

مدل سازی میراگر هیدرولیکی مغناطیسی با رویکرد بهینه سازی خصوصیات مولکولی سیال مغناطیسی

محسن غفاریان عیدگاهی مقدم، محمد محسن شاهمردان*، محمود نوروزی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۰۳
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۰۱
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۹-۱۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۱۸

کلمات کلیدی:

میراگر هیدرولیکی مغناطیسی
دینامیک ذره استهلاکی
سیال مغناطیسی، نیروی میراگری
پسماند مغناطیسی

خلاصه: میراگر هیدرولیکی مغناطیسی به عنوان یکی از پرکاربردترین تجهیزات در صنایع مختلف برای اولین بار با رویکرد بررسی خصوصیات مولکولی سیال مغناطیسی عامل در آن با استفاده از روش مدل سازی مولکولی دینامیک ذره استهلاکی مورد مطالعه و بهینه سازی قرار گرفته است. بوسیله مدل اصلاح شده بوک ون شرایط پسماند مغناطیس و نیروی میراگری برای فراهم شدن توان میراگری ۱۰ نیوتن مورد نیاز در میکرو ماشین ها محاسبه شده و پس از معتبر سازی با نتایج تجربی موجود در مقالات اثر خصوصیات مولکولی سیال مغناطیسی عامل بر آن بررسی شده است. نتایج حاصل از مدل سازی دینامیک ذره استهلاکی نشان می دهد با افزایش جرم و قطر ذرات مغناطیسی نیروی میراگری افزایش می یابد، در حالی که با افزایش چگالی این ذرات و افزایش جرم ذرات سیال حامل، نیروی میراگری ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می کند، بنابراین لازم است تا مقادیر بهینه تعیین شوند. همچنین مشاهده می شود با کاهش ضخامت لایه فعال در سطح ذرات مغناطیسی نیروی میراگری افزایش می یابد. در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده، مقادیر بهینه هر یک از پارامترهای مورد مطالعه بمنظور فراهم آمدن توان میراگری ۱۰ نیوتن با کمترین مقدار مصرف انرژی توسط میراگر تعیین شده و از میان سیال های مغناطیسی تجاری سیال ۱۳۲-دی جی به عنوان بهترین سیال انتخاب می شود.

۱- مقدمه

میراگرهای هیدرولیکی مغناطیسی به عنوان تجهیزات جذب کننده شوک های مکانیکی بطور وسیعی در صنایع خودروسازی، عمران، هوافضا و پزشکی بکار می روند [۱]. این تجهیزات شامل سیلندر، پیستون، سیال مغناطیسی و سیم پیچ الکتریکی می شوند که با اعمال میدان مغناطیسی از طرف سیم پیچ الکتریکی، در اثر تغییر گرانشی سیال مغناطیسی میراگری مطلوبی ایجاد می کنند. کشف سیال مغناطیسی به ژاکوب رابینو^۱ در سال ۱۹۴۸ در دفتر استاندارد ملی بازمی گردد [۲]. بطور کلی سیال مغناطیسی شامل یک مایع حمل کننده و ذرات جامد معلق داخل آن در مقیاس میکرون می باشد که این ذرات جامد معمولاً از آلیاژهای آهن-کبالت و یا آهن-نیکل بوده و مایع حمل کننده نیز از جنس روغن سیلیکون، کروزون یا روغن سنتز است، بطوری که ۸۰ تا ۸۵ درصد وزنی و ۴۰ درصد حجمی

سیال مغناطیسی را تشکیل می دهد [۳]. سیالات مغناطیسی توانایی عملکرد مطلوب در بازه حرارتی ۴- تا ۱۵۰ درجه سانتی گراد را دارند، بدون این که تغییری در خواص جریان شناختی آن ها ایجاد شود. لایه فعال در سطح قرار داده شده بر روی سطح ذرات جامد معلق سبب جلوگیری از ته نشین شدن ذرات در سیال حامل شده و همواره آن ها را بصورت معلق و پایدار نگه می دارد. جنس لایه فعال در سطح از میان اولئیک اسید، تترا متیل آمونیوم هیدرواکساید یا سیتریک اسید انتخاب می شود [۴]. هنگامی که در داخل میراگر سیال مغناطیسی در معرض میدان مغناطیسی حاصل از سیم پیچ های الکتریکی قرار می گیرد، ذرات مغناطیسی جامد معلق داخل آن بصورت زنجیروار در راستای میدان مغناطیسی قرار گرفته و سیال را از حالت مایع به حالت نیمه جامد دارای یک تنش تسلیم تغییر می دهند و توان میراگری بیشتری حاصل می شود. میراگرهای هیدرولیکی مغناطیسی دارای مزایای فراوانی از جمله ساختار فیزیکی ساده، نیروی میراگری زیاد، مصرف انرژی کم و هزینه پایین می باشند و بنابراین با توجه

1 Jacob Rabinow

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mmshahmardan@yahoo.com



زیاد را مورد مطالعه قرار می‌داد. هیچکاک^۶ [۲۳] با استفاده از روش عددی یک مدل سه‌بعدی برای میراگر هیدرولیکی مغناطیسی ارائه کرد که نتایج حاصل از این مدل‌سازی نشان می‌داد جهت میدان مغناطیسی اعمال شده توسط سیم‌پیچ‌های الکتریکی میراگر باید عمود بر جهت جریان سیال مغناطیسی باشد. روزنفلد و ورلی^۷ [۲۴] یک روش بهینه‌سازی تحلیلی در طراحی میراگرهای هیدرولیکی مغناطیسی بر اساس این فرضیه که برای جلوگیری از ایجاد حالت گرفتگی و اشباع مغناطیسی در مسیر حرکت سیال مغناطیسی در تمام چرخه میراسازی چگالی میدان مغناطیسی باید ثابت باشد، ارائه کردند. پارلاک^۸ و همکاران [۲۵] به بهینه‌سازی هندسی یک میراگر هیدرولیکی مغناطیسی با استفاده از روش تاگوچی پرداختند که چهار پارامتر فیزیکی میراگر به‌عنوان پارامترهای بهینه‌سازی معرفی شده و تابع هدف فراهم کردن حداکثر محدوده دینامیک بود. پارباکار^۹ و همکاران [۲۶] با استفاده از روش ژنتیک الگوریتم به بررسی عملکرد و بهینه‌سازی یک میراگر هیدرولیکی مغناطیسی پرداختند. تحقیقات دیگر شامل طراحی و توسعه انواع میراگرهای هیدرولیکی مغناطیسی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی [۲۷]، مدل پایه‌ای منطق فازی [۲۸] و انجام مطالعات تجربی و آزمایشگاهی [۲۹] می‌باشد.

تقریباً همه مطالعات انجام شده در ارتباط با عملکرد میراگرهای هیدرولیکی مغناطیسی بر روی ساختار فیزیکی میراگر متمرکز شده و خصوصیات سیال مغناطیسی را در محدوده ماکروسکوپی مورد بررسی قرار داده‌اند. با توجه به این‌که سیال مغناطیسی به‌عنوان اصلی‌ترین بخش از میراگر هیدرولیکی مغناطیسی تاثیرات فیزیکی و مکانیکی میراگر را بر روی توان میراگری اعمال می‌کند، بررسی دقیق تاثیر پارامترها و ساختار مولکولی سیال مغناطیسی در مقیاس میکروسکوپی بر روی توان میراگری ضروری می‌باشد. در این شرایط روش‌های مدل‌سازی مولکولی مانند روش مونت کارلو، روش ذرات براونی، روش دینامیک مولکولی و روش لتیس بولتزمن از جمله روش‌های مرسوم هستند که به منظور انجام مطالعات در مقیاس مولکولی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش مونت کارلو توانایی زیادی در تحلیل حالت تعادل ترمودینامیکی دارد، اما برای بررسی پدیده‌های

به کاربردشان بطور وسیعی در ابعاد و اندازه‌های مختلف از مقیاس میلی‌متر تا چند متر طراحی و ساخته شده و توان میراگری متناسب با خود را ایجاد می‌کنند [۵]. به‌عنوان نمونه، میراگرهای بزرگی که بمنظور دفع اثر زمین‌لرزه در ساختمان‌ها بکار می‌روند توان میراگری تا ۵۰۰ کیلو نیوتن را ایجاد می‌کنند در حالی‌که میراگرهای استفاده شده در میکرو ماشین‌های بارگذاری پردازنده‌های الکتریکی توان میراگری در محدوده ۱۰ نیوتن برقرار می‌کنند [۷،۶].

دامنه وسیع کاربرد میراگرهای هیدرولیکی مغناطیسی در صنایع مختلف سبب شده تا محققان با استفاده از مدل‌های مختلف تحقیقات خود را بر روی جنبه‌های متفاوت میراسازی شامل طراحی، مدل‌سازی و بهینه‌سازی این تجهیزات انجام دهند. مدل‌های پارامتری و غیر پارامتری بکار رفته در مطالعات شامل مدل بینگام ویسکوالاستیک [۱] [۸]، مدل اصلاح شده بینگام [۹]، مدل اصلاح شده دی حال [۱۰]، مدل‌های بر مبنای چند جمله‌ای [۱۱]، مدل شبکه عصبی مصنوعی [۱۲]، مدل منطق فازی [۱۳]، مدل بوک ون [۱۴]، مدل اصلاح شده بوک ون [۱۵] و مدل الگوریتم ژنتیک [۱۶] می‌باشند. لی^۱ و همکاران [۱۷] با استفاده از یک مدل ویسکوالاستیک-ویسکوپلاستیک رفتار میراگر هیدرولیکی مغناطیسی را مورد بررسی قرار دادند. با این وجود مدل‌سازی ارائه شده توسط آن‌ها قادر به توصیف تغییر شرایط سیال مغناطیسی از حالت پیش تسلیم به پسا تسلیم نبود. هسل باچ و آبل^۲ [۱۸] به مدل‌سازی جریان سیال مغناطیسی با استفاده از سه مدل بینگام، هرسل بالکی و بی-بینگام پرداختند. وانگ^۳ و گردانی‌نژاد [۱۹] یک مدل تحلیلی برای محاسبه فشار سیال مغناطیسی درون لوله و میان دو صفحه موازی ارائه کردند. یشیری و همکاران [۲۰] با استفاده از آنالیز المان محدود به مدل‌سازی شرایط عبور سیال مغناطیسی در معرض میدان مغناطیسی از میان حفره عبور جریان داخل میراگر پرداختند. ویدجاجا^۴ و همکاران [۲۱] یک مدل ریاضی بر مبنای مدل هرسل بالکی ارائه کردند که اثر اندازه حفره عبور جریان سیال مغناطیسی در داخل میراگر را بر روی نیروی میراگری بررسی می‌کرد. سوسان^۵ [۲۲] یک مدل جریان‌شناختی برای سیال مغناطیسی ارائه کرد که رفتار سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در تنش‌های برشی کم و

6 Hitchcock
7 Rosenfield and Wereley
8 Parlak
9 Prabakar

1 Li
2 Hesselbach and Abel
3 Wang
4 Widjaja
5 Susan

مربوط به شرکت لرد می‌باشد که توان میراگری آن در محدوده ۱۰۰ نیوتن است [۳۰]. همچنین مطالعات زیادی بر روی بهینه‌سازی ساختار فیزیکی میراگرهای در مقیاس میراگر ۱۰۹۷ انجام شده است، اما در هیچکدام از این تحقیقات اثر پارامترهای ساختار مولکولی سیال مغناطیسی بر روی توان میراگری را بررسی نکرده‌اند. در این مطالعه برای اولین بار به مدل‌سازی یک میراگر هیدرولیکی مغناطیسی در مقیاس کوچک با استفاده از روش مدل‌سازی دینامیک ذره استهلاکی به‌عنوان یک روش در مقیاس مزو پرداخته شده و با توجه به معتبرسازی نتایج با داده‌های تجربی موجود در مقالات، اثر خصوصیات مولکولی سیال مغناطیسی همانند چگالی ذرات مغناطیسی، ضخامت لایه فعال در سطح، جرم ذرات مغناطیسی و استهلاکی بر روی توان میراگری بررسی شده و مقادیر بهینه آن به منظور کاهش مصرف انرژی سیم‌پیچ‌ها و تشخیص نقطه عملکرد مناسب میراگر تعیین شده است. مدل‌سازی با استفاده از کد نویسی و اعمال معادلات و شرایط حاکم در نرم‌افزار فرترن نسخه ۷۷ انجام شده است. با توجه به نمونه تجربی ساخته شده توسط محققان و کارکرد میراگرهای در مقیاس کوچک در میکرو ماشین‌ها، توان میراگری ۱۰ نیوتن به‌عنوان توان مقرر در نظر گرفته شده و سیال مناسب جهت رسیدن به این توان با صرف کمترین توان مغناطیسی انتخاب گردیده است.

۲- روش دینامیک ذره استهلاکی

یک محلول معلق مغناطیسی از ذرات معلق جامد مغناطیسی و مولکول‌های مایع پایه تشکیل شده است. اگر مایع پایه به‌عنوان مجموعه‌ای از دسته ذرات استهلاکی در نظر گرفته شود، حرکت ذرات مغناطیسی بر اساس فعل و انفعال بین خود ذرات مغناطیسی و همچنین بین ذرات مغناطیسی و دسته ذرات سیال حامل محیط اطراف می‌باشد.

بر روی یک ذره استهلاکی \dot{a} سه نوع نیرو وارد می‌شود: نیروی دافعه‌ی بقایی F_{ij}^C که توسط ذرات دیگر اعمال می‌گردد، نیروی استهلاکی F_{ij}^D که اثر ویسکوزیته و نیروی درگ بین ذرات را ایجاد می‌کند و یک نیروی تصادفی F_{ij}^R که حرکت حرارتی ذرات را به سیستم اعمال می‌کند. معادله حرکت ذره \dot{a} داخل سیال مغناطیسی به صورت زیر نوشته می‌شود [۳۱]:

$$m_d \frac{dV_i}{dt} = \sum_{j(\neq i)} F_{ij}^C + \sum_{j(\neq i)} F_{ij}^D + \sum_{j(\neq i)} F_{ij}^R \quad (1)$$

دینامیک و غیردائم مناسب نیست. روش دینامیک مولکولی نیز برای تحلیل شرایط در حالت تعادل ترمودینامیکی مفید است، اما امتیاز این روش در بررسی خصوصیات دینامیکی سیستم در شرایط غیر تعادلی می‌باشد. استفاده از روش دینامیک مولکولی برای مدل‌سازی پراکندگی دسته‌ای از ذرات در یک مایع مبنا بسیار مشکل است، زیرا زمان مشخصه حرکت مولکول‌های حلال با آنچه برای ذرات پراکنده شده وجود دارد، بسیار متفاوت است. در واقع اگر چنین پراکندگی را بر مبنای زمان مشخصه مولکول‌های حلال مشاهده نماییم، تنها قادر به دیدن حرکت فعال مولکول‌های حلال در اطراف ذرات پراکنده شده ساکن خواهیم بود. بنابراین استفاده از روش دینامیک مولکولی برای مدل‌سازی پراکندگی ذرات مناسب نیست. روش دینامیکی براونی حرکات تصادفی ذرات پراکنده شده را که در تماس با مولکول‌های یک حلال قرار می‌گیرند مدل‌سازی می‌کند. به همین دلیل اینگونه ذرات را ذرات براونی می‌نامند. روش لتیس بولتزنم سیستم مایع را به‌عنوان ترکیبی از ذرات مجازی سیال در نظر گرفته و برای شبیه‌سازی سیستم‌های شامل مایعات خالص مورد استفاده قرار می‌گیرد، هرچند بیشتر برای بررسی پراکندگی ذرات مفید می‌باشد. در این میان روش دینامیک ذره استهلاکی به‌عنوان یک روش جدید مدل‌سازی در مقیاس مزو معرفی شده است که قادر است بخوبی پراکندگی ذرات را مدل‌سازی نماید. در این روش مولکول‌های سیال پایه تشکیل خوشه‌هایی از ذرات را می‌دهند که در این حالت زمان مشخصه خوشه‌های سیال پایه متناسب با ذرات پراکنده شده بوده و امکان مدل‌سازی همزمان سیال پایه و ذرات پراکنده شده فراهم می‌شود. دسته ذرات سیال با توجه به فعل و انفعالی که با ذرات اطراف خود و ذرات پراکنده دارند موقعیت و سرعت جدید خود را پیدا می‌کنند، در حالی که تعیین جایگاه و سرعت ذرات در تعامل با یکدیگر به روش‌های تحلیلی بسیار پیچیده و زمان‌بر می‌باشد.

با توجه به این‌که روش دینامیک ذره استهلاکی شرایط مناسبی را برای مدل‌سازی پراکندگی ذرات ایجاد می‌کند و این‌که سیالات مغناطیسی نمونه مناسبی از پراکندگی ذرات جامد مغناطیسی داخل یک حلال پایه می‌باشند، با استفاده از این روش مدل‌سازی می‌توان به تحلیل رفتار میراگری یک میراگر هیدرولیکی مغناطیسی در مقیاس کوچک با تمرکز بر روی خواص مولکولی سیال مغناطیسی پرداخت. کوچک‌ترین میراگر ساخته شده در مقیاس تجاری میراگر مدل ۱۰۹۷

که:

$$F_{ij}^C = \alpha w_R(r_{ij}) e_{ij} \quad (2)$$

$$F_{ij}^R = \sigma w_R(r_{ij}) e_{ij} \zeta_{ij} \quad (3)$$

$$F_{ij}^D = -\gamma w_D(r_{ij}) (e_{ij} \cdot V_{ij}) e_{ij} \quad (4)$$

در این معادلات m_d جرم ذره استهلاکی i و V_i سرعت آن است. F_{ij}^C نیرویی است که از طرف ذره j بر روی ذره i اعمال می‌گردد. علاوه بر آن α و σ و γ ثوابتی هستند که بیانگر قدرت نیروی دافعه، نیروی استهلاکی و نیروی تصادفی می‌باشند. توابع وزنی $w_D(r_{ij})$ و $w_R(r_{ij})$ بر این اساس تعریف می‌شوند که با افزایش فاصله میان دو ذره، نیروهای بین ذره‌ای کاهش پیدا کند. با توجه به توضیحات بالا $w_R(r_{ij})$ بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$w_R(r_{ij}) = \begin{cases} 1 - \frac{r_{ij}}{d_c} & \text{for } r_{ij} \leq d_c \\ 0 & \text{for } r_{ij} > d_c \end{cases} \quad (5)$$

ارتباط میان دو تابع وزنی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$w_D(r_{ij}) = w_R^2(r_{ij}), \quad \sigma^2 = 2\gamma kT \quad (6)$$

که d_c قطر ظاهری ذره استهلاکی و r_{ij} وضعیت نسبی است و بصورت $r_{ij} = r_i - r_j$ بیان می‌گردد. e_{ij} بردار یکه بوده که جهت ذره i را نسبت به ذره j بیان می‌کند و به صورت $e_{ij} = \mathbf{r}_{ij} / r_{ij}$ تعریف می‌شود. V_{ij} سرعت نسبی بوده که به صورت $V_{ij} = V_i - V_j$ بیان می‌شود. k ثابت بولتزمن است و T دمای مایع می‌باشد. همچنین ζ_{ij} یک متغیر تصادفی بوده که شامل حرکت تصادفی ذرات است.

اگر از معادله (۱) برحسب زمان در یک بازه زمانی کوچک مانند Δt از t تا $t + \Delta t$ انتگرال گیری شود، آنگاه معادلات اختلاف محدود حاکم بر حرکت ذره در مدل سازی به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\Delta r_i = V_i \Delta t \quad (7)$$

$$\Delta V_i = \frac{\alpha}{m_d} \sum_{j(\neq i)} w_R(r_{ij}) e_{ij} \Delta t - \frac{\gamma}{m_d} \sum_{j(\neq i)} w_R^2(r_{ij}) (e_{ij} \cdot V_{ij}) e_{ij} \Delta t + \frac{(2\gamma kT)^{\frac{1}{2}}}{m_d} \sum_{j(\neq i)} w_R(r_{ij}) e_{ij} \theta_{ij} (\Delta t)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

در این معادلات θ_{ij} متغیر تصادفی می‌باشد که باید خصوصیات

تصادفی زیر را ارضا کند:

$$\langle \theta_{ij} \rangle = 0 \quad (9)$$

$$\langle \theta_{ij} \theta_{i'j'} \rangle = (\delta_{ii'} \delta_{jj'} + \delta_{ij} \delta_{j'i'}) \quad (10)$$

که در این عبارات، δ_{ij} دلتای کرونگر می‌باشد. در طی مدل سازی، متغیر تصادفی θ_{ij} از یک توزیع یکنواخت یا نرمال با مقدار متوسط برابر با صفر و واریانس واحد نمونه‌گیری می‌شود.

۱-۲- مدل ذرات

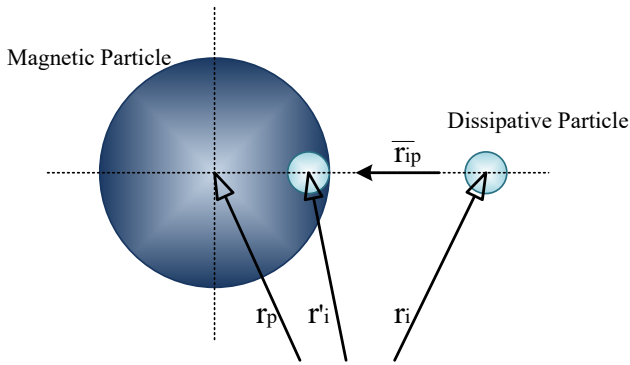
یک ذره مغناطیسی بصورت کروی و با یک نقطه مرکزی دو قطبی را در نظر بگیرید که توسط یک لایه یکنواخت از مواد فعال در سطح پوشیده شده است. از d_s برای بیان قطر ذره مغناطیسی و از δ برای بیان ضخامت لایه مواد فعال در سطح و از d که برابر است با $d_s + 2\delta$ برای بیان قطر که شامل لایه مواد فعال در سطح نیز می‌باشد، استفاده می‌شود. $u_{ij}^{(m)}$ بیانگر انرژی مغناطیسی برهم‌کنش بین ذره i و j بوده و $u_{ij}^{(H)}$ بیانگر انرژی برهم‌کنش ذره مغناطیسی و محیط اطراف می‌باشد. افزایش انرژی برهم‌کنش که به سبب هم‌پوشانی لایه‌های فعال در سطح ایجاد شده نیز با $u_{ij}^{(v)}$ نمایش داده می‌شود. معادلات حاکم بر این انرژی‌ها در زیر ارائه گردیده‌اند [۳۲]:

$$u_{ij}^{(m)} = \frac{\mu_0}{4\pi r_{ij}^3} \{ \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{m}_j - 3(\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{t}_{ij})(\mathbf{m}_j \cdot \mathbf{t}_{ij}) \} \quad (11)$$

$$u_{ij}^{(H)} = -\mu_0 \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{H} \quad (12)$$

$$u_{ij}^{(v)} = kT \lambda_v \left\{ 2 - \frac{2r_{ij}}{d_s} \ln\left(\frac{d}{r_{ij}}\right) - 2 \frac{r_{ij}}{d_s} - 1 \right\} \quad (13)$$

که در روابط بالا μ_0 نفوذپذیری فضای آزاد، \mathbf{m}_i گشتاور مغناطیسی بصورت $\mathbf{m}_i = |\mathbf{m}_i| \mathbf{e}_{ij}$ ، \mathbf{e}_{ij} بردار واحد است که به صورت $r_{ij} = |\mathbf{r}_{ij}|$ میدان مغناطیسی H بیان می‌شود. $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j$ و $\mathbf{e}_{ij} = \mathbf{r}_{ij} / r_{ij}$ بیان می‌شود. اعمال شده و t_δ نسبت ضخامت لایه ماده فعال در سطح به اندازه شعاع بخش جامد ذره می‌باشد. پارامتر بی‌بعد λ_v که در معادله (۹) مشاهده می‌شود بیانگر قدرت برهم‌کنش بین دو ذره دارای لایه فعال نسبت به انرژی حرارتی می‌باشد که به صورت $\lambda_v = \pi d_s^2 n_s / 2$ ارائه می‌گردد که در آن n_s بیانگر تعداد مولکول‌های لایه ماده



شکل ۱: مدل برخورد میان ذرات استهلاکی و ذرات مغناطیسی

Fig. 1. Collision model among dissipative and magnetic particles

$$u_{ip} = 4\varepsilon \left\{ \left(\frac{d_c}{r_{ip}} \right)^m - \left(\frac{d_c}{r_{ip}} \right)^n \right\} \quad (16)$$

که در این رابطه ε یک ثابت بوده که بیانگر قدرت چنین برهم‌کنشی می‌باشد. داریم $\mathbf{r}'_{ip} = \mathbf{r}'_i - \mathbf{r}_p$ و $\mathbf{r}'_{ip} = |\mathbf{r}'_{ip}|$ که در آن \mathbf{r}_i بردار وضعیت مرکز ذره مغناطیسی i بوده \mathbf{r}_p بصورت مشابه بردار وضعیت ذره استهلاکی p و \mathbf{r}'_i بردار وضعیت ذره کروی محاطی است. داریم:

$$\mathbf{r}'_i = \mathbf{r}_i - (d - d_c / 2) \bar{\mathbf{r}}_{ip} \quad (17)$$

که $\bar{\mathbf{r}}_{ip} = \mathbf{r}_{ip} / r_{ip}$ و $\mathbf{r}_{ip} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_p$ اگر در رابطه (۱۶) مقدار m را برابر ۱۲ و مقدار n را برابر ۶ در نظر بگیریم، مدل پتانسیل استفاده شده تبدیل به مدل معروف ۱۲-۶ پتانسیل لنارد جونز می‌شود. با توجه به توصیف موجود در رابطه (۱۶) برای انرژی فعل و انفعال، نیروی اعمال شده بر روی ذره استهلاکی p توسط ذره مغناطیسی i ، $F_{ip}^{(int)}$ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$F_{ip}^{(int)} = 4n\varepsilon \left\{ \frac{m}{n} \left(\frac{d_c}{r_{ip}} \right)^m - \left(\frac{d_c}{r_{ip}} \right)^n \frac{r_{ip}'}{r_{ip}} \right\} \quad (18)$$

۲-۱-۲ بی‌بعد سازی معادله حرکت و کمیت‌های مرتبط با آن

برای بی‌بعد سازی هر کمیت، مقادیر زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند:

d برای فاصله، m_m برای جرم‌ها، kT برای انرژی‌ها، $(kT / m_m)^{1/2}$ برای سرعت‌ها، $d(m_m / kT)^{1/2}$ برای زمان، kT / d برای نیروها می‌باشند. با استفاده از این مقادیر معادله (۷) بصورت زیر

فعال در سطح در واحد سطح ذره جامد است. از روابط (۱۱) و (۱۳) نیروهایی که بر ذره i وارد می‌گردند به صورت زیر بدست می‌آید:

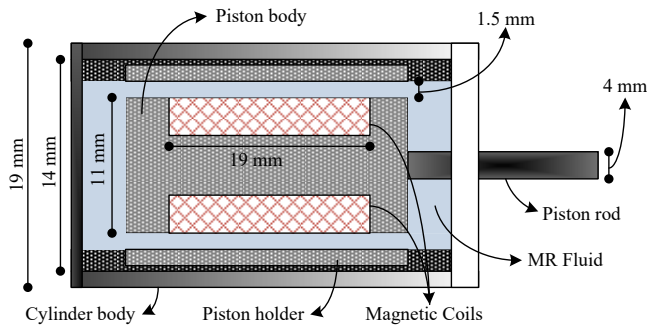
$$F_{ij}^{(m)} = -\frac{3\mu_0}{4\pi r_{ij}^4} [- (\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{m}_j) t_{ij} + 5(\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{t}_{ij})(\mathbf{m}_j \cdot \mathbf{t}_{ij}) t_{ij} - \{ (\mathbf{m}_j \cdot \mathbf{t}_{ij}) \mathbf{m}_i + (\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{t}_{ij}) \mathbf{m}_j \}] \quad (14)$$

$$F_{ij}^{(v)} = \frac{kT\lambda_v}{\delta} \cdot \frac{r_{ij}}{r_{ij}} \ln\left(\frac{d}{r_{ij}}\right), \quad (d_s \leq d_{ij} \leq d) \quad (15)$$

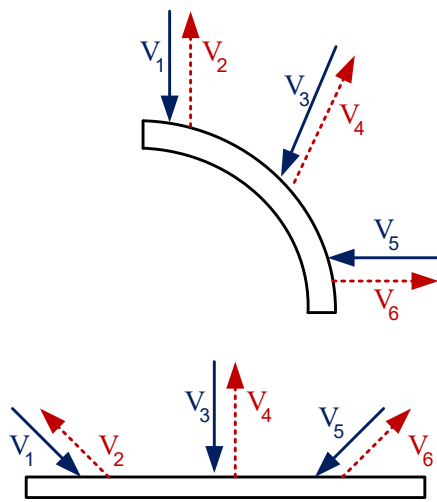
حرکت ذرات مغناطیسی توسط معادلات نیوتن مشخص می‌شود که نسبت به زمان گسسته‌سازی شده تا معادلات اختلاف محدود حاکم بر حرکت ذره در مدل سازی بدست آید.

۲-۱-۱ مدل پتانسیل برای توصیف برهمکنش میان ذرات استهلاکی و ذرات مغناطیسی

در انجام مدل‌سازی، هر ذره کلئیدی به‌عنوان یک دسته از ذرات استهلاکی فرض می‌شوند. در روش‌های معمول، برهم‌کنش بین یک ذره مغناطیسی با ذرات استهلاکی محیط اطراف همانند برهم‌کنش بین ذرات استهلاکی محیط اطراف با یک جزء ذره الکترومغناطیسی در نظر گرفته می‌شود. با این وجود در حالت واقعی از پراکندگی، برهم‌کنش بین ذرات کلئیدی و مولکول‌های حلال بستگی به خصوصیات پراکندگی سیستم مورد مطالعه دارد. اینچنین برهم‌کنش‌هایی به شدت وابسته به نسبت جرم و قطر ذرات کلئیدی به جرم و قطر ذرات مولکول‌های مابعد حلال دارد. بنابراین، به جای این‌که یک ذره کلئیدی را به‌عنوان مجموعه‌ای از ذرات استهلاکی در نظر بگیریم، می‌توان از مدل پتانسیل بمنظور توصیف برهم‌کنش بین ذرات مغناطیسی و ذرات محیط استفاده نمود. در ساده‌ترین حالت از مدل پتانسیل ذرات سخت استفاده می‌شود که در آن ذرات مغناطیسی به‌عنوان یک کره سخت فرض شده که در این حالت ذرات استهلاکی بصورت الاستیک با برخورد به ذرات سخت مغناطیسی عکس‌العمل از خود نشان می‌دهند. شکل ۱ مدلی از نحوه برخورد ذرات استهلاکی با ذرات مغناطیسی را نشان می‌دهد. مدل ساده بعدی از مدل پتانسیل، مدل لنارد جونز می‌باشد. مدل لنارد جونز برای انرژی برهم‌کنش u_{ip} برای ذره استهلاکی p و ذره مغناطیسی i به صورت زیر بیان می‌شود [۳۳]:



شکل ۲: میراگر مدل سازی شده با استفاده از روش دینامیک ذره استهلاکی
Fig. 2. Modeled damper by using dissipative particle dynamics method



شکل ۳: شرط مرزی عدم لغزش بازگشت معکوس مورد استفاده در مدل سازی مولکولی

Fig. 3. Bounce back no-slip boundary condition utilized in molecular modeling

الکتریکی و نگهدارنده پیستون می باشد. نمای شماتیک میراگر ساخته شده توسط آن ها به همراه ابعاد و اندازه آن در شکل ۲ مشاهده می شود.

در انجام مدل سازی مولکولی از شرط مرزی بازگشت معکوس^۲ برای اعمال شرط عدم لغزش بر روی دیواره ها استفاده می شود. با استفاده از این شرط هنگامی که یک ذره با دیواره جامد برخورد می کند، در همان جهت برخورد بازگردانده می شود. نمای شماتیک از نحوه برخورد ذرات با دیواره و اعمال حرکت آن ها طبق الگوی شرط مرزی بازگشت معکوس در شکل ۳ نشان داده شده است.

به منظور انجام محاسبات نیروی میراگری و تعیین سطح پسماند

بی بعد می شود [۲۴]:

$$\Delta r_i^* = V_i^* \Delta t^* \quad (19)$$

$$\Delta V_i = \frac{\alpha}{m_d^* d_c^*} \sum_{j(\neq i)} w_R(r_{ij}^*) e_{ij} \Delta t^* - \frac{\gamma^*}{(m_d^*)^{1/2} d_c^*} \sum_{j(\neq i)} w_R^2(r_{ij}^*) (e_{ij} \cdot V_{ij}^*) e_{ij} \Delta t^* + \frac{(2\gamma^*)^{1/2}}{(m_d^*)^{3/4} d_c^{*1/2}} \sum_{j(\neq i)} w_R(r_{ij}^*) e_{ij} \theta_{ij} (\Delta t^*)^{1/2} - \frac{1}{m_d^*} \sum_k F_{ki}^{(m)*} \Delta t^* \quad (20)$$

که در آن:

$$w_R(r_{ij}^*) = \begin{cases} 1 - \frac{r_{ij}^*}{d_c^*} & \text{for } r_{ij}^*/d_c^* \leq 1 \\ 0 & \text{for } r_{ij}^*/d_c^* > 1 \end{cases} \quad (21)$$

$$\alpha^* = \alpha \frac{d_c}{kT}, \gamma^* = \gamma \frac{d_c}{(m_d kT)^{1/2}} \quad (22)$$

در معادلات بالا بالانویس * بیانگر صورت بدون بعد کمیت است. در این حالت معادله (۱۸) شامل نیروهای ناشی از برهم کنش ذرات مغناطیسی می باشد.

به صورت مشابه، صورت بدون بعد معادلات (۱۴) و (۱۵) بصورت زیر بیان می شود:

$$F_{ij}^{(m)*} = -3\lambda \frac{1}{r_{ij}^*} [-(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j) t_{ij} + 5(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{t}_{ij})(\mathbf{n}_j \cdot \mathbf{t}_{ij}) t_{ij} - \{(\mathbf{n}_j \cdot \mathbf{t}_{ij}) \mathbf{n}_i + (\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{t}_{ij}) \mathbf{n}_j\}] \quad (23)$$

$$F_{ij}^{(v)*} = \lambda_v \frac{1}{t_{ij}^*} \ln\left(\frac{1}{r_{ij}^*}\right) \quad (24)$$

که در آن ها $F_{ij}^* = F_{ij}^{(m)*} + F_{ij}^{(v)*}$ و بردار یکه بیان کننده جهت گشتاور مغناطیسی بوده و به صورت $m_0 = |\mathbf{m}_i|$ و $\mathbf{n}_i = \mathbf{m}_i / m_0$ بیان می شود. پارامتر بدون بعد λ در معادله (۲۳) بیانگر مقدار قدرت فعال و انفعال ذره مغناطیسی نسبت به انرژی حرارتی بوده و به صورت $\lambda = \mu_0 m_0^2 / 4\pi d^3 kT$ ارائه می گردد.

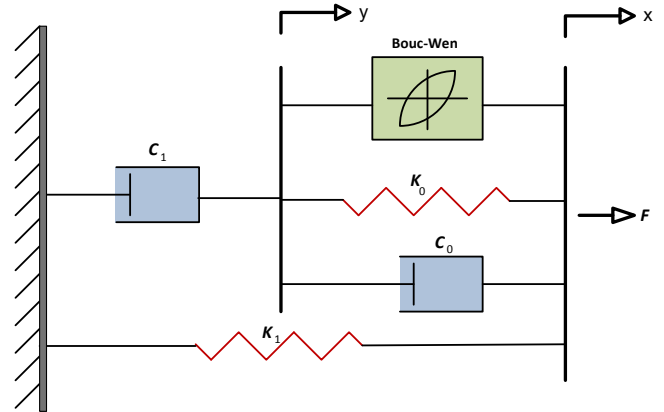
۳- مدل سازی میراگر هیدرولیکی مغناطیسی

در این بخش از مطالعه به مدل سازی یک میراگر هیدرولیکی مغناطیسی با استفاده از روش دینامیک ذره استهلاکی می پردازیم. در ابتدا به منظور اطمینان از صحت نتایج، نمونه میراگر ساخته شده توسط لی^۱ و همکاران [۳۵] مدل سازی شده و نتایج حاصل با داده های تجربی موجود مقایسه می شوند. این میراگر از نوع یک لوله ای بوده و شامل سیلندر، پیستون، میله پیستون، سیال مغناطیسی، سیم پیچ

فنر انباشته‌گر، a پارامتر سختی b ، s و J ضرایب مسطح‌سازی منحنی‌های نیروی میراگری-سرعت می‌باشند. این ضرایب با استفاده از الگوریتم ژنتیک و داده‌های تجربی موجود در مقالات توسط نرم‌افزار متلب محاسبه شده و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته اند [۳۸،۳۷]

در نرم‌افزار فرترن برای کاهش زمان محاسبات از شعاع برش برخورد دو ذره استفاده شده و چیدمان اولیه ذرات به صورت مربعی و با سرعت اولیه بر اساس تابع سرعت ماکسول در نظر گرفته شده است. فرایند مدل‌سازی به صورت دوبعدی بوده و از حرکت ذرات حول خودشان صرف‌نظر شده است. همچنین فرض می‌شود پیستون با مدل سرعت سینوسی رفت و برگشت کند. ذرات مغناطیسی و استهلاکی دارای ابعاد یکتواخت بوده و ضخامت لایه فعال در سطح به صورت یکسان در نظر گرفته می‌شود. فلوجارت برنامه نوشته شده در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود موقعیت اولیه ذرات به همراه سرعت اولیه آن‌ها تعریف شده و این مقادیر در هر مرحله برورسانی می‌شوند. در صورتی که محل جدید ذرات ایجاد همپوشانی کند و یا سرعت محاسبه شده در هر مرحله شرط ایجاد ممنوع صفر یا کوچکتر بودن از سرعت ماکزیمم را برقرار نکند، محل ذرات و سرعت آن‌ها تغییر پیدا می‌کند. با تعیین موقعیت و سرعت ذرات شرایط مرزی اعمال شده و نیروهای مرتبط محاسبه می‌شوند. به منظور کاهش حجم محاسبات با توجه به شماره اختصاص پیدا کرده به هر ذره و هر سلول از شبکه ذراتی که احتمال برخورد آن‌ها با یکدیگر وجود دارد شناسایی شده و محاسبات‌شان به همین ذرات محدود می‌شود.

در انجام اعتبارسنجی نتایج، اندازه حفره عبور جریان سیال داخل میراگر هیدرولیکی مغناطیسی ۱/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شکل ۶ نمودار تغییرات نیروی میراگری با گذشت زمان را در توان‌های مغناطیسی مختلف برای داده‌های تجربی و نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در ابتدای اعمال نیرو به میراگر، توان میراگری پاسخ داده شده به یک مقدار حداکثر رسیده و سپس به یک مقدار ثابت میل می‌کند. علاوه بر آن، با توجه به روند تغییرات نمودار مشخص می‌شود که با افزایش توان مغناطیسی اعمال شده مقدار توان میراگری حداکثر دیرتر رخ داده و همچنین مقدار آن با مقدار توان میراگری پایا تفاوت بیشتری



شکل ۴: ساختار جریان شناختی مدل اصلاح شده بوک ون [۳۶]
Fig. 4. Rheological structure of modified Bouc-Wen model [36]

مغناطیسی در مدل‌سازی میراگر هیدرولیکی مغناطیسی در مقیاس کوچک نیاز به یک مدل محاسباتی می‌باشد. در میان انواع مدل‌های محاسباتی، مدل اصلاح شده بوک ون [۳۶] برای تحلیل حلقه‌های پسماند مغناطیسی در محدوده زیادی از شکل‌ها بکار می‌رود. در واقع این مدل نسخه اصلاح شده مدل بوک ون می‌باشد که این مدل را با یک فنر غیرخطی، یک سیستم میراساز غیرخطی، یک سری خصوصیات دو ویسکوزیته‌ای و المان تاخیر در سرعت ترکیب کرده است. همچنین یک المان الاستیک خطی به صورت موازی با این سیستم ترکیب شده تا تمامی جنبه‌های پسماند مغناطیسی را شامل شود. ساختار جریان شناختی مدل اصلاح شده بوک ون در شکل ۴ نشان داده شده است.

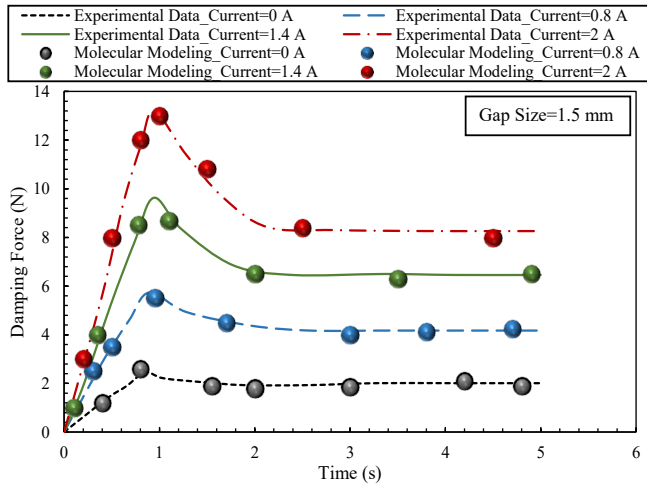
روابط (۲۵) تا (۲۷) بیانگر معادلات حاکم بر مدل بوک ون اصلاح شده می‌باشند.

$$F_D = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (25)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [az + k_0(x - y) + c_0 \dot{x}] \quad (26)$$

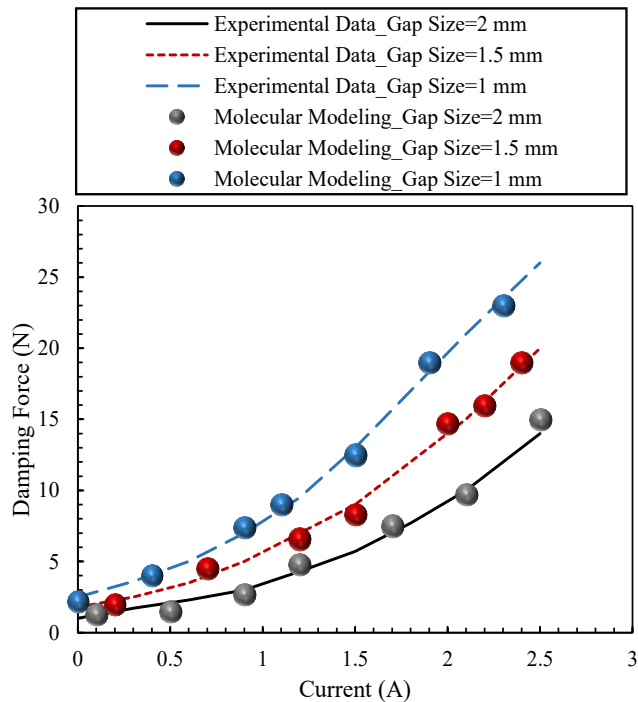
$$\dot{z} = -b|\dot{x} - \dot{y}| |z|^{n-1} z - s(\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + J(\dot{x} - \dot{y}) \quad (27)$$

در این روابط F_D نیروی میراگری، y سرعت پیستون، z جزء پسماند، k_1 ضریب سختی انباشته‌گر، c_0 ضریب میراگری ویسکوز، k_0 ضریب کنترل سختی در سرعت‌های بالا، x_0 جابجایی اولیه



شکل ۶: اعتبارسنجی نتایج با استفاده از داده‌های تجربی تغییرات نیروی میراگری نسبت به زمان در شدت جریان‌های مختلف [۳۵]

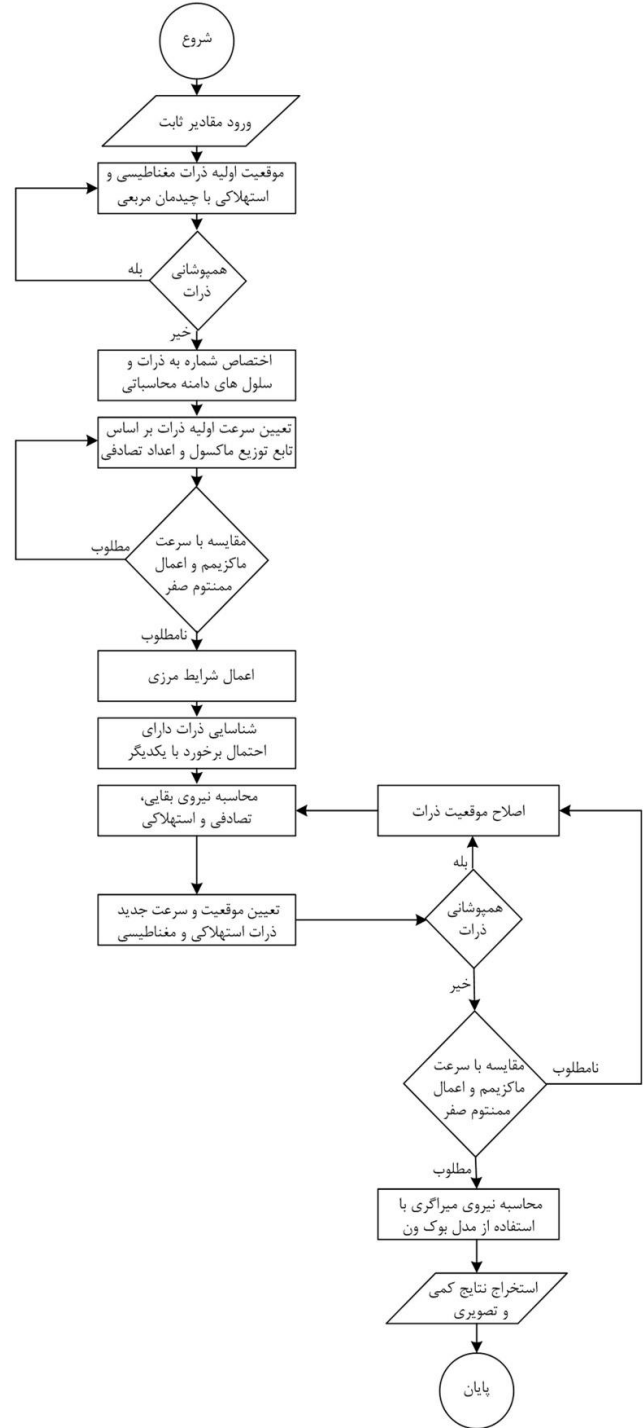
Fig. 6. Validation of results by using experimental data for damping force changes versus time at different electrical currents [35]



شکل ۷: اعتبارسنجی نتایج با داده‌های تجربی تغییرات نیروی میراگری نسبت به شدت جریان در اندازه حفره‌های جریان مختلف [۳۵]

Fig. 7. Validation of results by using experimental data for damping force changes versus electrical currents at different gap size [35]

ملاحظه می‌شود با افزایش توان مغناطیسی نیروی میراگری حداکثر با الگوی تابع نمایی تغییر می‌کند. همچنین مشخص می‌شود که تاثیر حفره عبور جریان بر مقدار توان میراگری در جریان‌های الکتریکی



شکل ۵: فلوچارت عملکرد برنامه نوشته شده به منظور مدل‌سازی میراگری
Fig. 5. Flowchart of written code for damper modeling

دارد. در حالتی که میدان مغناطیسی اعمال نمی‌شود، تفاوت مقدار توان میراگری حداکثر با توان میراگری پایا اختلاف کمی دارند که مدل‌سازی انجام شده این شرایط را با دقت مناسبی نمایش می‌دهد. شکل ۷ اثر تغییر توان مغناطیسی اعمال شده بر سیال مغناطیسی را در اندازه حفره‌های عبور جریان مختلف نشان می‌دهد. همانطور که

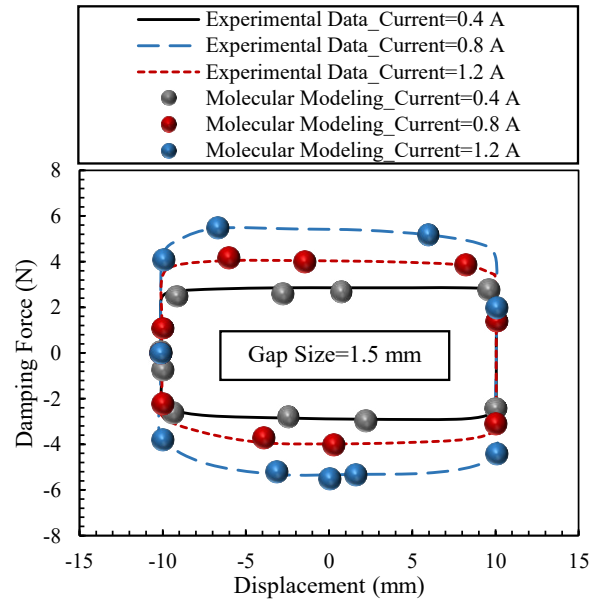
انطباق خوبی با داده‌های تجربی داشته و در بیان دقیق اثر پسماند مغناطیسی از دقت بالایی برخوردار است.

با توجه به نمودارهای حاصل از مقایسه داده‌های تجربی با نتایج مدل‌سازی، بررسی کمی مقدار اختلاف موجود در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، حداقل انحراف از نتایج تجربی در بیشتر حالات برابر صفر بوده و اختلافی مشاهده نمی‌شود. در حالی که حداکثر انحراف به جز یک مورد که از مرتبه دو بوده در دیگر شرایط از مرتبه یک می‌باشد و انحراف متوسط در مجموع کمتر از یک درصد گزارش شده است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

۴-۱- بررسی ساختار سیال مغناطیسی عامل در میراگرهای هیدرولیکی مغناطیسی

در روش دینامیک ذره استهلاکی یک سیال مغناطیسی از سه بخش تشکیل شده است. مایع حامل پایه قسمت اول سیال را تشکیل می‌دهد که همانطور که گفته شده خوشه‌هایی از مولکول‌های مایع به‌عنوان ذرات استهلاکی در مدل‌سازی ظاهر می‌شوند. این خوشه‌ها که محیط اصلی سیال را تشکیل می‌دهند، در داخل خود ذرات مغناطیسی را به‌عنوان دومین قسمت از سیال مغناطیسی حفظ می‌کنند. ذرات مغناطیسی جامد که نقش اصلی در تغییر حالت سیال در معرض میدان مغناطیسی را دارند با خوشه ذرات استهلاکی فعل و انفعال داشته و نیروهای بین‌مولکولی بین آن‌ها موقعیت و سرعت جدید این ذرات را مشخص می‌کنند. قسمت سوم از سیال مغناطیسی



شکل ۸: اعتبارسنجی نتایج با استفاده از داده‌های تجربی مربوط به اثر پسماند مغناطیسی [۳۵]

Fig. 8. Validation of results by using experimental data related to hysteresis [35]

بالاتر از ۱/۵ آمپر، بیشتر می‌باشد و نمودارها به صورت معناداری از یکدیگر فاصله می‌گیرند که این شرایط با استفاده از مدل‌سازی نیز تایید شده است. در شکل ۸ نمودار تغییر نیروی میراگری بر حسب جابجایی پیستون داخل سیلندر همراه با میزان پسماند مغناطیسی در شدت جریان‌های الکتریکی مختلف نمایش داده شده است. در این حالت توانایی مدل‌سازی انجام شده در ارائه نتایج معتبر از اثر پسماند مغناطیسی بر نیروی میراگری مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از مدل‌سازی مولکولی

جدول ۱: آنالیز کمی انحراف نتایج حاصل از مدل‌سازی با داده‌های تجربی

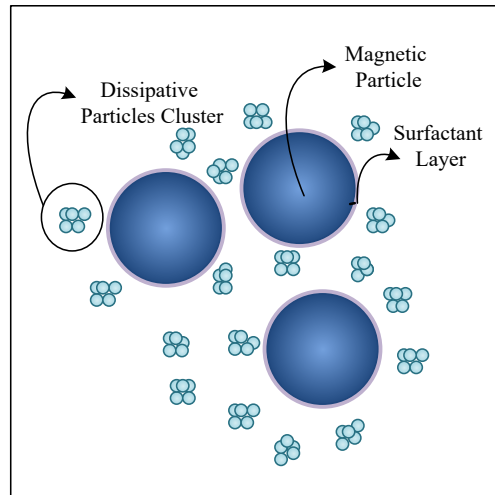
Table 1. Quantitative analysis of results deviation from experimental data

شکل ۸ (نمودارهای سه‌گانه از بالا به پایین)			شکل ۷ (نمودارهای سه‌گانه از بالا به پایین)			شکل ۶ (نمودارهای چهارگانه از بالا به پایین)			انحراف نتایج مدل‌سازی از مقادیر تجربی (%)	
۰	۰	۰	-۰/۷۸۱	۱/۲۳۴	۰	-۰/۳۰۹	۰	-۱/۱۴۲	۰	حداقل انحراف
۵/۵۸۱	۵/۸۹۷	۸/۸۲۳	۱۵	۱۶/۰۷۱	۱/۷۰۲	۲/۴۶۵	-۳/۸۴۶	-۷/۲۳۴	۷/۸۴۳	حداکثر انحراف
-۰/۰۳۹	۰/۳۳۰	۰/۸۱۶	۰/۰۹۱	۰/۸۶۰	۱/۵۱۹	-۰/۲۲۲	-۰/۸۹۷	۰/۲۰۲	۲/۰۸۰	انحراف متوسط

جدول ۲: زمان اجرای مدل‌سازی در تعداد ذرات مغناطیسی و استهلاکی مختلف

Table 2. Modeling run time at different numbers of magnetic and dissipative particles

زمان اجرا (ثانیه)	تعداد تصاویر استخراج شده	تعداد ذرات استهلاکی	تعداد ذرات مغناطیسی	نمونه اجراهای گرفته شده
۱۸۵۰	۲۰۰	۸۴۹۳۲	۱۰۰	۱
۵۰۸۰	۵۰۰	۸۴۹۳۲	۱۰۰	۲
۹۵۰۰	۲۰۰	۱۲۲۳۴۹۲	۲۵۰۰	۳
۲۵۴۲۰	۵۰۰	۱۲۲۳۴۹۲	۲۵۰۰	۴
۳۵۰۸۰	۲۰۰	۴۵۶۶۷۰۴۴	۱۰۰۰۰	۵
۹۳۲۲۰	۵۰۰	۴۵۶۶۷۰۴۴	۱۰۰۰۰	۶



شکل ۹: تصویر شماتیک از سیال مغناطیسی تعریف شده داخل مدل‌سازی دینامیک ذره استهلاکی

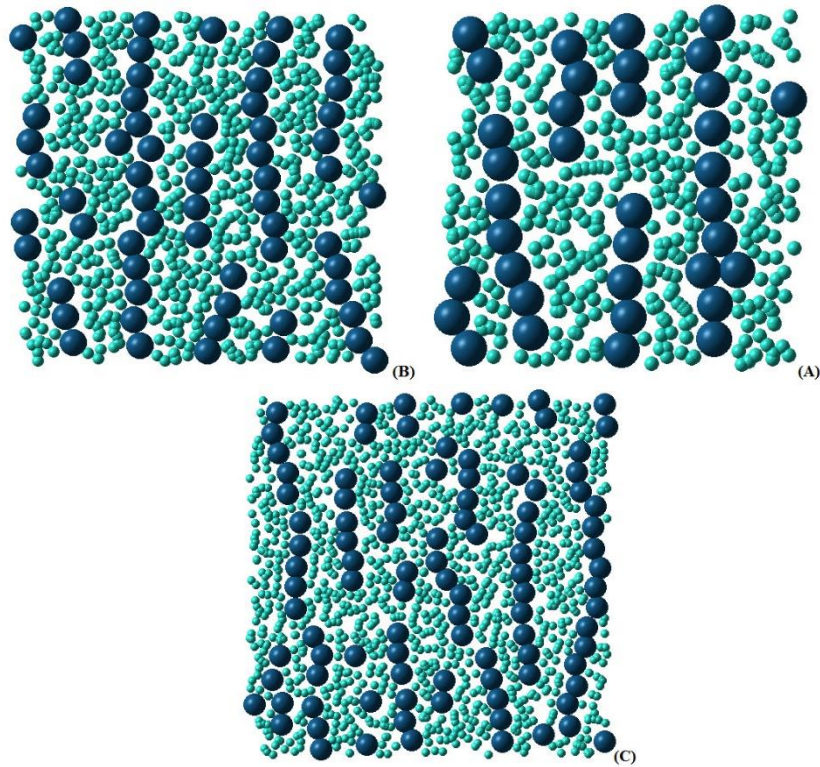
Fig. 9. Schematic view of defined magnetic fluid in the dissipative particle dynamic modeling

۴-۲- بررسی اثر چگالی ذرات مغناطیسی بر نیروی میراگری

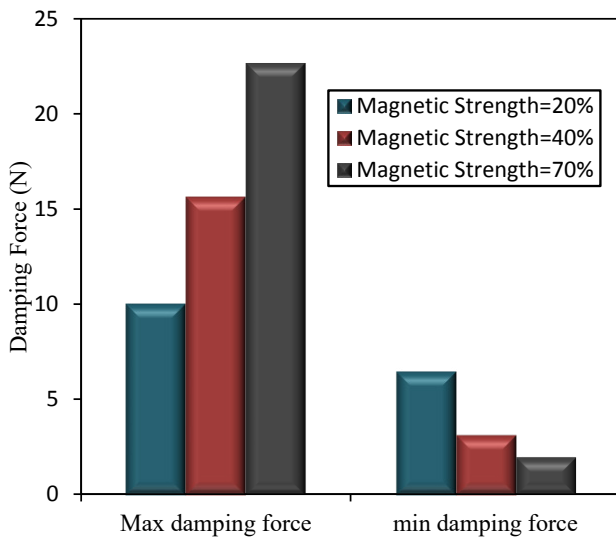
در این بخش از مطالعه به بررسی اثر چگالی ذرات مغناطیسی موجود در سیال حامل پایه بر نیروی میراگری می‌پردازیم. با توجه به این که سه نوع سیال مغناطیسی با نام‌های تجاری ۱۲۲-ای‌جی، ۱۳۲-دی‌جی و ۱۴۰-سی‌جی در میراگرهای هیدرولیکی مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرند، مدل‌سازی در محدوده خصوصیات این سه نوع سیال انجام شده است. مطالعات در اعداد چگالی ۰/۱ تا ۰/۸ مورد بررسی قرار گرفته و سه نمونه از نتایج اجرای مدل در اعداد چگالی ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۷ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در انجام مدل‌سازی عدد چگالی به صورت حاصل ضرب مربع قطر بی‌بعد ذرات مغناطیسی در تعداد ذرات موجود تعریف می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌گردد در اعداد چگالی پایین تعداد زنجیره‌های کامل ذرات مغناطیسی کمتر می‌باشند در حالی که با افزایش عدد چگالی تعداد زنجیره‌ها و طول آن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین فاصله میان زنجیره‌های ذرات کمتر بوده و متوسط ضخامت زنجیره در چگالی ذرات بالا بیشتر می‌باشد. مطالعات در توان‌های مغناطیسی ۲۰٪، ۴۰٪ و ۷۰٪ انجام شده تا اثر میدان مغناطیسی نیز مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود با افزایش توان مغناطیسی نیروی میراگری حداکثر افزایش و نیروی میراگری پایدار کاهش پیدا می‌کند. این در حالی است که با افزایش چگالی ذرات مغناطیسی نیروی میراگری ابتدا افزایش یافته و در ادامه پس از کاهش به مقداری ثابت میل می‌کند. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است حداکثر توان میراگری در توان‌های مغناطیسی بالاتر بیشتر بوده

را مواد فعال در سطح تشکیل داده که سطح ذرات جامد مغناطیسی را پوشانده و از ته‌نشینی این ذرات جلوگیری می‌کنند و بنابراین نقش پایدارکننده سیال مغناطیسی را دارند. شکل ۹ نمایی شماتیک از بخش‌های مختلف سیال مغناطیسی تعریف شده داخل مدل‌سازی دینامیک ذره استهلاکی را نشان می‌دهد.

در الگوی مدل‌سازی ابتدا ذرات مغناطیسی با توجه به ساختار تعریف شده برای آن‌ها در دامنه محاسباتی قرار داده می‌شوند و بر اساس این که داخل هر سلول از شبکه تعریف شده چه تعداد ذره مغناطیسی قرار گرفته است، ذرات استهلاکی با حفظ شرط عدم ایجاد همپوشانی به صورت خود بخودی تشکیل می‌گردند. با توجه به این که نتایج حاصل از مدل‌سازی بصورت فایل تصویری نیز استخراج می‌شود، افزایش تعداد ذرات مغناطیسی که معادل با افزایش تعداد ذرات استهلاکی است منجر به افزایش برهم‌کنش‌ها و دامنه محاسباتی بزرگتر شده و زمان اجرا را افزایش می‌دهد. در این مدل‌سازی در بیشترین تعداد ذرات مغناطیسی، به بررسی ۱۰^۴ ذره مغناطیسی در دامنه محاسباتی پرداخته‌ایم که تعداد ذرات استهلاکی معادل با مرتبه بزرگی ۷ را ایجاد می‌کند. این در حالی است که با افزایش تعداد ذرات تا این مرتبه بزرگی از محاسبات تأثیری بر روی همگرایی مدل مشاهده نشده است. زمان لازم جهت اطمینان از رسیدن به شرایط ایده‌آل جهت پایان اجرا با توجه به تعداد اجراهای مختلف به همراه استخراج تعداد تصاویر متفاوت از نتیجه مدل‌سازی در جدول ۲ ارائه شده است.

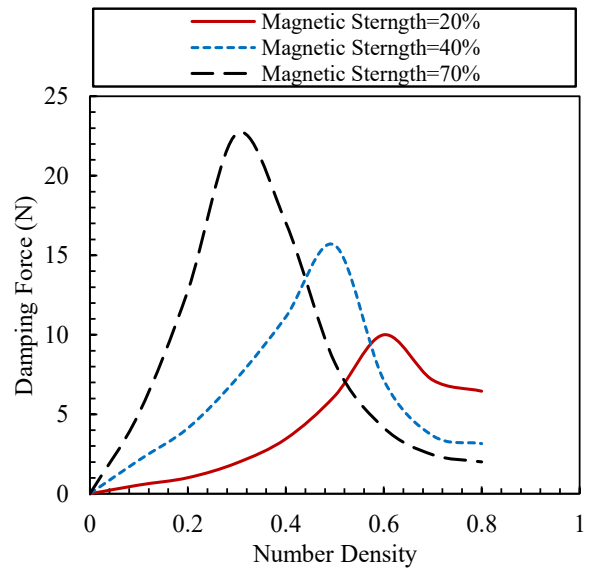


شکل ۱۰: نتایج حاصل از مدل سازی در تراکم ذرات مغناطیسی مختلف (الف) عدد چگالی ۰/۲ (ب) عدد چگالی ۰/۴ (ج) عدد چگالی ۰/۷
Fig. 10. Results of modeling at the different number densities of magnetic particles (A) number density of 0.2 (B) number density of 0.4 (C) number density of 0.7



شکل ۱۲: حداقل و حداکثر توان میراگری در توان های مغناطیسی مختلف با تغییر چگالی ذرات مغناطیسی

Fig. 12. Maximum and minimum damping force at different magnetic strengths with change in the number density of magnetic particles

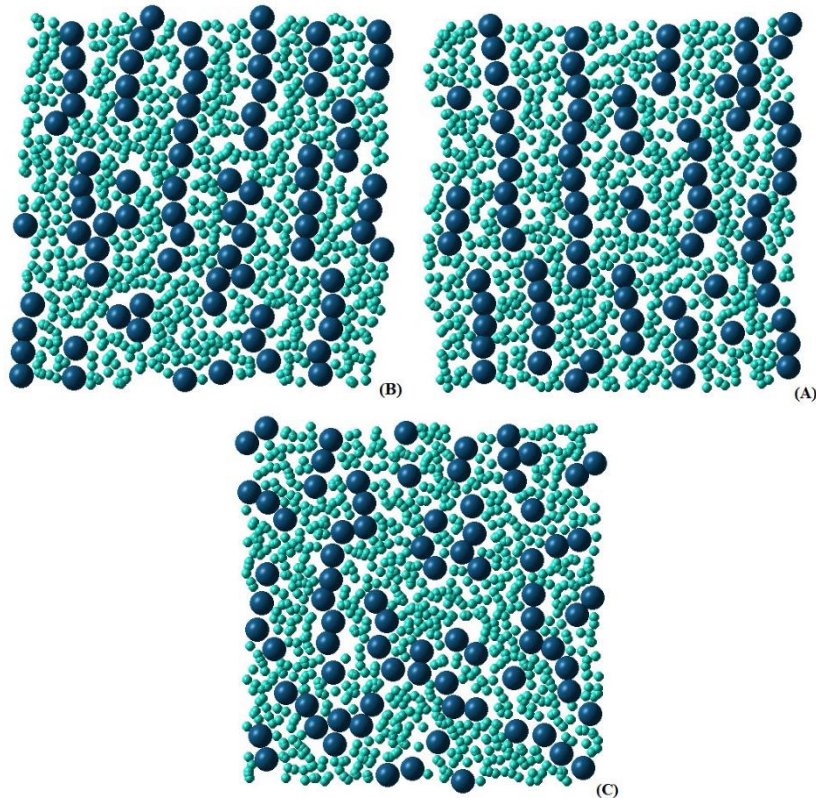


شکل ۱۱: تاثیر چگالی ذرات مغناطیسی بر نیروی میراگری در توان های مغناطیسی مختلف

Fig. 11. Effect of the number density of magnetic particles on damping force at different magnetic strengths

مورد نظر، با حفظ دیگر شرایط سیال با چگالی ذرات مغناطیسی ۰/۶ و توان مغناطیسی اعمال شده ۴۰ درصد به عنوان مقادیر بهینه انتخاب

در حالی که توان میراگری پایدار در توان مغناطیسی پایین تر بیشتر می باشد. با توجه به مقدار مطلوب ۱۰ نیوتن به منظور انجام میراگری



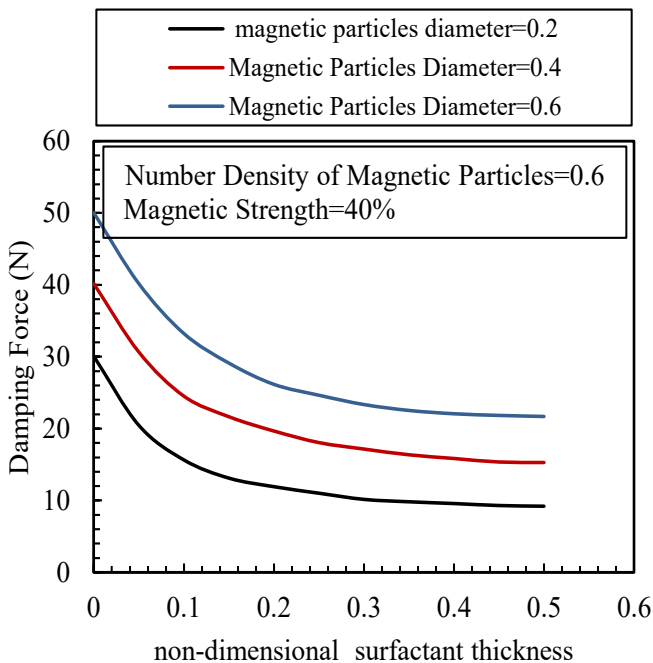
شکل ۱۳: نتایج حاصل از مدل سازی در ضخامت لایه فعال در سطح مختلف (الف) ضخامت ۰/۱ (ب) ضخامت ۰/۶ (ج) ضخامت ۰/۹

Fig. 13. Results of modeling at different non-dimensional thickness of surfactant layer (A) thickness of 0.1 (B) thickness of 0.6 (C) thickness of 0.9

شده و در طول مدل سازی ثابت نگه داشته می شود.

۳-۴- بررسی اثر ضخامت لایه فعال در سطح بر نیروی میراگری

با توجه به این که لایه فعال در سطح ذره مغناطیسی یکی از عوامل اصلی در پایدار نگهداشتن سیال مغناطیسی می باشد، در این قسمت از مطالعه به بررسی اثر ضخامت این لایه بر روی توان میراگری می پردازیم. مدل سازی انجام شده در سه ضخامت بدون بعد از لایه فعال در سطح برابر با ۰/۱، ۰/۶ و ۰/۹ در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود اگرچه با افزایش ضخامت لایه فعال سیال مغناطیسی پایدارتر شده و عمر مصرف طولانی تری پیدا می کند، اما نیروی مازاد دافعه ایجاد شده سبب می شود زنجیره ذرات ناپایدار شده و به تدریج سیال مغناطیسی حالت نیمه جامد خود را از دست دهد که منجر به کاهش عملکرد بهینه میراگر می شود. در این حالت همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است با افزایش ضخامت لایه فعال در سطح و کاهش قطر ذرات مغناطیسی، نیروی میراگری کاهش پیدا می کند. به منظور تعیین ضخامت بهینه لایه



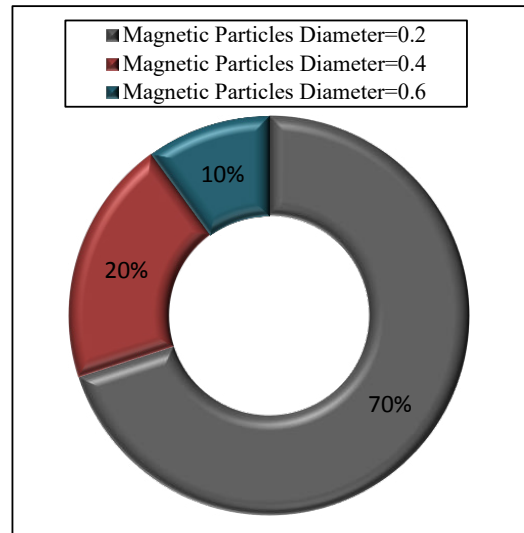
شکل ۱۴: تاثیر ضخامت بدون بعد لایه فعال در سطح بر نیروی میراگری در قطر ذرات مغناطیسی مختلف

Fig. 14. Effect of the non-dimensional thickness of surfactant layer on the damping force at different diameters of magnetic particles

آنچه در شکل ۱۵ نشان داده شده است، در این شرایط ۷۰ درصد از سطح نمودار در محدوده نیروی میراگری ۱۰ نیوتن با خطای ۲۰ درصد قرار دارد، در حالی که سهم دیگر نمودارها در ضخامت‌های دیگر لایه فعال و قطرهای متفاوت ذرات مغناطیسی کمتر می‌باشد. بنابراین علاوه بر توان مغناطیسی ۴۰٪ و چگالی ذرات مغناطیسی ۰/۶، قطر بدون بعد ذرات مغناطیسی و ضخامت لایه فعال در سطح بهینه را به ترتیب برابر با ۰/۲ و ۰/۳ در نظر می‌گیریم.

۴-۴- بررسی اثر جرم ذرات استهلاکی بر نیروی میراگری

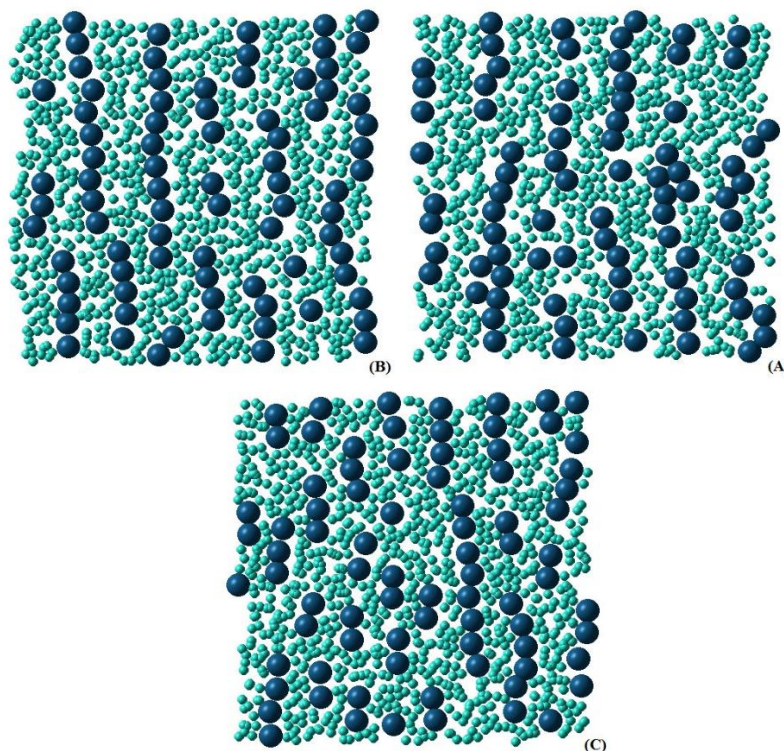
ذرات استهلاکی حمل‌کننده ذرات مغناطیسی بوده و در نحوه چیدمان آن‌ها نقش مستقیم دارند. همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، هنگامی که ذرات استهلاکی در پایین‌ترین جرم خود قرار دارند زنجیره ذرات مغناطیسی نسبتاً کامل می‌باشد با این حال ضخامت زنجیره‌ها بیشتر بوده و انحراف نسبتاً زیادی با جهت میدان مغناطیسی دارند. این انحراف به این دلیل رخ می‌دهد که جرم کم ذرات استهلاکی قادر به کنترل و حفظ ذرات مغناطیسی نبوده و بنابراین ذرات مغناطیسی به سمت چپ یا راست منحرف می‌شوند. در حالتی که از جرم متوسط ذرات استهلاکی استفاده



شکل ۱۵: محدوده توان مغناطیسی مطلوب در قطر ذرات مغناطیسی مختلف

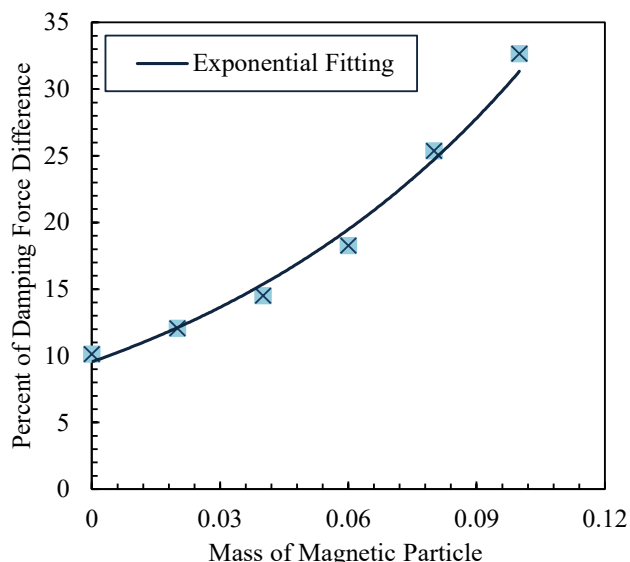
Fig. 15. Suitable range of the damping force at different diameters of magnetic particles

فعال در سطح با تحلیل نمودار مشخص می‌شود که با استفاده از لایه فعال در سطح به ضخامت بدون بعد ۰/۳ و استفاده از ذرات مغناطیسی با قطر بدون بعد ۰/۲ بیشترین محدوده از توان میراگری ۱۰ نیوتن به‌عنوان توان مقرر مورد نظر حاصل می‌گردد. با توجه به



شکل ۱۶: نتایج حاصل از مدل‌سازی در جرم ذرات استهلاکی مختلف (الف) جرم ۰/۰۲ (ب) جرم ۰/۱ (ج) جرم ۰/۲

Fig. 16. Results of the modeling at different mass of dissipative particles (A) mass of 0.02 (B) mass of 0.1 (C) mass of 0.2



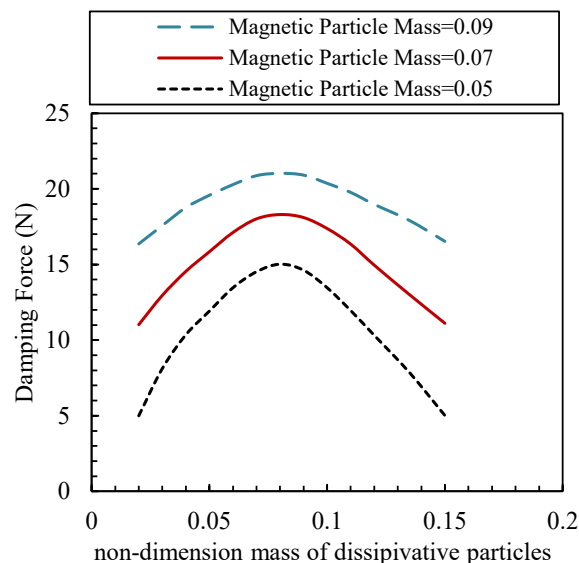
شکل ۱۸: درصد اختلاف نیروی میراگری نسبت به تغییر جرم بدون بعد ذرات مغناطیسی

Fig. 18. Difference percentage of the damping force versus non-dimensional weights of magnetic particles

طول کوتاه‌تری تشکیل می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱۷ با افزایش جرم ذرات استهلاکی، نیروی میراگری ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش جرم ذرات مغناطیسی نیروی میراگری افزایش یافته و تغییرات این نیرو نسبت به جرم ذرات استهلاکی کاهش می‌یابد. با توجه به مقدار نیروی میراگری مورد نظر جرم بهینه ذرات مغناطیسی و استهلاکی به ترتیب برابر با ۰/۰۵ و ۰/۱ انتخاب می‌شود. با تحلیل نتایج حاصل شده مطابق شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که تغییر نیروی میراگری با افزایش جرم ذرات مغناطیسی با الگوی تابع نمایی و به صورت افزایشی می‌باشد.

آنالیز حساسیت به منظور بررسی میزان تاثیرپذیری شاخص‌های چگالی ذرات مغناطیسی، ضخامت لایه فعال در سطح و جرم ذرات استهلاکی بر روی نیروی میراگری با استفاده از ابزار مرتبط داخل نرم‌افزار متلب انجام شده است. همانطور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است جرم ذرات استهلاکی بیشترین تاثیر در تغییر نیروی میراگری را داشته در حالی که ضخامت لایه فعال در سطح کمترین اثر را دارد.

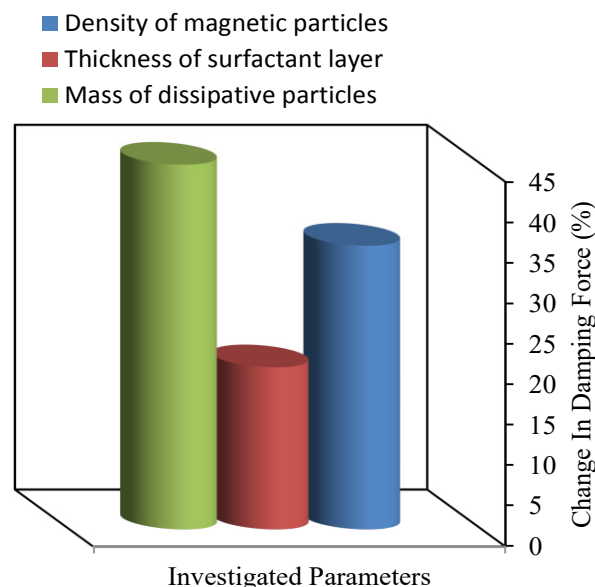
با توجه به ضرایب معادل پارامترهای مختلف بررسی شده در سیالات مغناطیسی تجاری مرسوم مطابق آنچه در جدول ۳ ارائه



شکل ۱۷: تغییرات نیروی میراگری نسبت به وزن بدون بعد ذرات استهلاکی در وزن بدون بعد متفاوت از ذرات مغناطیسی

Fig. 17. Variations of the damping force versus the non-dimensional weight of dissipative particles at different non-dimensional weights of magnetic particles

می‌شود، زنجیره کامل ذرات مغناطیسی بدون انحراف از جهت میدان مغناطیسی تشکیل می‌گردد. هنگامی که ذرات استهلاکی با جرم زیاد مورد استفاده قرار بگیرد، هر چند انحراف به چپ و راست کم بوده اما به دلیل عدم جابجایی آسان ذرات مغناطیسی زنجیره ذرات با



شکل ۱۹: آنالیز حساسیت شاخص‌های مختلف بر روی نیروی میراگری

Fig. 19. Sensitivity analysis of different parameters on the damping force

جدول ۳: مقادیر معادل پارامترهای بررسی شده در مدل‌سازی در سیالات مغناطیسی مرسوم

Table 3. Equivalent value of investigated parameters at modeling for common magnetic fluids

جرم ذرات مغناطیسی	جرم ذرات استهلاکی	چگالی ذرات مغناطیسی	ضخامت لایه فعال در سطح	قطر معادل ذرات مغناطیسی	سیال مغناطیسی
۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۵۵	۰/۲	۰/۱	۱۲۲-ای جی
۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۶۷	۰/۳۱	۰/۱۷	۱۳۲-دی جی
۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۷۳	۰/۳۶	۰/۲۵	۱۴۰-سی جی
۰/۰۵	۰/۱	۰/۶	۰/۳	۰/۲	سیال پیشنهادی

ذرات مغناطیسی، جرم ذرات مغناطیسی و ذرات استهلاکی بهینه به ترتیب ۰/۶، ۰/۰۵ و ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود. در نهایت با توجه به ابعاد اندازه بهینه حاصل شده از نتایج مدل‌سازی به منظور فراهم آوردن توان میراگری ۱۰ نیوتن با مصرف کمترین انرژی، با توجه به میزان متوسط مصرف توان مغناطیسی ۴۰ درصد سیال مغناطیسی با نام تجاری ۱۳۲-دی جی به‌عنوان سیال مناسب انتخاب می‌گردد. بنابراین با توجه به بررسی اثر خواص فیزیکی سیال مغناطیسی و تعیین شاخص‌های موثر آن بر نیروی میراگری می‌توان سیال مغناطیسی با ساختار و مواد سازنده بهینه‌ای را تهیه کرد که به منظور عملکرد داخل میراگرها در مقیاس کوچک همانند صنایع الکتریکی در جانمایی پردازشگرهای الکتریکی بر روی صفحات الکتریکی و در مقیاس بزرگ همانند صنایع خودروسازی و عمران و پزشکی در حالت بهینه و صرف کمترین انرژی بکار روند. با توجه به اهمیت کاهش مصرف انرژی در میراگرهای هیدرولیکی مغناطیسی، در مطالعات بعدی می‌توان به بررسی و بهینه‌سازی چیدمان سیم‌پیچ‌های الکتریکی در داخل میراگر پرداخت.

مراجع

- [1] Y.B. Kazakov, N.A. Morozov, S.A. Nesterov, Nesterov calculation of force-velocity relationship of electromechanical magnetorheological fluid damper, *Vestnik IGEU*, 11(4) (2015) 17–22.
- [2] J. Rabinow, The magnetic fluid clutch, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 67(2) (1948) 1308–1315.
- [3] Jr.B.F. Spencer, S. J. Dyke, M.K. Sain, J.D. Carlson,

شده است داده‌های معادل سیال مغناطیسی ۱۳۲-دی جی بیشترین نزدیکی به مقادیر بهینه انتخاب شده در مطالعه کنونی را داشته و به‌عنوان سیال مطلوب جهت فراهم آوردن توان میراگری مورد نظر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از روش مدل‌سازی مولکولی دینامیک ذره استهلاکی به مدل‌سازی میراگر هیدرولیکی مغناطیسی در مقیاس کوچک پرداخته شده و تاثیر پارامترهای مولکولی سیال مغناطیسی عامل در میراگر بر توان میراگری مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این که نیروی میراگری مطلوب در میکروماشین‌های استفاده‌کننده از این تجهیزات در محدوده ۱۰ نیوتن می‌باشد، پارامترهای مولکولی بهینه سیال مغناطیسی جهت فراهم آوردن این مقدار نیروی میراگری تعیین شده‌اند. نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج تجربی موجود در مقالات مقایسه شده که انطباق خوبی مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد با افزایش قطر ذرات مغناطیسی، نیروی میراگری افزایش پیدا می‌کند، در حالی که افزایش ضخامت لایه فعال در سطح بر روی این ذرات نیروی میراگری را کاهش می‌دهد. با توجه به مقدار نیروی میراگری حاصل شده قطر بدون بعد ذرات مغناطیسی و ضخامت بدون بعد لایه فعال در سطح به ترتیب برابر با ۰/۲ و ۰/۳ در نظر گرفته می‌شود. مطالعات بر روی چگالی ذرات مغناطیسی نشان می‌دهد با افزایش چگالی بدون بعد این ذرات، نیروی میراگری ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. افزایش جرم بدون بعد ذرات استهلاکی نیز چنین روندی را داشته و سبب افزایش نیروی میراگری و سپس کاهش آن می‌شود. در این شرایط چگالی بدون بعد بهینه

- Nonlinear Dynamics*, 48(4) (2007) 361–380.
- [15] F. Ikhouane, J. Rodellar, *Systems with hysteresis: analysis, identification and control using the Bouc–Wen model*, John Wiley and Sons, 2007.
- [16] K. Srinivasa, K. Venugopal, L. Patnaik, A self-adaptive migration model genetic algorithm for data mining applications, *Information Sciences*, 177(20) (2007) 4295-4313.
- [17] W.H. Li, G.Z. Yao, G. Chen, S.H. Yeo, F.F. Yap, Testing and steady state modeling of a linear MR damper under sinusoidal loading, *J. Smart Mater. Struct.*, 9(3) (2000) 95–102.
- [18] H. Hesselbach, C. Abel-Keilhack, 2003 Finite element flow analysis of magnetic fluids with yield stress, *Book of Abstracts des 5 Deutschen Ferro fluid-Workshop*, (2000) 15–60.
- [19] X. Wang, F. Gordaninejad, Flow analysis and modeling of field-controllable electro and magneto-rheological fluids using Herschel-Bulkley model, *J. intel. Mat. Sys. Struc.*, 10(8) (1999) 601-608.
- [20] N. Yasrebi, A. Ghazavi, M.M. Mashhadi, Magneto-rheological fluid dampers modeling: numerical and experimental. In: *Proceeding of the 17th IASTED international conference modeling and simulation*, May 24–26 (2006), Montreal, Canada.
- [21] J. Widjaja, B. Samali, J. Li, Electrorheological and magnetorheological duct flow in shear-flow mode using Herschel–Bulkley constitutive model, *J. Eng. Mech.*, 129(12) (2003) 1459–1465.
- [22] D. Susan-Resiga, 2009 A rheological model for magneto-rheological fluids, *J. Intell .Mater. Syst. Struct.*, 20(13) (2009) 1001–1010.
- [23] G.H. Hitchcock, *A novel magneto-rheological fluid damper*, Master thesis Mechanical engineering Department Reno University of Nevada, (2002).
- [24] N.C. Rosenfield, N.M. Wereley, Volume-constrained optimization of magnetorheological and electrorheological valves and dampers, *Smart Mater. Struct.*, 13(6) (2004) 1303–1313.
- [25] Z. Parlak, T. Engin, I. Calli, Optimal design of MR Phenomenological model for a magnetorheological damper. *ASCE J. Eng. Mech.*, 123(3) (1997) 230–238.
- [4] D. Case, B. Taheri, E. Richer, Dynamic magnetorheological damper for orthotic tremor suppression, *Biomed. Eng. Technol.* 12 (2) (2011) 12-18.
- [5] A. Rodriguez, F. Ikhouane, J. Rodellar, N. Luo, Modeling and identification of a small-scale magnetorheological damper. *J Intell Mater Syst Struct*, 20(7) (2009) 825–835.
- [6] J.W. Tu, J. Liu, W.L. Qu, Q. Zhou, H.B. Cheng, X.D. Cheng, Design and Fabrication of 500-kN Large-scale MR Damper, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22(5) (2011) 475-487.
- [7] H. Xu, I. Qin, H. Clauberg, B. Chylak, V.L. Acoff, Behavior of palladium and its impact on intermetallic growth in palladium-coated cu wire bonding, *Acta Mater.* 61(1) (2013) 79–88.
- [8] D.R. Gamota, F.E. Filisko, Dynamic mechanical studies of electro rheological materials: moderate frequencies, *J. Rheol.* 35(3) (1991) 399–425.
- [9] R. Stanway, J.L. Sproston, N.G. Stevens, Non-linear modelling of an electro-rheological vibration damper, *J. Electro stat.* 20 (2) (1987) 167–84.
- [10] Y.F.Liu, J. Li, Z. M. Zhang, X. H. Hu, W. Zhang, Wxperimental comparison of five friction models on the same test-bed of the micro stick-slip motion system, *J. Mech. Sci.*, 32(6) (2015) 15-28.
- [11] S.B. Choi, S.K. Lee, A hysteresis model for the field-dependent damping force of a magneto rheological damper. *Journal of Sound and Vibration*, 245(2) (2001) 375-383.
- [12] D.H. Wang, W.H. Liao, Modeling and control of magneto rheological fluid dampers using neural networks, *Smart Materials and Structures*, 14(1) (2005) 111-126.
- [13] M. Sugeno, G.T. Kang, Structure identification of fuzzy model, *Fuzzy Sets and Systems*, 28(1) (1988) 15-33.
- [14] F. Ikhouane, J.E. Hurtado, J. Rodellar, Variation of the hysteresis loop with the BoucWen model parameters,

- dynamics, *J. Comp. Phys.*, 214(1) (2006) 491-504.
- [32] D.A. Mackie, J.B. Avalos, V. Navas, Dissipative particle with energy conservation: Modelling of heat flow, *J. Phys. Chem.*, 3(1) (1999) 2039-2049.
- [33] E.E. Keaveny, I.V. Pivkin, M. Maxey, G.E. Karniadakis, coarse-graining limits in open and wall-bounded dissipative particles, *J. Chem. Phys.* 123(10) (2005) 104107-104113.
- [34] N. Phan-Thien, *Understanding Viscoelasticity*, second edition, Springer, 2013.
- [35] J. Li, F. Li, Q. Tian, C. Zhou, C. Xiao, L. Huang, W. Wang, W. Zhu, Force-electrical characteristics of a novel mini-damper *Smart Mater. Struct.*, 25 (4) (2016) 105009-105016.
- [36] B. Sapinski, J. Filus, *Analysis of Parametric Models of MR Linear Damper. Department of Process Control*, University of Mining and Metallurgy, 2003.
- [37] X. Bai, N.M. Wereley, W. Hu, Maximizing semi active vibration isolation utilizing a magneto rheological damper with an inner bypass configuration, *J. appli. Phys.*, 117(2) (2015) 117-123.
- [38] B. Mehrkian, A. Bahar, A. Chaibakhsh, Genetic algorithm based optimization approach for MR damper fuzzy modeling, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 59(2) (2011) 1035-1042.
- damper via finite element analyses of fluid dynamic and magnetic field, *Mechatronics*, 22(6) (2012) 890-903.
- [26] R.S. Prabakar, C. Sujatha, S. Narayanan, Response of a quarter car model with optimal magnetorheological damper parameters, *Journal of Sound and Vibration*, 332(9) (2013) 2191-2206.
- [27] D.H. Wang, W.H. Liao, Neural network modeling and controllers for magnetorheological fluid dampers, in: *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Melbourne, Australia, December, (2001) 1323-1326.
- [28] K.C. Schurter, P.N. Roschke, Fuzzy modeling of a magnetorheological damper using ANFIS, in: *Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, San Antonio, TX, (2000) 122-127.
- [29] T. Tse, C.C. Chang, Shear-mode rotary magnetorheological damper for small-scale structural control experiments, *J. Struct. Eng.*, 130(6) (2004) 904-911.
- [30] D.R. Gamota, F.E. Filisko, Dynamic mechanical studies of electrorheological materials: Moderate frequencies, *J. Rheology*, 35(3) (1991) 199-225.
- [31] D.C. Visser, H.C.J. Hoefsloot, P.D. Iedema, Modelling multi-viscosity systems with dissipative particle

