بررسی حلقه باز اثر میراکننده سیّال مغناطیسی در سیستم تعلیق یک چهارم خودرو

علیرضا محمودی فرد [۱] alireza10.mahmoodifrd@gmail.com
جواد شریفی [۲] sharifi@qut.ac.ir
سینا محمدی [۳] msm.1370@yahoo.com
[۱] فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، کنترل، دانشگاه صنعتی قم، دانشکده مهندسی برق، قم، ایران
[۲] استادیار دانشگاه صنعتی قم، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، قم، ایران
[۳] فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق کنترل، دانشگاه صنعتی قم، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، قم، ایران

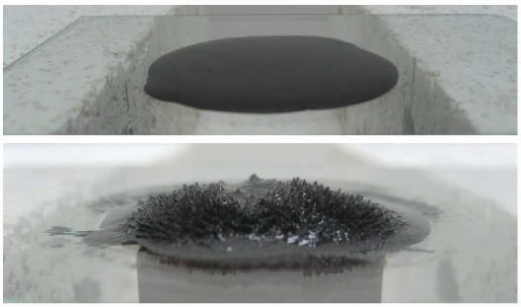
چکیده: میراگرهای بر پایه سیّال MR تحت‌تاثیر میدان الکترومغناطیسی واکنش نشان داده و ضریب ویسکوزیته متغیر ایجاد می‌کنند. این میراگرها در سیستم تعلیق خودروهای پیشرفته نقش بسزایی دارند. مدل بیشتر این میراگرها، نوعی مدل نیروی اصطکاکی غیرخطی هستند. در این مقاله مدل سیستم تعلیق براساس میراگر بدون سیّال مغناطیسی MR بر اساس دو مدل بینگهام و بوک‌ون و با وجود آن مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: *میراگر، سیّال مغناطیسی، مدل بینگهام، مدل بوک‌ون، سیستم تعلیق خودرو*

مقدمه

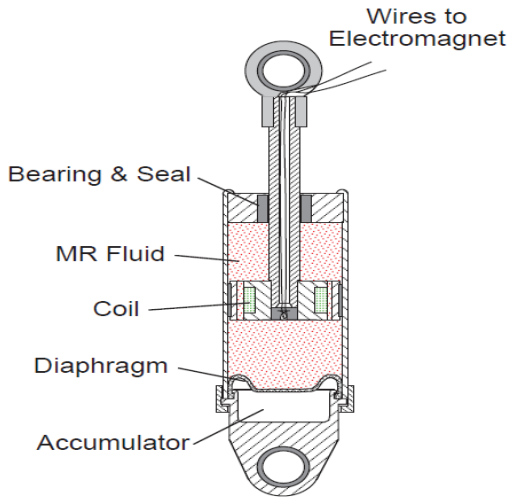
با پیشرفت علم استفاده از مواد مغناطیسی، در سال‌های اخیر استفاده از میراگرهای فعال و نیمه فعال در صنعت به شدت گسترش یافته است و میراگرهای مغناطیسی به کرات مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش کنترل نیمه‌فعال، نیرویی که تجهیزات کنترل نیمه فعال ایجاد می‌کنند، یک نیروی مقاوم بوده و با صرف انرژی کمی (برای مثال در حد یک باتری برای میراگرهای سیال مغناطیسی MR) در یک فرآیند هوشمند، در سیستم تغییراتی ایجاد می‌کنند تا قسمتی از انرژی حاصل جذب شود. روش کنترل نیمه‌فعال به‌دلیل انعطاف و کارایی بالا و نیازمندی کمتر به منابع انرژی، به سرعت در حال توسعه است. یکی از پرکاربردترین وسایل مورد استفاده برای کنترل نیمه‌فعال، میراگرهای MR می‌باشند که از پیستون، سیلندر حاوی سیال MR، سیم‌پیچ و انباشت‌گر تشکیل می‌شوند. تاکنون مدل‌های مختلفی برای رفتار دینامیکی غیرخطی میراگر MR، از قبیل مدل Bingham، Gamota and Filisko، Bouc-Wen و Modified Bouc-Wen بیان شده است. برای طراحی کنترل‌گر بدون دخیل کردن پیچیدگی های مربوط به غیرخطی بودن معادلات دیفرانسیلیِ رفتار دینامیکی میراگر، چندین روش پیشنهاد شده است که در همه آن‌ها دو نکته لحاظ شده‌اند: اول اینکه، جهت نیروی ایجاد شده توسط میراگر، خلاف جهت سرعت نسبی دو انتهای میراگر می‌باشد و دوم، تغییرات نیروی ایجاد شده در مقابل تغییرات ولتاژ، آنی نبوده و به‌شکلی نرم صورت می‌گیرد. همچنین روش‌های جدیدتری ارائه شده است که ابتدا نیروی مورد نیاز به یکی از روش‌های معمول به‌دست آورده می‌شود و سپس از مدل معکوس میراگر برای محاسبه ولتاژ متناظر استفاده می شود. انواع مختلفی از شبکه‌های عصبی و شبکه‌های عصبی- فازی با معماری‌های مختلف و روش‌های متفاوت برای تنظیم پارامترهای موجود در آن‌ها توسط محققان برای بیان

عددی مدل مستقیم و مدل معکوس میراگر، ارائه شده است. سیال MR از ذرات الکترومغناطیسی با اندازه میکرونی تشکیل شده است. این‌ها زمانی که در معرض یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، این ذرات پلاریزه شده و مطابق با خطوط میدان مغناطیسی جذب هم می‌شوند؛ در نتیجه در زنجیره ذرات داخل سیال قرار گرفته و با افزایش ویسکوزیته سیال همراه است؛ بنابراین سیال از مایع به یک مانند چسب مانند شبیه کره بادام زمینی به‌سرعت(در حد میلی‌ثانیه) تبدیل می شود که قابل برگشت نیز است؛ سیال زیر در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه چنگ کونگ تایوان ساخته شده است؛ اندازه ذرات مغناطیسی آن به‌طور متوسط دارای قطر ۷ میکرومتر است؛ مایع حامل چسب سیلیکون ۱۰۰۰ است؛ یک افزودنی اختصاصی فعال در سطح برای نگهداری ذرات غوطه‌ور مغناطیسی پذیرفته شده است، به‌طوری‌که ظاهر این سیال MR حتی خاکستری تیره («شکل ۱») است که حساس به میدان مغناطیسی هم است.



شکل۱: سیال MR بر روی برروی تکه‌های پلاستیک بدون آهنربایش و با استفاده از آن [۱]

با استفاده از سیّال MR برای فراهم کردن نیروی دمپی قابل کنترل، میراگر MR نوعی از وسایل کنترلی نیمه فعال است؛ این دمپر برای کاربردهای مهندسی نسبتا قابل اطمینان است؛ چون ویژگی‌های جذابی ازقبیل نیاز به توان اندک، قابلیت اطمینان و عدم گران بودن برای تولید دارد. این میراگر، اولین مدل ساخته شده تو سعه یافته در این دانشگاه است. و سیله کنترلی نیمه فعال دمپر MR معمولا از و سیله کنترلی غیرفعال سیال دمپر به‌دست می‌آید. میراگرهای تصویر زیر، میراگرهای طراحی و تولید شده در هفت سال پیش هستند. یک لامپ پلاستیکی سیم لعاب‌دار برای ایجاد میدان مغناطیسی طراحی شده است. این یک ذره خاص دمپر MR توسعه‌یافته است. در «شکل ۲» ساختاری ساده از میراگر مغناطیسی MR ارائه شده است.



شکل۲: ساختار میراگرهای MR [۲]

سیال رئومغناطیسی گونه‌ای سوسپانسیون است که در آن ذرات ریز جامد مغناطیسی به قطر تقریبی ۱۰ نانومتر در مایعی (معمولا روغن) شناور است.

آهنربای سیال ابتدا در سال ۱۹۶۰ در سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا ناسا، هنگامی‌که محققان روش‌های گوناگون کنترل مایع در فضا را بررسی می‌کردند، کشف شد؛ مزایای آهنربای سیال به‌سرعت شناخته شد؛ با آهنربای سیال می‌توان موقعیت سیال رئومغناطیسی را از طریق مصرف آهنی تشخیص داد و با تغییر میدان مغناطیسی آن می‌توان مایع را مجبور به جاری شدن کرد.

روش تهیه: سیالات مغناطیسی یا فرو فلویدها، سوسپانسیون‌های(محلول جامد در مایع) کلوییدی از نانو ذرات مغناطیسی هستند که نسبت به میدان مغناطیسی خارجی واکنش نشان می‌دهند؛ این امر سبب می‌گردد که محل قرار گرفتن این محلول را از طریق به‌کارگیری یک میدان مغناطیسی کنترل کرد. نانو ذرات مغناطیسی Fe_3O_4 را می‌توان از طریق مخلوط کردن نمک‌های آهن II و III در یک محلول پایه به دست آورد؛ برای تهیه این محلول ضروری است که ذرات، اندازه کوچک خود را حفظ کرده و به یک‌دیگر نپیوندند تا مخلوط به‌صورت سوسپانسیون باقی

بماند؛ برای این منظور از دسته دیگری از مواد به نام سورفکتانت استفاده می‌شود که مانع نزدیک شدن بیش از اندازه ذرات به یکدیگر می‌گردند. زمانی که یک سیال مغناطیسی در مجاورت یک مغناطیس قوی قرار می‌گیرد، تصویری زیبا از ذرات سوزنی به نمایش گذا شته می شود. این نوع لرزه‌گیر بر پایه تغییر ویسکوزیته مورد استفاده در آن برای تغییر پارامترهای لرزه‌گیر عمل می‌کند. سیال به‌کار رفته در این لرزه‌گیر دارای ویژگی لزجت وابسته به میدان مغناطیسی ا ست؛ با پیچیدن سیم فلزی دور میله پیستون لرزه‌گیر و عبور جریان الکتریکی از این سیم پیچ، می‌توان میدان مغناطیسی در محفظه به‌وجود آورد و با تغییر جریان الکتریسیته، میدان مغناطیسی و در نتیجه لزجت سیال را تغییر داد. مقدار جریان الکتریسیته سیم‌پیچ به‌وسیله واحد کنترل الکتریکی بر مبنای پارامترهای اندازه‌گیری شده به‌وسیله سنسورها محاسبه می‌شود؛ در این نوع از لرزه‌گیرها دیگر از دریچه‌هایی استفاده نمی شود و لرزه‌گیر تنها یک سیلندر و پیستون ساده ا ست؛ طیف تنظیمات این نوع لرزه‌گیر خیلی بیشتر از انواع دیگر بوده و همچنین به سبب عدم جریان سیال در آن‌ها بسیار کم صدا می‌باشد.

اصلی‌ترین سازنده سیستم‌های تعلیق بر پایه این نوع لرزه‌گیر شرکت دلفی می‌با شد و سی ستم تعلیق ساخته شده تو سط این شرکت تحت‌نام مگنا راید عرضه می‌شود؛ این سیستم نخستین سیستم تعلیق نیمه‌فعال می‌باشد که در آن هیچ نوع دریچه الکترومکانیکی و همچنین سوپاپ متحرک به‌کار نرفته است؛ همان‌طور که بیان شد این سیستم بر پایه کاربرد سیال مگنا راید در لرزه‌گیر طراحی و تولید شده است.

مواد مگ نارا ید شا مل ذرات میکروسکوپی از جنس مواد نرم مغناطیسی مانند آهن معلق در یک مایع از جنس هیدروکربن‌های مصنوعی می‌باشد؛ هنگامی که مایع مگنا راید در حالت خاموش قرار داشته باشد و به‌عبارت دیگر تحت‌تاثیر میدان مغناطیسی نباشد ذرات از یک الگوی اتفاقی پیروی می‌کنند؛ اما در حالت روشن بودن و یا مغناطیسی شدن، از ذرات رشته‌ای تشکیل می‌دهد که منجر به تبدیل وضعیت مایع به حالتی نزدیک به پلاستیک می‌گردد؛ با کنترل جریان عبوری از سیم‌پیچ الکترومغناطیسی درون لرزه‌گیر مقاومت بر شی مایع مگنا راید تغییر می‌یابد که این امر سبب تغییر ویسکوزیته مایع می‌گردد؛ با کنترل دقیق میدان مغناطیسی می‌توان ویسکوزیته مایع مگنا راید را میان کمینه مقدار آن تا حالتی نزدیک به صلبیت به دلخواه تغییر داد که نتیجه آن دست‌یابی به لرزه‌گیر با تغییرات پیوسته در زمان واقعی خواهد بود.

زیربخش‌های سیستم مگنا راید طراحی شده توسط دلفی به قرار زیر ا ست: ۱. واحد کنترل الکتریکی، ۲. ح سگرها(ح سگر زاویه فرمان- حسگر نرخ تغییرات چرخ زنی-حسگر اندازه‌گیری شتاب کناری- حسگر اندازه‌گیری موقعیت نسبی)، ۳. راه‌اندازها شامل چهار لرزه‌گیر مگنا راید برای هر چرخ، ۴. منبع جریان الکتریکی که همان باتری است.

سیستم اعلام نقص که در صورت بروز مشکل با روشن شدن چراغی راننده را از وجود اشکال در سیستم تعلیق مطلع می‌سازد

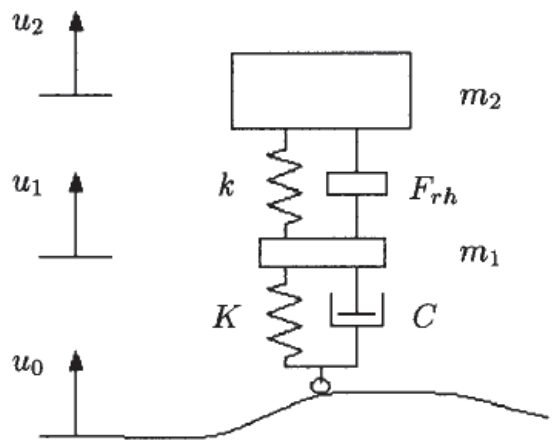
۱,۲ . مدل سیستم و مدل‌سازی میراگر MR

حال به بیان مدل سی ستم می‌پردازیم. در « شکل ۳» ، مدل تعلیق سیستم یک‌چهارم خودرو نشان داده شده است و معادلات آن به‌صورت (۱) است:

$$\begin{aligned} & m_1\dot{u}_1 = \\ & K(u_0-u_1)+C(\dot{u}_0-\dot{u}_1)+k(u_2-u_1)+F_{rh} \\ & m_2\dot{u}_2 = k(u_2-u_1)-F_{rh} \end{aligned} \quad (۱)$$

که در آن m_1 و m_2 اجرام محور و بدنه خودرو هستند، u_1 و u_2 معنی جابجایی عمودی خودرو، و u_0 اختلال جاده است. علاوه بر این، K و C نشان‌دهنده فنر و میرایی ثابت چرخ و تایر، K نشان‌دهنده سختی تعلیق و F_{rh} نیروی اعمال شده توسط دمپر MRF است.

پارامترهای جرم m_1=250 کیلوگرم و m_2=1300 کیلوگرم مورد استفاده برای شبیه‌سازی زیر به مقادیر متناظر یک اتوبوس کوچک و یا و سیله نقلیه می‌با شند. ضریب سختی K=650.000 N/m و میزان میرایی C=800 Ns/m از تایر، همچنین ثابت فنر k=110.000 N/m درنظر گرفته شده است. از سیستم تعلیق یک وسیله نقلیه زمینی معمولی اقتباس شده است. (مارگولیس و گشتا سب پور). معادلات فوق را بر مقادیر جرم تقسیم می‌نماییم و حاصل را در سیمولینک نرم افزار MATLAB رسم می‌کنیم.



شکل۳: مدل یک‌چهارم خودرو(مدل یک چرخ)

در مدل بینگهام یک دمپر MRF، نیروی تولید شـــده از (۲) قابل محاسبه می‌باشد[۳]:

$$F_{rh} = f_c sign(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + c_0(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) \quad (۲)$$

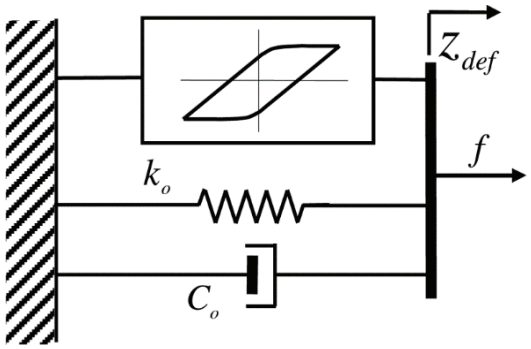
مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی بر اساس داده‌های تجربی برگرفته از تحقیقات اسپنسر و همکارانش است. مدل Bouc-Wen برای رفتار میراگر MR توسط Yi و همکاران به‌صورت معادلات زیر ارائه شده است[۴]:

$$F = c_0\dot{x} + k_0(x - x_0) + az \quad (۳)$$

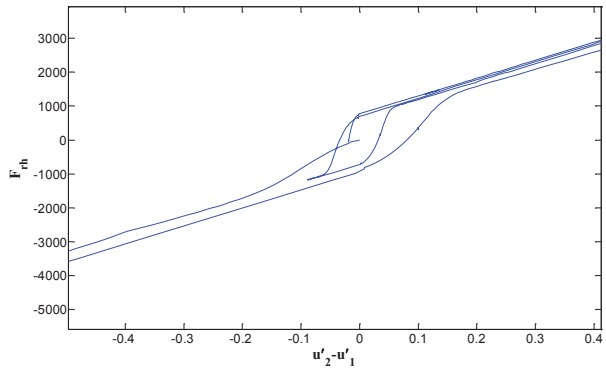
که این نیرو، در واقع نیروی تولید شده به‌وسیله این مدل است[۴]:

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + \delta\dot{x} \quad (۴)$$

که در آن f_{damper} نیروی ایجاد شده توسط میراگر، سرعت نسبی دو انتهای میراگر، u ولتاژ واقعی و V ولتاژ ورودی به میراگر اســـت. z متغیر مربوط به رفتار پسماندی می‌باشد که در واقع مشخص‌کننده حافظه‌دار بودن میراگر است. به‌عبارت دیگر این متغیر وضعیت های پیشین را در خود جای داده است. همان‌طور که در شکل زیر دیده می‌شـــود، نیروی میراگر در این مدل به شـــکل میرایی لزج و رفتار پسماندی Bouc-Wen که به‌صورت موازی کار می‌کنند، پیشنهاد شده است.



شکل۴: مدل مکانیکی میراگر MR در مدل‌سازی Bouc-Wen

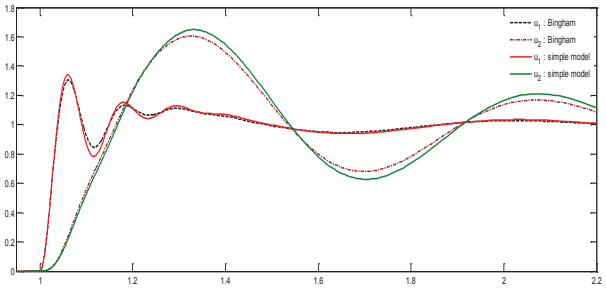


شکل۵: نمودار شبیه‌سازی پسماند نیرو برحسب سرعت در مدل بوکون

۳. نتیجه‌گیری

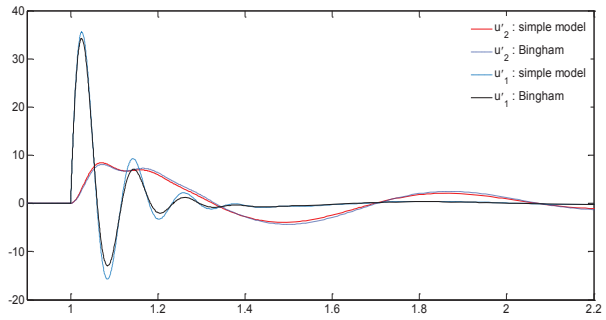
در مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی بر اساس داده‌های تجربی برگرفته از تحقیقات اسپنسر و همکارانش است. ثابت-های مورد استفاده در مدل بینگهام عبارتند از K=650000، k=110000، C=800، m_1=250، m_2=1300، f_c=670، c_0=5000.

همچنین در «شـــکل ۶» مقایســـه‌ای بین ســـرعت‌های(مشـــتقات جابجایی) مدل بینگهام و مدل ساده انجام گرفته است که می‌بینیم با استفاده از مدل بینگهام در قیاس با مدل ساده، تغییرات سرعت کمتری ایجاد می‌گردد؛ در ضمن، زمان نشست در مدل بینگهام به نسبت مدل ساده، کمتر می‌باشد که با این وجود، یعنی سیستم زودتر همگرا می‌شود.



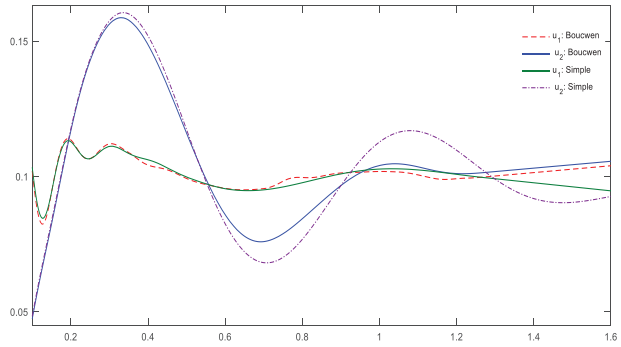
شکل۶: جابجایی در مدل ساده و بینگهام

مشابه مقایسه بین جابجایی‌ها و سرعت‌ها در مدل بوک‌ون و مدل ساده، قیاسی هم بین مدل بینگهام و مدل ساده انجام گرفته است. طبق شکل زیر، تحت به‌کارگیری مدل بینگهام نسبت به مدل ساده، تغییرات جابجایی بسیار کمتری وجود دارد که این مطلوب است؛ همچنین زمان نشست سیگنال در مدل بینگهام به نسبت مدل ساده، کمتر است و این بدان معنی است که سیستم زودتر به زمان همگرایی می‌رسد که این نیز مطلوب است.



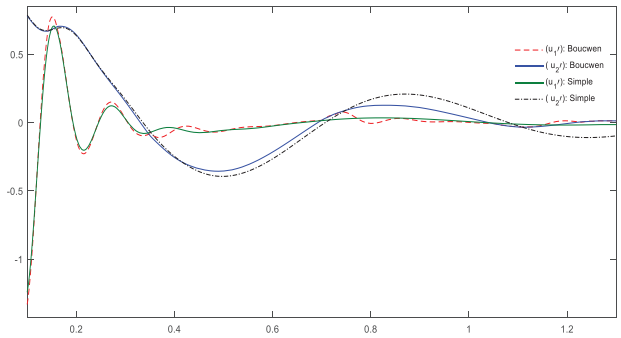
شکل۷: سرعت در مدل ساده و بینگهام

«شکل ۸» در مورد مقایسه بین جابجایی‌ها در مدل بوک‌ون و مدل ساده است؛ همان‌طوری که مشاهده می شود، با استفاده از مدل بوک‌ون به نسبت مدل ساده، تغییرات جابجایی کمتری وجود دارد؛ همچنین زمان نشست در مدل بوک‌ون به نسبت مدل ساده، کمتر است و این بدین معنی است که سیستم زودتر به زمان همگرایی خود می‌رسد.



شکل۸: مقایسه‌ای بین جابجایی‌های مدل بوک‌ون و مدل ساده

در «شکل ۹» مقایسه‌ای بین سرعت‌های(مشتقات جابجایی) مدل بوک‌ون و مدل ساده صورت گرفته است؛ همانطوری که قابل مشاهده است، با استفاده از مدل بوک‌ون به نسبت مدل ساده، تغییرات سرعت کمتری ایجاد می‌گردد؛ ضمنا زمان نشست در مدل بوک‌ون به نسبت مدل ساده، کمتر می‌باشد و این یعنی سیستم زودتر همگرا می‌شود.



شکل۹: مقایسه‌ای بین سرعت‌های مدل بوک‌ون و مدل ساده

در مقالات معتبر، کنترل‌گرهایی برای سیستم تعلیق خودرو و میراگر مغناطیسی به‌کار گفته شده است که از آن جمله می‌توان به کنترل‌کننده‌های فازی [۵-۷]، مد لغزشی[۸] اشاره کرد.

استفاده از حل‌کننده‌عددی مناسب نیز در شبیه سازی‌ها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ در این مقاله از حل‌کننده های عددی Ode23، Ode45، Ode23t استفاده شده است؛ در «جدول ۱»، نوع گام، مرتبه دقت و سختی حل‌کننده‌های عددی آورده شده است.

جدول۱: انواع حل‌کننده‌ها در شبیه‌سازی MATLAB

سختی	مرتبه دقت	نوع گام	حل‌کننده عددی
N/A	اول	ثابت	Ode1
N/A	دوم	ثابت	Ode2

Ode3	ثابت	سوم	N/A
Ode4	ثابت	چهارم	N/A
Ode5	ثابت	پنجم	N/A
Ode8	ثابت	هشتم	N/A
Ode45	تک گام	متوسط	خیر
Ode23	تک گام	کم	کم
Ode113	چند گام	متغیر	بله
Ode15s	چند گام	متغیر	بله
Ode23s	تک گام	کم	کم
Ode23t	تک گام	کم	کم
Ode23tb	تک گام	کم	کم
Ode14x	ثابت	زیاد	N/A
Discrete	N/A	N/A	N/A

بدیهی است که سیستم تعلیق در خودرو در آسایش سرنشینان از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است؛ البته در قیمت خودرو هم تا حد زیادی موثر است. لازم به‌ذکر است که نحوه طراحی و همچنین ساخت سیستم تعلیق خودروها می‌بایست بسیار دقیق و موشکافانه انجام شود. می‌دانیم که وظیفه اصلی میراکننده‌ها، کاهش دادن ارتعاشات می‌باشد؛ فلسفه وجود میراگرها در خودرو نیز، کاهش لرزش‌ها و ارتعا شات و جابجایی‌ها و سرعت حرکت شا سی خودرو است. این بدین دلیل است که با کاهش ارتعاشات و لرزش‌ها و جابجایی‌ها و هچنین سرعت حرکت عمودی شاسی، سرنشین احساس آرامش و راحتی بیشتری می‌کند؛ باید کاری کنیم که تا حد امکان ناهمواری‌های جاده‌ها، توسط میراگر مطلوب، خنثی شود که حس آسایش سرنشین در داخل خودرو افزایش یابد.

۴. مراجع

[1] A. C. Wu, Y.C. Lin and D.S. Hsu, “PERFORMANCE TEST AND MATHEMATICAL MODEL SIMULATION OF MR DAMPER”, The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008.

[2] S.J. Dyke, B.F. Spencer Jr., M.K. Sain and J.D. Carlson, “Modeling and control of magnetorheological dampers of seismic response reduction”, Mechanical products division, lord corporation, cary, NC 27511

[3] Engelmann, B.; Hiptmair, R.; Hoppe, R. H. W.; Mazurkevitch, G.: Numerical simulation of electrorheological fluids based on an extended Bingham model. Preprint SFB-438– –9902, Sonderforschungsbereich 438, Techn. Univ. Munchen € – – Univ. Augsburg 1999. http://www-lit.mathematik.tu-muenchen.de/veroeff/html/SFB/992.76001.html.

[4] Butz, T.; von Stryk, O, “Modelling and Simulation of Electro- and Magnetorheological Fluid Dampers”, “ZAMM Z. Angew. Math. Mech. 82 (2002) 1, 3—20”

[5] Hyung-Jo Jung1,*,y, Kang-Min Choi2, Billie F. Spencer Jr.3 and In-Won Lee, “Application of some semi-active control algorithms to a smart base-isolated building employing MR dampers”, Struct. Control Health Monit.; 13:693–704,2006

[6] Kyle C. Schurter and Paul N. Roschke, “FUZZY MODELING OF A MAGNETORHEOLOGICAL DAMPER USING ANFIS”, IEEE International Conference on Fuzzy Systems • June 2000

[7] Kyle C. Schurter and Paul N. Roschke, “Neuro-Fuzzy Control of Structures Using Magnetorheological Dampers”, Proceedings of the American Control Conference Arlington, VA June 25-27, 2001

[8] Makoto Yokoyama, J. Karl Hedrick and Shigehiro Toyama, “A Model Following Sliding Mode Controller for Semi-Active Suspension Systems with MR Dampers”, Proceedings of the American Control Conference Arlington, VA June 25-27, 200