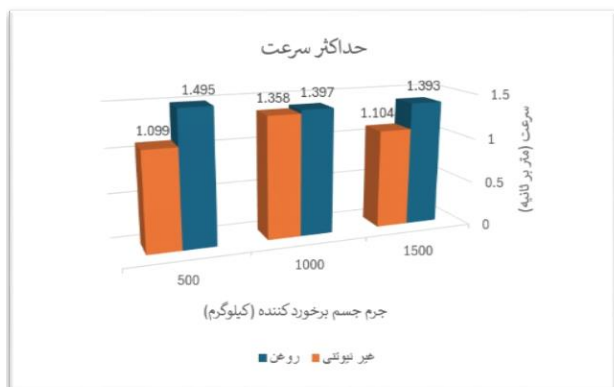


سرعت برخورد ۱ متر بر ثانیه



سرعت برخورد ۱/۵ متر بر ثانیه

مقایسه حداکثر سرعت:



سرعت برخورد ۱ متر بر ثانیه



سرعت برخورد ۱/۵ متر بر ثانیه

نتیجه گیری

در ابتدا مدل های مختلف دمپر و کاربرد آنها معرفی گردید سپس بمنظور بررسی رفتار دینامیکی دمپرهای ویسکوالاستیک به حل معادلات حاکم بر جریان آن پرداخته شد. کاربرد سیستم های دینامیکی مرتبه پایین برای جریان کوئت صفحه ای سیالات ویسکوالاستیک بیان شده است. با توجه به پیچیدگی های معادله اساسی و وجود روابط پیچیده بین اینرسی سیال و الاستیسیته، تنها اغتشاش یک بعدی در اینجا در نظر گرفته شده است. در ادامه به تجزیه و تحلیل مفاهیم اصلی رفتار دینامیکی ضربه گیرهای هیدرولیک پرداخته شد. ابتدا به معرفی انواع میراگرها و ضربه گیرهای صنعتی پرداخته و سپس به ساختار درونی و نحوه عملکرد آنها در کنترل ضربه های ناشی از برخورد اجسام اشاره شده است. مشخصات سیال عامل موجود در ضربه

گیرهای هیدرولیک به عنوان یکی از پارامترهای موثر در رفتار دینامیکی آنها مورد توجه قرار گرفته است. با انجام آزمون روی نمونه‌های ساخته شده، مشخص گردید که با استفاده از سیال‌های غیرنیوتنی ویسکوالاستیک می‌توان شرایطی را فراهم نمود که شتاب توقف جسم برخورد کننده به ضربه گیر نزدیک به حداکثر شتاب مجاز استاندارد (g) قرار گیرد و با طی حداقل مسافت ممکن متوقف شود. در چنین شرایطی می‌توان به عملکرد مطلوب در ضربه‌گیرهای هیدرولیک دست یافت و قابلیت اطمینان را بطور چشم‌گیری افزایش داد.

در این پژوهش با بکارگیری نوآورانه از روش مدل‌سازی فازی و با داشتن پارامترهای مربوط به جرم و سرعت جسم برخوردکننده به ضربه گیر و همچنین مساحت روزه‌های خروج روغن (اوریفیس)، مقدار ویسکوزیته مورد نیاز جهت دستیابی به حداکثر شتاب توقف (g) را برآورد کرده و سپس با داشتن اطلاعات مربوط به ویسکوزیته سیال در هر لحظه، نسبت به ساخت آن در آزمایشگاه پلیمر اقدام شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که دمپر ویسکوالاستیک فازی می‌تواند تا ۳۰ درصد شرایط دمپینگ و کاهش نوسانات را نسبت به دمپرهای سنتی بهبود ببخشد.

در آخر برای کنترل اثر بخشی سیال عامل ساخته شده در بهبود عملکرد ضربه گیرهای هیدرولیک، نسبت به انجام آزمایش‌های دقیق و مقایسه نتایج آن با شرایط استفاده از روغن هیدرولیک با ویسکوزیته ثابت پرداخته شده است. لازم بذکر است که پس از تحلیل نتایج بدست آمده، به صراحت مشخص گردید که در زمان استفاده از سیال عامل ویسکوالاستیک، حداکثر شتاب توقف (شوک اولیه) کاهش یافته است. این در حالی است که شتاب متوسط توقف افزایش یافته که بیانگر کاهش مسافت طی شده می‌باشد. لذا در چنین شرایطی بهره‌وری و قابلیت اطمینان ضربه گیر بطور چشم‌گیری افزایش یافته است.

References

- Ashrafi, N., and et al. (2019). A numerical study on nonlinear dynamics of oscillatory time-depended viscoelastic flow between infinite parallel plates: utilization of symmetric and antisymmetric Chandrasekhar functions. *Heliyon*, 5, e02647.
- Chang TS, Singh MP. Mechanical model parameters for viscoelastic damper. *J Eng Mech* 2009;135:581-4.
- Christensen, R.M., 1982. *Theory of Viscoelasticity*, second ed. Academic Press, New York.
- De Domenico, D., Ricciardi, G., Takewaki, I. (2019). Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 118, 144-165.
- Gemant, A., 1938. On fractional differentials. *Philos. Mag.* 25, 540-549.
- Ishikawa, S., and et al. (2020). Design of a disc-shaped viscoelastic damping material attached to a cylindrical pipe as a dynamic absorber or Houde damper. *Journal of Sound and Vibration*, 475, 115272.
- Jaboviste, K., and et al. (2019). On the compromise between performance and robustness for viscoelastic damped structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 119, 65-80.
- Janovsky, Lubomir. 1992. *Elevator Mechanical Design*, Second Edition. Ellis Horwood Series in Mechanical Engineering.
- Mastroddi, F., and et al. (2019). Time- and frequency-domain linear viscoelastic modeling of highly damped aerospace structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 122, 42-55.
- S.W. Park., 2001, Analytical modeling of viscoelastic dampers for structural and vibration control, *International Journal of Solids and Structures*, 38, 8065-8092.
- Schapery, R.A., 1974. Viscoelastic behavior and analysis of composite materials. In: Sendeckyj, G.P. (Ed.), *In Mechanics of Composite Materials*, vol. 2, Academic Press, New York, pp. 85-168.
- Tschoegl, N.W., 1989. *The Phenomenological Theory of Linear Viscoelastic Behavior*. Springer, Berlin.
- Zhang, L., and et al. (2019). A design method of viscoelastic damper parameters based on the elastic-plastic response reduction curve. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117, 149-163.