



## Investigation of Magneto-Rheological Fluid Properties inside MR Damper by Use of Dissipative Particle Dynamics Method

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Ghafarian Eidgahi Moghadam M.<sup>1</sup>  
MSc, Shahmardan M.M.\*<sup>1</sup> PhD,  
Norouzi M.<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Ghafarian Eidgahi Moghadam M, Shahmardan M.M, Norouzi M. Investigation of Magneto-Rheological Fluid Properties inside MR Damper by Use of Dissipative Particle Dynamics Method. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(4):991-1000.

<sup>1</sup>Heat & Fluid Department, Mechanical Engineering Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

#### \*Correspondence

Address: Shahrood University of Technology, University Boulevard, Haftom Tir Square, Shahrood, Iran.  
Postal Code: 3619995161  
Phone: +98 (23) 32300258  
Fax: +98 (23) 32300258  
mmshahmardan@shahroodut.ac.ir

#### Article History

Received: June 01, 2018  
Accepted: November 04, 2018  
ePublished: April 06, 2019

### ABSTRACT

Magneto-rheological damper is one of the most widely used mechanical equipment, which absorbs mechanical shocks by use of magnetic fluid and electrical coil in its structure. In this paper, for the first time, dissipative particle dynamics as a mesoscopic scale modeling method was used to simulate a magneto-rheological damper and its magnetic fluid. Data from 3 categories including magnetic fluids with brand names 122-EG, 132-DJ, and 140-CG have been used and effect of their physical properties on power of damping force have been investigated. Results of modeling show that by increasing shear rate of fluid, shear stress is first increased and, then, it is applied to a constant value, which results in a greater shear stress by applying a stronger magnetic field. It is also observed that, with increasing both maximum piston velocity and strength of magnetic field, maximum power of damping force increased, which in 140-CG is higher than the other fluids. Results of sensitivity analysis show that weight of magnetic particles and strength of dissipative forces have the greatest effect on damping force, in such a way that by increasing weight of magnetic particles and decreasing the dissipative force of particles, accumulation of magnetic particles decrease, so, increasing quality of damping. It was also found that 122-EG is more suitable than other types of magnetic fluids in forming standard magnetic particle chains, and provides a more favorable viscosity distribution for damping.

**Keywords** Magneto-Rheological Damper; Dissipative Particle Dynamics; Magnetic Fluid; Damping Force

### CITATION LINKS

[1] Rheology of magnetorheological fluids: Models and measurements [2] Directions in ferrohydrodynamics [3] Optimal design of MR shock absorber and application to vehicle suspension [4] Field vibration tests of bridge stay cables incorporated with magnetorheological (MR) dampers [5] Experiment and analysis of torsional seismic responses for asymmetric structures with semi-active control by MR dampers [6] An input-to-state stabilizing control approach for non-linear structures under strong ground motions [7] Computational fluid dynamics simulation and experimental investigations into the magnetic-field-assisted nano-finishing process [8] A prototype rehabilitation device with variable resistance and joint motion control [9] Multi-objective control optimization for semi-active vehicle suspensions [10] An inverse model of MR damper using optimal neural network and system identification [11] Forward and inverse fuzzy magnetorheological damper models for control purposes [12] A magneto-rheological fluid shock absorber for an off-road motorcycle [13] Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models [14] Modeling and application of MR dampers in semi-adaptive structures [15] modeling, and testing of an annular-radial-duct magnetorheological damper [16] Design of magnetorheological damper with a combination of shear and squeeze modes [17] Multiphysics behavior of a magneto-rheological damper and experimental validation [18] Response of a quarter car model with optimal magnetorheological damper parameters [19] Development of 400KN magnetorheological damper for a real base isolated building [20] Lattice Gas Hydrodynamics [21] Cellular automata modeling of physical systems [22] Simulating microscopic hydrodynamic phenomena with dissipative particle dynamics [23] Statistical mechanics of dissipative particle dynamics [24] Comparison between theoretical values and simulation results of viscosity for the dissipative particle dynamics method [25] Introduction to molecular-microsimulation of colloidal dispersions [26] Hoogerbrugge PJ. Dynamic simulations of hard-sphere suspensions under steady shear [27] The statistical mechanical theory of transport processes [28] Damping force of MR damper analysis and experimental

## بررسی خصوصیات سیال مغناطیسی در داخل میراگر هیدرولیکی مغناطیسی به روش دینامیک ذره استهلاکی

محسن غفاریان عیدگاهی مقدم MSc

گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

محمد محسن شاه مردان\* PhD

گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

محمود نوروزی PhD

گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

### چکیده

میراگرهای هیدرولیکی مغناطیسی یکی از پرکاربردترین تجهیزات مکانیکی هستند که با استفاده از سیال مغناطیسی و سیم پیچ‌های الکتریکی در داخل خود به عنوان جذب کننده شوک‌های فیزیکی به کار می‌روند. در این مقاله برای اولین بار با استفاده از روش دینامیک ذره استهلاکی به عنوان یک روش مدل‌سازی در مقیاس مزو به مدل‌سازی میراگر هیدرولیکی مغناطیسی و سیال مغناطیسی داخل آن پرداخته شده است. اطلاعات از سه دسته از سیالات مغناطیسی با نام‌های تجاری ۱۲۲-ای جی، ۱۳۲-دی جی و ۱۴۰-سی جی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و تاثیر خصوصیات فیزیکی آنها بر توان میراگری بررسی و مقایسه شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد با افزایش نرخ برش سیال، تنش برشی ابتدا افزایش یافته سپس به مقدار ثابت میل می‌کند که با اعمال میدان مغناطیسی قوی‌تر تنش برشی بیشتری ایجاد می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش حداکثر سرعت پیستون و افزایش قدرت میدان مغناطیسی، حداکثر توان میراگری افزایش یافته که این افزایش در سیال ۱۴۰-سی جی نسبت به بقیه سیال‌ها بیشتر است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که وزن ذرات مغناطیسی و قدرت نیروی استهلاکی ذرات سیال بیشترین تاثیر را روی توان میراگری می‌گذارند، به صورتی که با افزایش وزن ذرات مغناطیسی و کاهش ضریب قدرت استهلاکی ذرات، تجمع ذرات مغناطیسی کاهش یافته و کیفیت میراگری افزایش پیدا می‌کند. همچنین مشخص شد سیال ۱۲۲-ای جی نسبت به دیگر انواع سیال مغناطیسی در تشکیل زنجیره‌های استاندارد ذرات مغناطیسی مناسب‌تر بوده و توزیع گرانروی مطلوب‌تری را برای میراگری ایجاد می‌کند.

**کلیدواژه‌ها:** میراگر هیدرولیکی مغناطیسی، دینامیک ذره استهلاکی، سیال مغناطیسی، توان میراگری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۹

\* نویسنده مسئول: mmshahmardan@shahroodut.ac.ir

### ۱- مقدمه

سیال دارای ماهیت مغناطیسی، به گروهی از سیالات ناهمگن گفته می‌شود که شامل ذرات جامد مغناطیسی پراکنده شده در یک حلال غیرآبی هستند [1, 2]. از نقطه نظر کاربردی، سیالات مغناطیسی مهم‌ترین دسته از این سیالات هستند که در آنها ذرات جامد مغناطیسی پراکنده در مقیاس یک میکرون و در حلالی با دامنه ویسکوزیته زیاد از جمله روغن‌های سنتز شده، معلق هستند. در حالتی که ذرات پراکنده از جنس آهن باشند، ۸۰ تا ۸۵ درصد وزنی یا ۲۰ تا ۴۰ درصد حجمی سیال مغناطیسی را شامل می‌شوند. خصوصیت اصلی این نوع از سیالات، تغییر خواص ناگهانی و برگشت پذیر جریان شناختی آنها در معرض میدان مغناطیسی است. محدوده لازم برای اعمال این میدان در هوا ۱۰۰ میلی‌تسلا است. تغییر اصلی، در خصوصیات سیال مربوط به انتقال شرایط جریان

شناختی از حالت نیوتنی به حالت پلاستیک است که سبب ایجاد یک ویسکوزیته شدید و به وجود آمدن تنش تسلیم در مقیاس کیلو پاسکال است و این خصوصیت به عنوان اثر مغناطیسی شناخته می‌شود. چنین خصوصیتی سبب ایجاد کاربردهای فراوان برای این نوع از سیال می‌شود که مهم‌ترین آن استفاده در صنعت خودرو به عنوان سیال عامل میراکننده شوک‌های مکانیکی در میراگرها است. از دیگر کاربردهای این نوع از سیال می‌توان به استفاده در سیستم‌های میراکننده نوسانات متناوب و غیرمتناوب [3]، رفع لرزش هنگام وقوع زلزله در صنایع عمران [4-6]، صنایع تراشکاری و صیقل‌سازی [7] و علوم پزشکی و اورتوپدی برای ساخت اندام‌های مصنوعی [8] اشاره کرد. یکی از مهم‌ترین مواردی که هنگام استفاده از سیال مغناطیسی مورد بررسی قرار می‌گیرد، تنظیم خصوصیات سیال به منظور عملکرد بهینه آن است. به عنوان مثال به منظور پاسخ‌دهی مناسب سیال به میدان مغناطیسی لازم است که غلظت ذرات جامد معلق حداقل ۲۰ درصد حجمی سیال مغناطیسی باشد، در حالی که افزایش کنترل نشده غلظت منجر به عدم پایداری ذرات پراکنده و ایجاد تجمع ذرات مغناطیسی می‌شود که پراکنده‌سازی مجدد آن پیچیده و سخت است. بنابراین هنگام ساخت تجهیزاتی که از سیال مغناطیسی در ساختمان خود استفاده می‌کنند، بررسی شرایط فیزیکی سیال و شرایط اعمال شده از طرف محیط به سیال برای عملکرد بهینه تجهیزات اجتناب ناپذیر است.

از آنجایی که کاربرد اصلی سیالات مغناطیسی در میراگرهای هیدرولیکی مغناطیسی است، به بررسی رفتار جریان شناختی سیال مغناطیسی داخل این میراگرها پرداخته ایم. در ساختار یک میراگر هیدرولیکی مغناطیسی به جای سیال هیدرولیکی از سیال مغناطیسی استفاده شده و در طول کانال میراگر، سیم پیچ الکتریکی قرار گرفته است. هنگامی که میراگر با یک شوک مکانیکی مواجه می‌شود، حین حرکت پیستون، جریال الکتریکی داخل سیم پیچ سبب ایجاد میدان مغناطیسی شده که منجر به ایجاد زنجیره مغناطیسی ذرات جامد پراکنده داخل سیال حامل می‌شود. در این حالت، ویسکوزیته و خواص فیزیکی سیال تغییر می‌یابد و توان میراگری افزایش پیدا می‌کند. مطالعات مختلفی به منظور مدل‌سازی ریاضی میراگر هیدرولیکی مغناطیسی از جمله مدل‌سازی‌های ریاضی و دینامیک سیالات محاسباتی [9]، شبکه عصبی مصنوعی [10]، منطق فازی [11]، المان محدود [12] و مطالعات تجربی [13] انجام گرفته است. دومینگر و همکاران [14] با استفاده از روش المان محدود به مدل‌سازی یک میراگر و بررسی اثر دامنه و فرکانس رفت و برگشت پیستون و قدرت میدان مغناطیسی روی توان میراگری پرداختند و مدل‌سازی خود را با نتایج تجربی اعتبارسنجی کردند. آنها در مطالعات خود، شرایط نوسانی و دامنه حرکت پیستون را مورد بررسی قرار دادند. بای و همکاران [15] با استفاده از روش المان محدود به بررسی شرایط تغییر فشار جریان سیال داخل میراگر پرداختند و نتایج خود را با مدل‌سازی عددی و همچنین نتایج تجربی، مقایسه و اعتبارسنجی کردند. آنها اثر قدرت میدان مغناطیسی بر توان میراگری را مورد بررسی قرار دادند و ثابت کردند که با افزایش توان مغناطیسی، توان میراگری افزایش می‌یابد. یازید و همکاران [16] با استفاده از روش عددی به بررسی رفتار برشی سیال مغناطیسی داخل میراگر مغناطیسی پرداخته و ثابت کرده‌اند که تنش تسلیم سیال، تابع میدان مغناطیسی اعمال شده بر آن است. آنها در مطالعات خود از سیم پیچ‌های مغناطیسی متوالی به منظور اعمال میدان مغناطیسی استفاده کردند. استرنبرگ و همکاران [17] با استفاده از روش عددی و تغییر

پرداخته می‌شود [22-25]. سه نوع نیرو روی یک ذره مغناطیسی  $i$  وارد می‌شود که عبارت از نیروی دافعه بقایی  $F_{ij}^C$  بوده که توسط ذرات دیگر اعمال می‌شود، نیروی استهلاکی  $F_{ij}^D$  که نقش اصطکاک میان ذرات سیستم را داشته و ایجادکننده ویسکوزیته بوده و نیروی تصادفی  $F_{ij}^R$  که بیانگر حرکت حرارتی ذرات است. با توجه به نیروهای نامبرده در بالا، معادله حرکت ذره  $i$  به صورت زیر نوشته می‌شود:

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

که در آن:

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

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

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

$M_d$  جرم ذره  $i$  بوده و  $v_i$  سرعت آن است. در ارتباط با زیرنویس‌ها به عنوان نمونه،  $F_{ij}^C$  نیرویی است که توسط ذره  $j$  به ذره  $i$  اعمال می‌شود. مقادیر  $\alpha$ ،  $\gamma$  و  $\sigma$  ثوابتی هستند که به ترتیب قدرت نیروی دافعه، نیروی استهلاکی و نیروی تصادفی را بیان می‌کنند. توابع وزنی  $w_R(r_{ij})$  و  $w_D(r_{ij})$  به صورتی که نیروی بین ذرات با افزایش فاصله میان ذرات کاهش یابد، تعریف می‌شوند:

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

در معادلات بالا،  $d_c$  قطر ظاهری ذرات استهلاکی و  $r_{ij}$  موقعیت نسبی است که به صورت  $r_{ij} = r_i - r_j$  ارایه می‌شود.  $e_{ij}$  بردار یکه بوده که بیانگر جهت ذره  $i$  نسبت به ذره  $j$  است و به صورت  $e_{ij} = r_{ij}/r_{ij}$  بیان می‌شود.  $v_{ij}$  سرعت نسبی بوده که به صورت  $v_{ij} = v_i - v_j$  تعریف می‌شود و  $k$  ثابت بولتزنم و  $T$  دمای مایع است. همچنین  $\zeta_{ij}$  یک متغیر تصادفی است که حرکت تصادفی ذرات را ایجاد می‌نماید.

اگر از معادله ۱، نسبت به زمان در یک محدوده کوچک بین  $t$  تا  $t + \Delta t$  انتگرال‌گیری کنیم، معادله اختلاف محدود حاکم بر حرکت ذره به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Delta r_i = v_i \Delta t \quad (6)$$

$$\Delta v_i = \frac{\alpha}{M_d} \sum_{j(\neq i)} w_R(r_{ij}) e_{ij} \Delta t - \frac{\gamma}{M_d} \sum_{j(\neq i)} w_R^2(r_{ij}) (e_{ij} \cdot v_{ij}) e_{ij} \Delta t + \frac{(2\gamma kT)^{1/2}}{M_d} \sum_{j(\neq i)} w_R(r_{ij}) e_{ij} \theta_{ij} (\Delta t)^{1/2} \quad (7)$$

$\theta_{ij}$  یک متغیر تصادفی است و باید خاصیت‌های زیر را ارضا نماید:

$$\langle \theta_{ij} \rangle = 0 \quad (8)$$

$$\langle \theta_{ij} \theta_{i'j'} \rangle = (\delta_{ii'} \delta_{jj'} + \delta_{ij'} \delta_{ji'}) \quad (9)$$

$\delta_{ij}$  دلتای کرونکر است. در این مدل‌سازی، متغیر تصادفی  $\theta_{ij}$  از

هندسه داخلی میراگر به بررسی عملکرد میراگر مغناطیسی پرداختند و از فرض وجود تقارن محوری استفاده کرده بودند. *پرایاکار* و همکاران [18] با استفاده از روش ژنتیک الگوریتم به بررسی مقدار نیروی میراگری توسط میدان مغناطیسی اعمال شده و بهینه‌سازی آن پرداختند. *فوجیتانی* و همکاران [19] با استفاده از روش تحلیلی به مدل‌سازی میراگر به منظور حفظ ساختمان در مقابله با لرزش پرداختند. قابل توجه است که در هیچ یک از مطالعات انجام شده از روش‌های مدل‌سازی مولکولی استفاده نشده است.

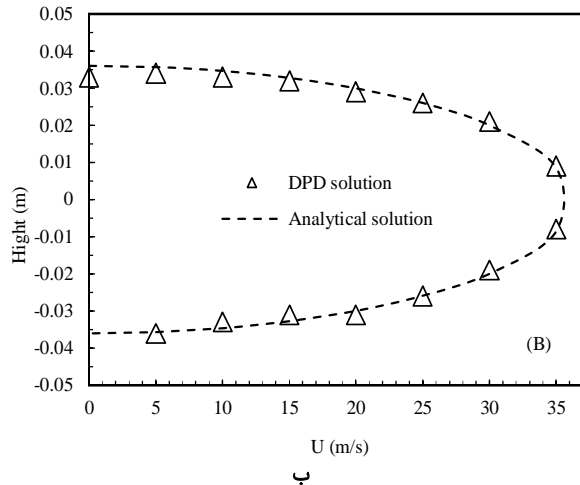
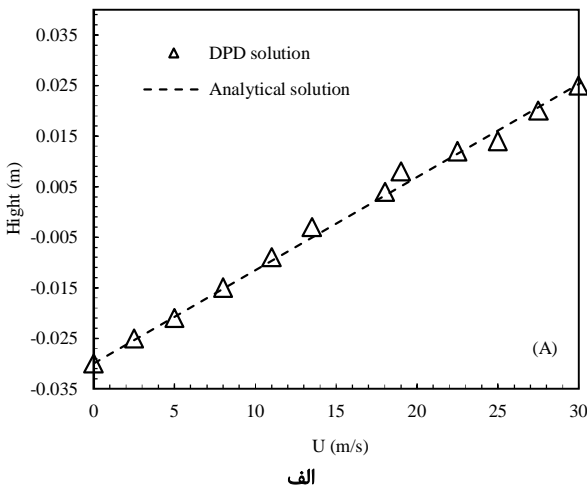
با توجه به این که بررسی شرایط فیزیکی سیال مغناطیسی داخل میراگر هیدرولیکی مغناطیسی در مقیاس بسیار کوچک دارای اهمیت زیادی است، استفاده از یک روش مدل‌سازی مولکولی می‌تواند خواص سیال مغناطیسی را در شرایط فیزیکی مختلف به صورت دقیق مورد مطالعه قرار دهد، در حالی که مطالعات پیشین صرفاً سیستم میراگر را در مقیاس بزرگ مورد بررسی قرار داده‌اند. از روش‌های مدل‌سازی مورد استفاده در مقیاس مولکولی می‌توان به روش مونت‌کارلو، دینامیک مولکولی، ذرات براونی و لیتیس‌بولتزنم اشاره کرد. روش مونت‌کارلو توانایی زیادی در حل تعادلات ترمودینامیک دارد، اما برای بررسی پدیده‌های دینامیک مناسب نیست. روش دینامیک مولکولی نیز برای تحلیل شرایط در حالت تعادل ترمودینامیک مفید بوده، اما با توجه به این که زمان مشخصه حرکت مولکول‌های حلال با ذرات پراکنده بسیار متفاوت است، برای تحلیل شرایطی که در آن پراکندگی ذرات در یک مایع پایه وجود دارد، چندان مناسب نیست. روش براونی نیز قدرت کافی برای بررسی همزمان ذرات در مقیاس‌های مختلف را نداشته و صرفاً برای سیستم‌های یکپارچه که حرکات براونی ذرات را مورد مطالعه قرار می‌دهند، مناسب است. روش دیگر شبیه‌سازی مولکولی، روش لیتیس‌بولتزنم است که سیال را به صورت ذرات مجازی در نظر گرفته و برای سیستم‌های خالص مفید است [20، 21]. در روش‌های مدل‌سازی مولکولی با توجه به این که سیستم در مقیاس بسیار کوچک مورد بررسی قرار می‌گیرد، مطالعه در محدوده وسیع بسیار زمان‌بر و پیچیده است. همچنین محدودیت در تعداد فازهای موجود در سیال و قرارگیری هر مولکول داخل شبکه تعریف شده وجود دارد. روش جدید مدل‌سازی با دقتی در مقیاس دسته مدل‌سازی‌های مولکولی، روش دینامیک ذره استهلاکی است. این روش که مقیاس مزوسیستم را مورد مطالعه قرار می‌دهد، با دسته‌بندی محیط و خوشه‌بندی ذرات، زمان انجام محاسبات را کاهش می‌دهد و همچنین برای سیستم‌های دارای پراکندگی ذرات بسیار مفید است. در این روش، ذرات با فعل و انفعال و تبادل مومنتومی که میان خود دارند، موقعیت و سرعت جدید خود را هر مرحله به صورت خودبه‌خودی محاسبه می‌نمایند و زمان محاسبات کاهش پیدا می‌کند. با توجه به این که خوشه ذرات حلال در نظر گرفته شد، زمان مشخصه آنها با ذرات پراکنده تفاوتی نداشته و مدل‌سازی همزمان دو فاز با یکدیگر امکان‌پذیر است.

## ۲- روش دینامیک ذره استهلاکی

### ۲-۱- معادله حرکت ذرات استهلاکی

یک سیال مغناطیسی به صورت میکروسکوپی شامل ذرات پراکنده مغناطیسی و مولکول‌های یک مایع پایه است. اگر مولکول‌های مایع را به صورت بسته‌های سیال در نظر بگیریم، حرکت ذرات مغناطیسی با توجه به فعل و انفعال میان ذرات استهلاکی مایع پایه با ذرات مغناطیسی و همچنین با خودشان ایجاد می‌شود. در این بخش به بررسی معادلات حرکت حاکم بر ذرات استهلاکی

زمانی که از این شرط مرزی استفاده می‌شود، ذرات پس از برخورد به مرز جامد، سرعت جدیدی پیدا می‌کنند و در جهت موازی و معکوس با جهت برخورد بازگردانده می‌شوند. به منظور بررسی صحت شرایط مرزی اعمال شده، جریان کوئث و پوازی در یک کانال مشابه با استفاده از روش دینامیک ذره استهلاکی و شرط مرزی بونس‌بک، مدل‌سازی و نتایج حاصل از مدل‌سازی دینامیک ذره استهلاکی با حل تحلیلی جریان مقایسه شده است. همان طور که در نمودار ۱ نشان داده شده، با اعمال این شرط انطباق قابل قبولی با حل تحلیلی ایجاد شده است و بنابراین می‌توان از روش دینامیک ذره استهلاکی به‌عنوان یک روش مدل‌سازی مطمئن و از شرط مرزی بونس‌بک به‌عنوان یک شرط مرزی قابل قبول در مدل‌سازی میراگر استفاده کرد.



نمودار ۱) مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی به روش دینامیک ذره استهلاکی با حل تحلیلی؛ الف) جریان کوئث، ب) جریان پوازی

با حرکت پیستون با توجه به اعمال میدان مغناطیسی توسط سیم‌پیچ الکتریکی، ذرات مغناطیسی به‌صورت زنجیروار به هم متصل می‌شوند و با تغییر گرانش و دیگر خصوصیات فیزیکی، سیال شوک مکانیکی به‌وجود آمده را رفع می‌نمایند. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده، توزیع سرعت داخل کانال میراگر مطابق مدل بینگام پلاستیک توسعه پیدا کرده و تأثیر میدان مغناطیسی در ایجاد تنش تسلیم و جریان قالبی اعمال شده است. مدل حرکت پیستون در داخل سیلندر به‌صورت سینوسی با دامنه ۰/۰۵ متر و فرکانس ۰/۵ هرتز در نظر گرفته شده و همچنین طول کانال در

یک توزیع یکنواخت با متوسط برابر با صفر و واریانس واحد دریافت می‌شود [26].

### ۲-۲- معادله حرکت ذرات مغناطیسی

یک ذره مغناطیسی را به‌صورت یک ذره کروی دارای دو قطبی مرکزی پوشیده‌شده از لایه فعال روی سطح در نظر می‌گیریم. اگر قطر قسمت جامد برابر  $d_s$ ، ضخامت لایه سورفکتانت برابر  $\delta$  و قطر کل ذره دارای لایه برابر با  $d$  باشد، آن‌گاه انرژی مغناطیسی میان ذره  $i$  و  $j$  برابر با  $u_{ij}^{(m)}$ ، انرژی برهم‌کنش میان میدان مغناطیسی و ذره برابر با  $u_{ij}^{(H)}$  و انرژی ناشی از همپوشانی لایه‌های فعال در سطح برابر با  $u_{ij}^{(V)}$  است که به‌صورت زیر ارایه می‌شوند:

$$u_{ij}^{(m)} = \frac{\mu_0}{4\pi r_{ij}^3} \{m_i \cdot m_j - 3(m_i \cdot t_{ij})(m_j \cdot t_{ij})\} \quad (10)$$

$$u_{ij}^{(H)} = -\mu_0 m_i \cdot H \quad (11)$$

$$u_{ij}^{(V)} = kT\lambda_V \left\{ 2 - \frac{2r_{ij}}{d_s} \ln\left(\frac{d}{r_{ij}}\right) - 2 \frac{r_{ij}}{d_s} - 1 \right\} \quad (12)$$

که در آن  $\mu_0$  نفوذپذیری فضای آزاد،  $m_i$  گشتاور مغناطیسی و  $t_{ij}$  بردار یکه است. همچنین  $H$  بیانگر میدان مغناطیسی اعمال شده و  $t_\delta$  برابر با نسبت ضخامت لایه فعال در سطح به شعاع بخش جامد ذره است. پارامتر بدون بعد  $\lambda_V$  در معادله ۱۲ بیانگر نسبت قدرت فعل و انفعال لایه فعال در سطح به انرژی حرارتی است و به‌صورت  $\lambda_V = \pi d_s^2 n_s / 2$  بیان می‌شود که در آن  $n_s$  برابر با تعداد مولکول‌های لایه فعال در سطح بر واحد سطح است. با استفاده از معادله‌های ۱۰ و ۱۲ نیرویی که به ذره  $i$  وارد می‌شود، برابر است با:

$$F_{ij}^{(m)} = -\frac{3\mu_0}{4\pi r_{ij}^4} [-(m_i \cdot m_j)t_{ij} + 5(m_i \cdot t_{ij})(m_j \cdot t_{ij})t_{ij} - \{(m_j \cdot t_{ij})m_i + (m_i \cdot t_{ij})m_j\}] \quad (13)$$

$$F_{ij}^{(V)} = \frac{kT\lambda_V}{\delta} \cdot \frac{r_{ij}}{r_{ij}} \ln\left(\frac{d}{r_{ij}}\right), \quad (d_s \leq d_{ij} \leq d) \quad (14)$$

حرکت ذرات مغناطیسی توسط معادلات نیوتن به دست می‌آید. بنابراین این معادلات نسبت به زمان تجزیه می‌شوند تا با استفاده از روش اختلاف محدود، حرکت ذرات داخل مدل تعیین شود:

$$\Delta r_i = v_i \Delta t \quad (15)$$

$$\Delta v_i = \sum_{j \neq i} F_{ij} \Delta t / M_m \quad (16)$$

که در آن  $M_m$  جرم ذره مغناطیسی است و  $F_{ij} = F_{ij}^{(m)} + F_{ij}^{(V)}$  را داریم. در این مطالعه از مدل پتانسیل لئاردجونز به‌منظور اعمال برهم‌کنش میان ذرات استهلاکی و ذرات مغناطیسی استفاده شده است.

### ۲-۳- مدل‌سازی میراگر هیدرولیکی مغناطیسی به روش دینامیک ذره استهلاکی

در ابتدای مدل‌سازی، ذرات با چیدمان مربعی در موقعیت اولیه خود قرار می‌گیرند و مقادیر سرعت اولیه با استفاده از تابع توزیع ماکسول به هر یک از ذرات اختصاص پیدا می‌کند. با توجه به وجود شرط عدم لغزش در بخش‌هایی از میراگر که تماس سیال با دیواره جامد رخ می‌دهد، از شرط مرزی بونس‌بک استفاده شده است.

که در آن  $\delta$  با استفاده از تابع  $\theta$  که معرف یک نویز سفید گوسی با مقدار متوسط صفر و پراکنش واحد است، تعریف می‌شود. همچنین پراکنش شکسته در روابط بیانگر تابع احتمال چگالی یک متغیر است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\langle RR \dots R \rangle = \int RR \dots R P(R, t) dR \quad (18)$$

سمت راست معادله ۱۷ می‌تواند به صورت زیر ارایه شود که بر مبنای طبیعت نامتقارن نیروهای برهم‌کنش بین ذرات است. به منظور ساده‌سازی روابط /بروین و کرکوود [27] قالب جدیدی را برای سمت راست معادله ۱۷ ارایه دادند که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$r - r_i = r - r_j - r_{ij} \quad (19)$$

با استفاده از بسط تیلور از عبارت  $\delta(r - r_i)$  حول  $r - r_j$  داریم:

$$\delta(r - r_i) = \delta(r - r_j) - \nabla \cdot \left[ r_{ij} \left( 1 - \frac{1}{2} r_{ij} \cdot \nabla + \dots \right) \delta(r - r_j) \right] \quad (20)$$

که با استفاده از آن داریم:

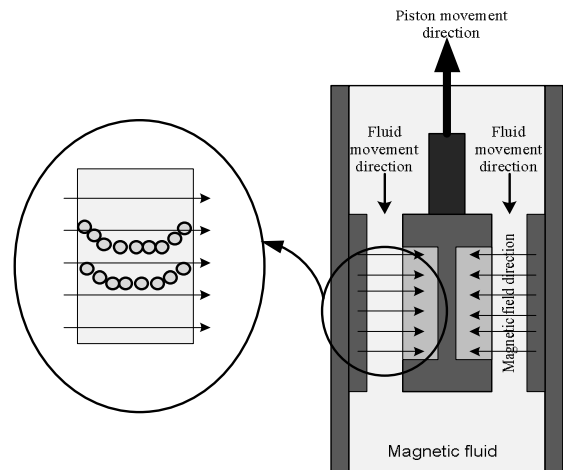
$$\sum_{i,j} \langle (F_{ij}^C + F_{ij}^D) \delta(r - r_i) \rangle = -\frac{1}{2} \nabla \cdot \sum_{i,j} (F_{ij}^C + F_{ij}^D) r_{ij} \left( 1 - \frac{1}{2} r_{ij} \cdot \nabla + \dots \right) \times \delta(r - r_j) = \nabla \cdot S = \nabla \cdot (S_C + S_D)$$

که در آن  $\nabla$  معرف دیورژانس است و داریم:

$$S(r, t) = -\frac{1}{2} \sum_{i,j} \langle (F_{ij}^C + F_{ij}^D) r_{ij} \left( 1 - \frac{1}{2} r_{ij} \cdot \nabla + \dots \right) \delta(r - r_j) \rangle = S_C(r, t) + S_D(r, t) \quad (22)$$

اکنون با استفاده از روابط به دست آمده به تحلیل تنش داخل میراگر برای سه سیال مغناطیسی مختلف می‌پردازیم. مطالعات در قدرت‌های مغناطیسی متفاوت اعمال شده توسط سیم‌پیچ الکتریکی انجام شده است. همان طور که در نمودار ۲ نشان داده شده است، هنگامی که میدان مغناطیسی ۳۰٪ اعمال می‌شود، برای سیال ۱۴۰- سی‌جی با افزایش نرخ برش تا  $24(1/S)$  تنش برشی افزایش پیدا می‌کند که این مقدار برای سیال ۱۳۲- دی‌جی و ۱۲۲- ای‌جی به ترتیب ۲۰ و  $18(1/S)$  است. سپس تنش برشی به مقداری تقریباً ثابت میل می‌کند. تفاوت در این مقادیر از آنجا ناشی می‌شود که تراکم ذرات مغناطیسی پراکنده در این سه نوع سیال متفاوت است و با توجه به غلظت ذرات، تمایل به تغییر در شرایط تنش در مقادیر مختلف از نرخ برش رخ می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش توان مغناطیسی اعمال شده به سیال، تنش برشی ایجاد می‌شود و همچنین نرخ برشی که در آن تنش به حد نسبتاً ثابت می‌رسد، افزایش پیدا می‌کند و با توجه به نمودارهای ۳ و ۴، این افزایش برای تنش برشی به صورت تابع چندجمله‌ای درجه دو و برای حد بحرانی نرخ برش به صورت تابع نمایی است.

معرض جریان سیال داخل میراگر ۰/۱ متر بوده و ارتفاع این کانال ۰/۱ متر است.



شکل ۱) نمای میراگر مدل سازی شده

#### ۴-۲- سیالات مغناطیسی مورد مطالعه

در این مطالعه سه نوع مختلف از سیال مغناطیسی برای استفاده در میراگرهای هیدرولیکی مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. هر یک از این سیالات دارای خصوصیات منحصر به خود بوده‌اند و شرایط میراگری متفاوتی را به وجود می‌آورند. در طول مدل‌سازی، خصوصیات منحصر به هر سیال با توجه به پارامترهای موجود در مدل‌سازی ایجاد شده تا تأثیرات استفاده از هر یک از انواع سیال روی عملکرد میراگر مشاهده می‌شود. سه مدل تجاری سیال مغناطیسی مورد استفاده در مدل‌سازی عبارت از ۱۲۲- ای‌جی، ۱۳۲- دی‌جی و ۱۴۰- سی‌جی هستند که تعدادی از خصوصیات فیزیکی آنها در جدول ۱ ارایه شده است. هر یک از سیالات نام‌برده از ذرات استهلاکی با جنس، ابعاد و غلظت متفاوت استفاده می‌کنند که سبب ایجاد خصوصیات فیزیکی مختلفی می‌شود. در ادامه مطالعه به بررسی و مقایسه خصوصیات هر یک از این سیالات و نقش آنها در میراگری پرداخته شده است.

جدول ۱) خصوصیات فیزیکی سه نوع مختلف از سیال مغناطیسی مورد مطالعه

سیال مغناطیسی	۱۲۲- ای‌جی	۱۳۲- دی‌جی	۱۴۰- سی‌جی
ویسکوزیته (Pa.s)	۰/۰۴۲	۰/۱۱۲	۰/۲۸
چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	۲/۲۸	۲/۹۵	۳/۵۴
درصد وزنی ذرات جامد (%)	۷۲	۸۰	۸۵

#### ۳- بحث و نتیجه‌گیری

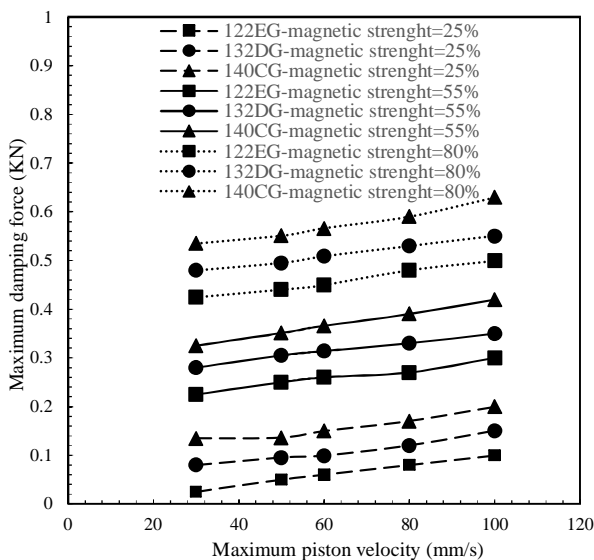
##### ۳-۱- بررسی خصوصیات تنش انواع سیالات مغناطیسی داخل میراگر

در این بخش از مطالعه به بررسی رفتار تنش هر یک از سه نوع سیال مغناطیسی داخل میراگر پرداخته‌ایم. یکی از روش‌های تحلیل تنش در مدل‌سازی به روش دینامیک ذره استهلاکی در داخل میراگر، استفاده از نیروهای حاکم بر ذرات از جمله نیروهای بقایی، تصادفی و استهلاکی است. در این حالت، معادله بقای مومنتوم می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle Q \rangle = \langle L'Q \rangle = \sum_{i,j} \langle F_{ij}^C \delta(r - r_i) \rangle + \sum_{i,j} \langle F_{ij}^D \delta(r - r_i) \rangle \quad (17)$$

تنش برشی،  $A_p$  برابر با سطح عبور جریان و  $\eta$  نیز ویسکوزیته دینامیک در حالتی که هیچ میدان مغناطیسی اعمال نشود، است. با توجه به این که جابه‌جایی پیستون از الگوی سینوسی پیروی می‌کند، مدل سرعت پیستون تابع کسینوسی بوده و دارای حداقل و حداکثر مقدار است. به منظور بررسی اثر قدرت میدان مغناطیسی و حداکثر سرعت پیستون بر توان میراگری، مطالعات در توان‌های میدان مغناطیسی ۲۵، ۵۵ و ۸۰٪ برای سه سیال متفاوت مغناطیسی انجام شده است. نتایج ارایه شده در نمودار ۵ نشان می‌دهد با افزایش قدرت میدان مغناطیسی و حداکثر سرعت پیستون، حداکثر توان میراگری افزایش پیدا می‌کند. قابل ذکر است که با توجه به افزایش قدرت میدان مغناطیسی، ذرات مغناطیسی با قدرت بیشتری به یکدیگر متصل می‌شوند و گرانروی و شرایط میراگری بهتری را فراهم می‌آورند. همچنین افزایش سرعت پیستون منجر به حالتی در سیال می‌شود که در آن ذرات مغناطیسی با سرعت بیشتری، حالت زنجیروار خود را تشکیل می‌دهند و تاثیر میدان مغناطیسی با سرعت بیشتری ظاهر می‌شود.

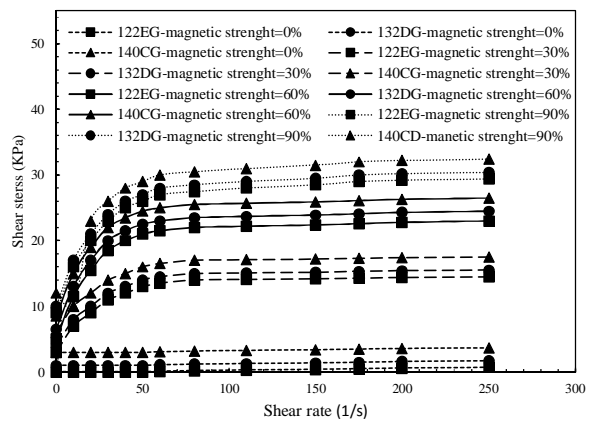
سیال ۱۴۰- سی‌جی دارای تراکم ذرات بیشتری است و در سرعت‌های بالا، توانایی ایجاد زنجیره ذرات را به خوبی دارد. با توجه به نتایج، بالاترین توان میراگری حداکثر برای سیال مغناطیسی ۱۴۰- سی‌جی و در سرعت حداکثر و قدرت میدان مغناطیسی بالاتر رخ می‌دهد.



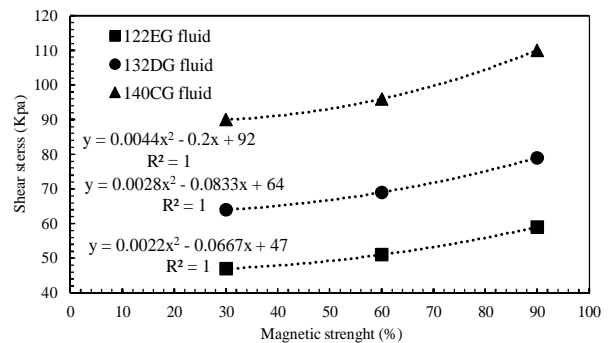
نمودار ۵) حداکثر توان میراگری برای سه سیال مغناطیسی متفاوت در میدان‌های مغناطیسی متفاوت بر حسب سرعت حداکثر پیستون

### ۳-۳- آنالیز حساسیت و بررسی خصوصیات زنجیره تشکیل شده ذرات مغناطیسی داخل میراگر

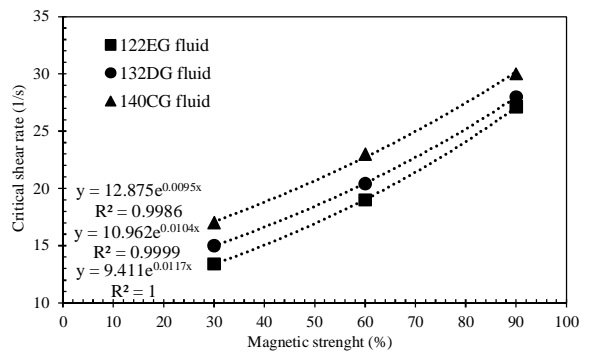
همان طور که پیش از این بیان شد، در حضور میدان مغناطیسی، ذرات پراکنده در سیال مغناطیسی در راستای میدان مغناطیسی اعمال شده به صورت زنجیره‌هایی قرار می‌گیرند که از این طریق خصوصیات سیال، کنترل و تنظیم می‌شود. در روش دینامیک ذره استهلاکی به کمک پارامترهای مختلفی که تعریف شده است، می‌توان خصوصیات فیزیکی مشابه با سیال واقعی را در مدل‌سازی ایجاد نمود. این کار با برآورد منحنی داده‌های موجود از سیال و انطباق با نتایج خروجی از مدل‌سازی قابل اجرا است. پارامترهای اصلی موجود در مدل‌سازی دینامیک ذره استهلاکی



نمودار ۲) تنش برشی سیال ۱۲۲- ای‌جی، ۱۳۲- دی‌جی و ۱۴۰- سی‌جی داخل میراگر در توان‌های مغناطیسی مختلف بر حسب نرخ برش



نمودار ۳) الگوی تابع چندجمله‌ای درجه دو برای تغییر تنش برشی سیالات مغناطیسی در میدان‌های مغناطیسی مختلف



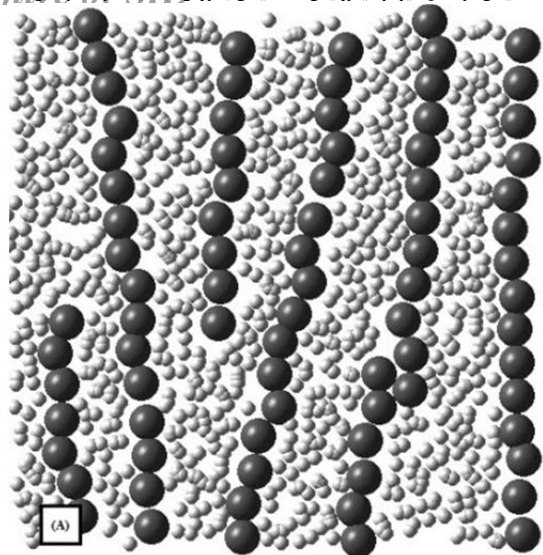
نمودار ۴) الگوی تابع نمایی برای تغییرات نرخ برش بحرانی در توان‌های مغناطیسی مختلف

### ۳-۲- بررسی اثر قدرت میدان مغناطیسی و حداکثر سرعت پیستون بر توان میراگری

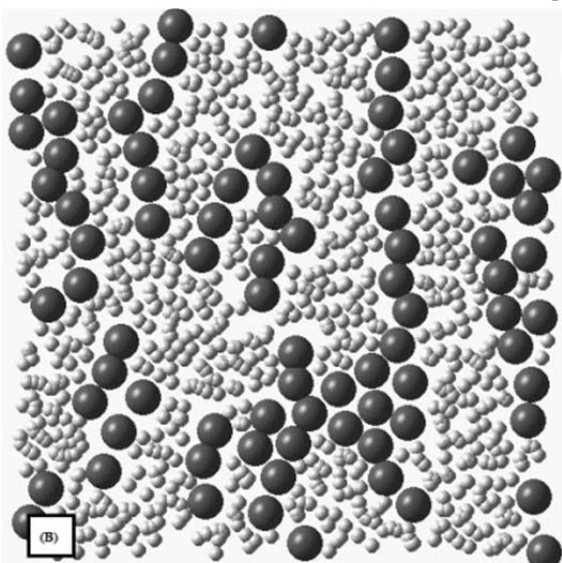
میراگرهای مغناطیسی به منظور جذب و میراسازی شوک‌های فیزیکی وارد شده به یک سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این بخش از مطالعه، به بررسی توان میراگری میراگر مدل‌سازی شده با استفاده از مدل *یانگ* [28] برای سه نوع سیال مغناطیسی متفاوت پرداخته‌ایم که از رابطه زیر می‌توان برای برآورد میزان توان میراکنندگی میراگر استفاده نمود:

$$F = \frac{6\eta LA_p^2}{\pi R h^3} v + \frac{3LA_p}{h} \tau_y \quad (23)$$

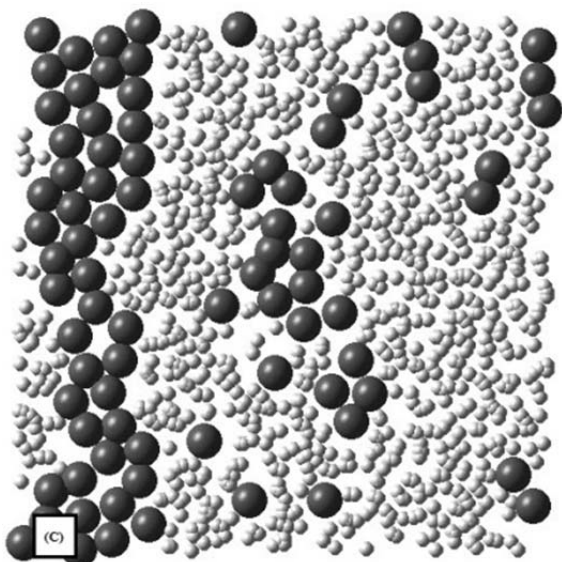
در این معادله،  $L$  طول محدوده مورد مطالعه،  $R$  شعاع سیلندر و  $h$  ارتفاع کانال عبور جریان است. همچنین  $v$  سرعت پیستون،  $\tau_y$



الف



ب



ج

شکل ۲ (۲) ضخامت زنجیره ذرات مغناطیسی تشکیل شده: الف) سیال ۱۲۲- ای جی، ب) سیال ۱۳۲- دی جی، ج) سیال ۱۴۰- سی جی

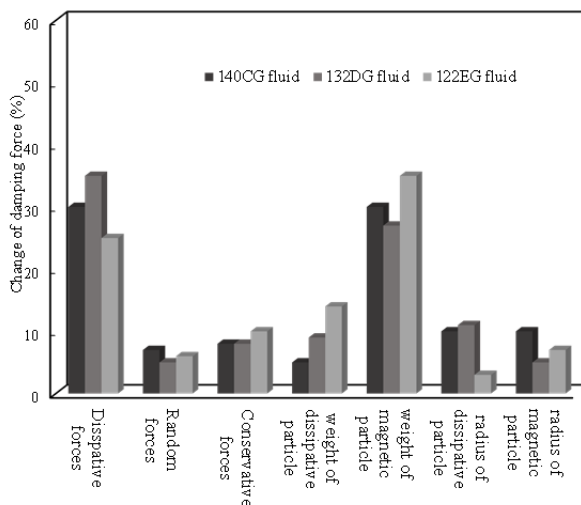
با توجه به این که نیروی‌های استهلاکی، نقش ایجاد گرانیوی را در مدل‌سازی دینامیک ذره استهلاکی بازی می‌کنند، هر چه این

به‌منظور تعریف دقیق سیال با خصوصیات واقعی عبارت از ضریب نیروی استهلاکی، ضریب نیروی بقایی، ضریب نیروی تصادفی، وزن ذرات استهلاکی، وزن ذرات مغناطیسی، قطر ذرات استهلاکی و قطر ذرات مغناطیسی هستند. ضرایب مناسب وارد شده برای واقعی‌سازی خصوصیات سیال داخل مدل‌سازی دینامیک ذره استهلاکی در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۲) ضرایب معادل در مدل‌سازی برای سه نوع مرسوم از سیالات مغناطیسی

سیال مغناطیسی	۱۲۲- ای جی	۱۳۲- دی جی	۱۴۰- سی جی
ضریب شدت نیروی استهلاکی	۰/۱۸	۰/۳	۰/۴
ضریب شدت نیروی تصادفی	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۲
ضریب شدت نیروی بقایی	۰/۳	۰/۴	۰/۳
قطر بدون بعد ذرات استهلاکی	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲
قطر بدون بعد ذرات مغناطیسی	۰/۳۱	۰/۳۵	۰/۴
وزن بدون بعد ذرات استهلاکی	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۲
وزن بدون بعد ذرات مغناطیسی	۰/۱۷	۰/۲	۰/۲۵

در ادامه به‌منظور تعیین میزان حساسیت و تاثیرگذاری شاخصه‌های سیال مغناطیسی، آنالیز حساسیت روی این خصوصیات از جمله نیروی استهلاکی، نیروی تصادفی، نیروی بقایی، شعاع ذره استهلاکی، شعاع ذره مغناطیسی، وزن ذره استهلاکی و وزن ذره مغناطیسی اجرا شده است. همان طور که در نمودار ۶ ارایه شده است، با انجام آنالیز حساسیت برای هر سه سیال مغناطیسی مشخص شد که بیشترین عوامل موثر بر توان میراکنندگی، وزن ذرات مغناطیسی و ضریب نیروهای استهلاکی هستند. در واقع تغییر این دو مشخصه از سیال می‌تواند بیشترین تاثیر را بر نیروی میراگری و کیفیت عملکرد میراگر وارد کند. اکنون با مشخص شدن پارامترهای حساس سیال، به بررسی شرایط تشکیل زنجیره ذرات مغناطیسی برای هر یک از سه نوع سیال مغناطیسی در تراکم ذرات مغناطیسی یکسان می‌پردازیم. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در حالتی که از سیال مغناطیسی ۱۲۲- ای جی استفاده کرده‌ایم، با توجه به وزن ذرات مغناطیسی کمتر و ضریب نیروی استهلاکی بیشتر، ضخامت زنجیره تشکیل شده کمتر است، در حالی که برای سیالات ۱۳۲- دی جی و ۱۴۰- سی جی، این زنجیره‌ها با توجه به دو پارامتر حساس وزن ذرات مغناطیسی و نیروهای استهلاکی بیشتر است.



نمودار ۶) آنالیز حساسیت برای پارامترهای سه نوع سیال مغناطیسی

نیروها بیشتر باشند، توانایی رسیدن ذرات مغناطیسی به یکدیگر در زمان یکسان کمتر است و بنابراین فرصت ایجاد زنجیره‌های مغناطیسی ضخیم در این حالت وجود ندارد و سیال با نیروی استهلاکی بیشتر، زنجیره باریک‌تری را ایجاد می‌کند.

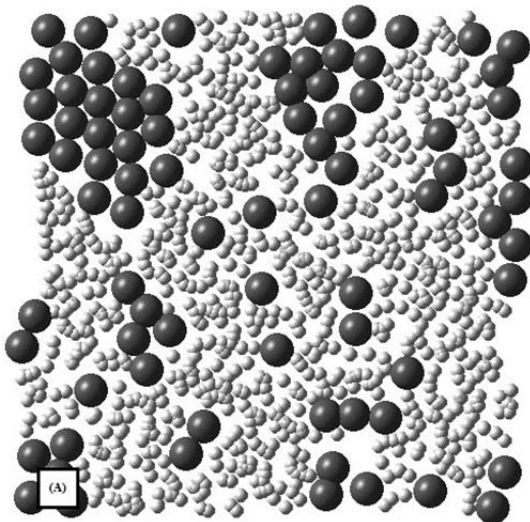
### ۳-۴- بررسی میزان پایداری و تجمع ذرات مغناطیسی

همان طور که در بخش قبلی مشخص شد، وزن ذرات مغناطیسی و ضریب نیروی استهلاکی، مهم‌ترین عوامل در تعیین خواص سیال مغناطیسی در روش دینامیک ذره استهلاکی هستند. از مهم‌ترین عواملی که به منظور تعیین کیفیت سیال مغناطیسی و کاربردپذیری آن در میراگرها مورد بررسی قرار می‌گیرد، پایداری و عدم ته‌نشین شدن و تجمع ذرات مغناطیسی است. در این قسمت از مطالعه، با استفاده از دو پارامتر وزن ذرات مغناطیسی و ضریب نیروی استهلاکی به بررسی وضعیت تجمع ذرات مغناطیسی داخل سیال مغناطیسی می‌پردازیم.

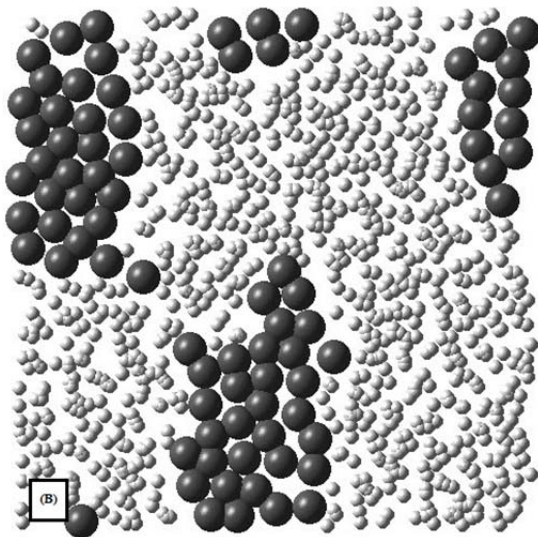
با توجه به عملکرد مناسب سیال ۱۲۲- ای جی در تشکیل زنجیره‌های مناسب، تاثیر پارامترهای مورد نظر بر مقدار تجمع ذرات را روی این سیال بررسی می‌کنیم. بررسی‌ها داخل کانال میراگر و در عدم حضور میدان مغناطیسی انجام شده است تا نتایج مطالعه تجمع ذرات به درستی و بدون وجود هر عامل خارجی دیگر انجام شود.

نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان می‌دهد با کاهش وزن ذرات مغناطیسی و افزایش ضریب قدرت استهلاکی آنها، تجمع ذرات مغناطیسی افزایش می‌یابد و سیال به حالت ناپایدار نزدیک‌تر می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از نمودار ۷ و شکل ۳ مشخص می‌شود که وزن زیاد ذرات مغناطیسی از جابه‌جاشدن آزاد آنها جلوگیری می‌کند و اجازه رسیدن از یک نقطه مشخص به بخش دیگر را در یک زمان محدود نمی‌یابد و بنابراین افزایش وزن سبب جلوگیری از تجمع بیش از اندازه ذرات و ناپایداری سیال می‌شود.

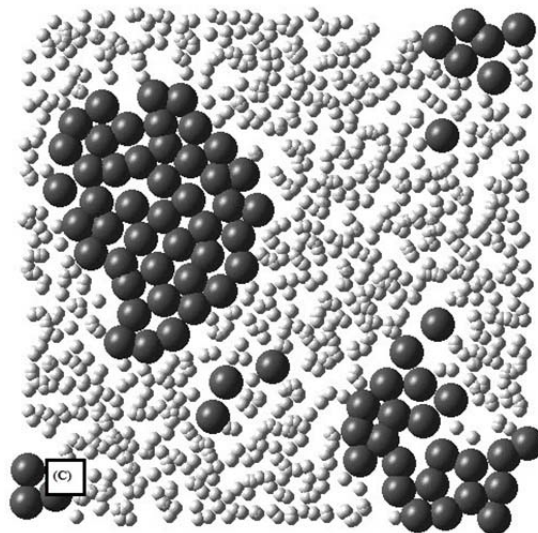
همچنین با توجه به این که هر چه نیروهای استهلاکی بیشتر باشد، سبب افزایش گرانیوی سیال می‌شود، در توان‌های بالای نیروی استهلاکی، گرانیوی افزایش می‌یابد و ذرات به سختی جابه‌جا می‌شوند و ایجاد تجمع ذرات کاهش پیدا می‌کند. بنابراین با کاهش ضریب قدرت استهلاکی ذرات و افزایش وزن ذرات مغناطیسی، درصد ذراتی که ایجاد تجمع می‌کنند کاهش پیدا می‌کند.



الف

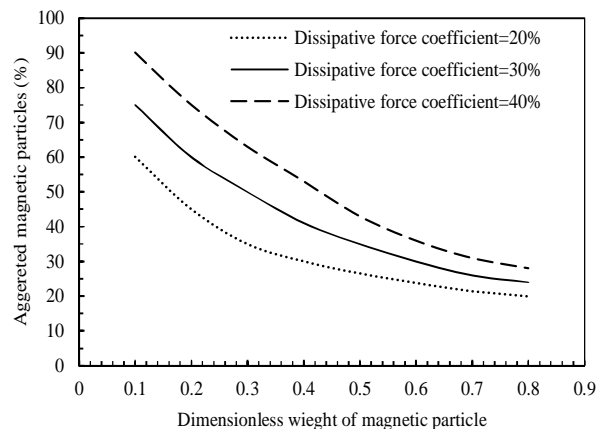


ب



ج

شکل ۳) تشکیل تجمع ذرات مغناطیسی سیال ۱۲۲- ای جی در عدم اعمال میدان مغناطیسی؛ الف) وزن ذرات مغناطیسی ۰/۳۵، ضریب قدرت نیروی استهلاکی ۰/۱۸، ب) وزن ذرات مغناطیسی ۰/۲۸، ضریب قدرت نیروی استهلاکی ۰/۲۵، ج) وزن ذرات مغناطیسی ۰/۲۱، ضریب قدرت نیروی استهلاکی ۰/۳۲



نمودار ۷) تجمع‌سازی ذرات مغناطیسی سیال ۱۲۲- ای جی در وزن‌های مختلف از ذرات مغناطیسی و ضریب قدرت نیروهای استهلاکی مختلف

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار به مدل‌سازی یک میراگر هیدرولیکی



$\sigma$	ضریب توان نیروی تصادفی
$\gamma$	ضریب توان نیروی استهلاکی
$\zeta$	متغیر تصادفی
$\theta$	تابع توزیع یکنواخت
$\delta$	تابع دلتای کرونگر
$\mu$	نفوذپذیری در فضای آزاد (m.s)
$\tau$	تنش برشی (N/m <sup>2</sup> )
$\eta$	ویسکوزیته دینامیک (Pa.s)
<b>بالانویس‌ها</b>	
$C$	نیروی بقایی
$D$	نیروی استهلاکی
$m$	میان ذرات
$R$	نیروی تصادفی
$V$	همپوشانی لایه های فعال در سطح
<b>زیرنویس‌ها</b>	
$c$	ذره استهلاکی
$d$	ذره استهلاکی
$H$	براساس میدان مغناطیسی
$i$	نام ذره
$j$	نام ذره
$m$	میان ذرات
$p$	مقطع عبور جریان
$R$	متغیر تصادفی
$V$	همپوشانی لایه های فعال در سطح
$s$	ذره جامد
$y$	ارتفاع

مغناطیسی با استفاده از روش دینامیک ذره استهلاکی پرداخته شده است. با توجه به این که سیال مغناطیسی در داخل میراگر در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، استفاده از روش مدل‌سازی دینامیک ذره استهلاکی در مقیاس مزو می‌تواند خصوصیات سیال را برای تعیین پارامترهای لازم برای میراگری باکیفیت تعیین کند. در این مطالعه، سه سیال مغناطیسی مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند که مشاهده می‌شود با افزایش نرخ برش، تنش برشی به سرعت افزایش می‌یابد و سپس با شیب ملایم‌تری افزایش پیدا می‌کند که این تنش در سیال ۱۴۰- سی‌جی نسبت به سیالات دیگر بیشتر است. همچنین مشخص شد که با افزایش حداکثر سرعت پیستون و افزایش قدرت میدان مغناطیسی، حداکثر توان میراگری افزایش پیدا می‌کند که سیال ۱۴۰- سی‌جی نیز توان میراگری بالاتری دارد. بررسی تحلیل حساسیت روی پارامترهای هر سه سیال مورد مطالعه نشان داد که وزن ذرات مغناطیسی و قدرت نیروی استهلاکی، بیشترین تاثیر را بر میراگری دارند، به‌صورتی که با افزایش وزن ذرات مغناطیسی، ایجاد تجمع ذرات کاهش می‌یابد، در حالی که با افزایش قدرت نیروی استهلاکی ذرات، تجمع ذرات افزایش پیدا می‌کند. بررسی‌ها روی سه سیال نشان داد که در شرایط یکسان، ذرات مغناطیسی سیال ۱۲۲- ای‌جی زنجیره‌های نازک‌تری نسبت به دیگر انواع سیال ایجاد می‌کنند و بنابراین توزیع ویسکوزیته در این سیالات همگن‌تر از انواع دیگر است.

**تشکر و قدردانی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**تاییدیه اخلاقی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**تعارض منافع:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**سهم نویسندگان:** محسن غفاریان عیدگاهی‌مقدم (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ محمدمحسن شاه‌مردان (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۲۵٪)؛ محمود نوروزی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۲۵٪)

**منابع مالی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

#### ۵- پی‌نوشت

$A$  سطح (m<sup>2</sup>)

$d$  قطر ذره (m)

$e$  بردار یکه

$F$  نیرو (N)

$h$  ارتفاع (m)

$H$  میدان مغناطیسی (T)

$k$  ثابت بولتزمن (J/K)

$L$  طول (m)

$M$  جرم (kg)

$m$  گشتاور مغناطیسی (A.m<sup>2</sup>)

$n$  تعداد ذرات

$Q$  دبی حجمی (m<sup>3</sup>/s)

$r$  بردار موقعیت ذره (m)

$R$  شعاع (m)

$S$  تنش برشی نیروهای استهلاکی بقایی (N/m<sup>2</sup>)

$t$  زمان (s)

$T$  دما (K)

$u$  نیروی بین ذرات (N)

$v$  سرعت (m/s)

$w$  تابع وزنی

**علامه یونانی**

$\alpha$  ضریب توان نیروی دافعه

#### منابع

- Ginder JM, Davis LC, Elie LD. Rheology of magnetorheological fluids: Models and measurements. International Journal of Modern Physics B. 1996;10(23-24):3293-3303.
- Rosensweig RE. Directions in ferrohydrodynamics. Journal of Applied Physics. 1985;57(8):4259-4264.
- Nguyen QH, Choi SB. Optimal design of MR shock absorber and application to vehicle suspension. Smart materials and Structures. 2009;18(3):035012.
- Ko JM, Zheng G, Chen ZQ, Ni YQ. Field vibration tests of bridge stay cables incorporated with magnetorheological (MR) dampers. SPIE's 9<sup>th</sup> Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 17-21 March, 2002, San Diego, California, United States. San Diego: SPIE Publication; 2002.
- Li HN, Li XL. Experiment and analysis of torsional seismic responses for asymmetric structures with semi-active control by MR dampers. Smart Materials and Structures. 2009;18(7):075007.
- Li H, Wang J, Song G, Li LY. An input-to-state stabilizing control approach for non-linear structures under strong ground motions. Structural Control and Health Monitoring. 2011;18(2):227-240.
- Das M, Jain VK, Ghoshdastidar PS. Computational fluid dynamics simulation and experimental investigations into the magnetic-field-assisted nano-finishing process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture. 2012;226(7):1143-1158.
- Dong Sh, Lu KQ, Sun JQ, Rudolph K. A prototype rehabilitation device with variable resistance and joint motion control. Medical Engineering and Physics. 2006;28(4):348-355.
- Crews JH, Mattson MG, Buckner GD. Multi-objective control optimization for semi-active vehicle suspensions. Journal of Sound and Vibration. 2011;330(23):5502-

- magnetorheological damper for a real base isolated building. Smart Structures and Materials, Conference, 2-6 March, 2003, San Diego, California, United States. Hamburg: GINTEM Publication; 2003.
- 20- Rivet JP, Boon JP. Lattice Gas Hydrodynamics. 1<sup>st</sup> Edition. Cambridge: Cambridge University Press; 2001. pp. 112-124.
- 21- Chopard B, Droz M. Cellular automata modeling of physical systems. 1<sup>st</sup> Edition. Cambridge: Cambridge University Press; 1998. pp. 98-121.
- 22- Hoogerbrugge PJ, Koelman JMVA. Simulating microscopic hydrodynamic phenomena with dissipative particle dynamics. Europhysics Letters. 1992;19(3):155-160.
- 23- Espanol P, Warren P. Statistical mechanics of dissipative particle dynamics. Europhysics Letters. 1995;30(4):191-196.
- 24- Satoh A, Majima T. Comparison between theoretical values and simulation results of viscosity for the dissipative particle dynamics method. Journal of Colloid and Interface Science. 2005;283(1):251-266.
- 25- Satoh A. Introduction to molecular-microsimulation of colloidal dispersions. 1<sup>st</sup> Edition. 17<sup>th</sup> Volume. Amsterdam: Elsevier; 2003. pp. 34-65
- 26- Koelman JMVA, Hoogerbrugge PJ. Dynamic simulations of hard-sphere suspensions under steady shear. Europhysics Letters. 1993;21(3):363-368.
- 27- Irving JH, Kirkwood JG. The statistical mechanical theory of transport processes. IV. The equations of hydrodynamics. The Journal of Chemical Physics. 1950;18(6):817-829.
- 28- Yang Z, Wang H, Han X, Fang W. Damping force of MR damper analysis and experimental. International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 12-14 August, 2011, Harbin, China. Piscataway: IEEE; 2011.
- 5516.
- 10- Xia PQ. An inverse model of MR damper using optimal neural network and system identification. Journal of Sound and Vibration. 2003;266(5):1009-1023.
- 11- Eltantawie MA. Forward and inverse fuzzy magnetorheological damper models for control purposes. ICGST-ACSE Journal. 2010;10(1):1-9.
- 12- Ericksen EO, Gordaninejad F. A magneto-rheological fluid shock absorber for an off-road motorcycle. International Journal of Vehicle Design. 2003;33(1-3):139-152.
- 13- Wereley NM, Pang L. Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models. Smart Materials and Structures. 1998;7(5):732-743.
- 14- Dominguez A, Sedaghati R, Stiharu I. Modeling and application of MR dampers in semi-adaptive structures. Computers and Structures. 2008;86(3-5):407-415.
- 15- Bai XX, Wang DH, Fu H. Principle, modeling, and testing of an annular-radial-duct magnetorheological damper. Sensors and Actuators A Physical. 2013;201:302-309.
- 16- Yazid IIM, Mazlan SA, Kikuchi T, Zamzuri H, Imaduddin F. Design of magnetorheological damper with a combination of shear and squeeze modes. Materials and Design (1980-2015). 2014;54:87-95.
- 17- Sternberg A, Zemp R, De La Llera JC. Multiphysics behavior of a magneto-rheological damper and experimental validation. Engineering Structures. 2014;69:194-205.
- 18- Prabakar RS, Sujatha C, Narayanan S. Response of a quarter car model with optimal magnetorheological damper parameters. Journal of Sound and Vibration. 2013;332(9):2191-2206.
- 19- Fujitani H, Sodeyama H, Tomura T, Hiwatashi T, Shiozaka Y, Hata K, et al. Development of 400KN