

طراحی و بهینه سازی دمپر با سیال مگنتولوژیک با الگوریتم PSO

محمد حسن جوارشکیان^۱، حامد صفارزاده^۲، علی اسماعیلی^۳

^۱دانشیار و عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد Javareshkian@um.ac.ir

^۲دانشجوی ارشد هوافضا دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان Hamed.Saffarzadeh@gmail.com

^۳دانشجوی ارشد هوافضا دانشگاه فردوسی مشهد Aliesmaeli30316@yahoo.com

چکیده

در این مطالعه به طراحی و بهینه سازی دمپر سیلندر پیستون با سیال هوشمند مگنتولوژیک پرداخته می‌شود. دمپر مورد نظر باید دارای ابعاد هندسی و انرژی الکتریکی مصرفی حداقل اما با بیشترین نیروی میرایی و سرعت عکس‌العمل بالا باشد، این امر مستلزم یک طراحی و بهینه سازی دقیق می‌باشد ابتدا پارامترهای موثر بر عملکرد این دمپرها شناسایی شده و میزان اثرگذاری هر کدام از آنها بر عملکرد سیستم مورد مطالعه قرار می‌گیرد سپس توسط سیستم معکوس طراحی، دمپر بهینه بدست خواهد آمد. این سیستم معکوس ترکیبی از مدل نیوروفازی و الگوریتم ازدحام ذرات می‌باشد. برای این منظور ابتدا یک دمپر سیلندر پیستون با سیال مگنتولوژیک شبیه سازی شده و عملکرد آن به وسیله مدل نیوروفازی پیش بینی و سپس با الگوریتم ازدحام ذرات بهینه سازی می‌گردد. در این مدل سازی مقدار ضخامت مجرا، طول قطب پیستون، تعداد دور سیم پیچ و تعداد قرقره‌های سیم پیچی که از پارامترهای مهم دمپر ام-آر-بشمار می‌روند به عنوان ورودی و نسبت نیرو به زمان واکنش و انرژی الکتریکی مصرفی به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. تا بتوان یک دمپر ایده‌آل با بیشترین نیروی میرایی و صرف کمترین میزان انرژی الکتریکی و سرعت واکنش بالا طراحی نمود

واژه های کلیدی

دمپر هوشمند - سیال مگنتولوژیک - الگوریتم PSO - روش نیوروفازی

مقدمه

ایزولاتور یا سیستم‌های تعلیق می‌توانند برای کنترل ارتعاشات سیستم‌های در حال حرکت مورد استفاده قرار گیرند برای کاهش ارتعاشات، تاثیر کنترل ارتعاشات بر روی ایزولاتورها یا سیستم‌های تعلیق ضروری می‌باشد. برخی از این ایزولاتورها به گونه‌ای هستند که هیچ باز خوردی در فعالیت آن‌ها وجود ندارد و برای یک حالت بحرانی طراحی می‌شوند که این نوع از دمپرها چندان مطلوب نمی‌باشند. دسته دیگر به گونه‌ای هستند که ارتعاشات وارده را حس کرده و بسته به دامنه ارتعاشات واکنش نشان می‌دهند. مزیت سیستم فعال این است که می‌تواند خود را با ارتعاشات سیستم تطبیق دهد. دسته دیگر که به آن‌ها سیستم کنترلی نیمه فعال می‌گویند، همانند سیستم‌های فعال قابلیت تطابق پذیری ارتعاشات بر حسب میزان انرژی پراکنندگی بر مستهلک کننده را دارند و بر حسب نیاز خصوصیات عملکردی مختلفی پیدا می‌کنند، اما مزیت اصلی سیستم کنترل نیمه فعال بر سیستم فعال صرف انرژی کم‌تر و زمان واکنش پایین‌تر می‌باشد. به همین دلیل است که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است و لزوم طراحی چنین دمپرهایی شدیداً احساس می‌شود. در سیستم نیمه فعال از سیالات هوشمند برای کاهش ارتعاشات استفاده می‌شود. یکی از سیالاتی که در چند سال اخیر توجه ویژه‌ای به آن شده سیال مگنتولوژیک است. این سیال به گونه‌ای است که هنگام قرارگیری در میدان مغناطیسی، ویسکوزیته آن تغییر می‌کند. با توجه به قابلیت این سیال و نیز سیستم کنترلی نیمه فعال، می‌توان از این سیال در ساخت دمپرها استفاده نمود. دمپره‌های سیلندر پیستون مگنتولوژیک دمپرهایی هستند که یک پیستون الکترومغناطیسی از آن عبور کرده و بر سیال ام.آر. (M.R) فشار وارد می‌کند. در اثر عبور سیال از میدان مغناطیسی تنش تسلیم تغییر کرده و این تغییرات خواص منجر به افزایش نیروی میرایی بیش از ده برابر می‌شود. اخیراً ارتعاشات نیمه فعال با سیال ای.آر. (E.R) مورد تحقیقات وسیعی قرار گرفته است. الگوریتم کنترلی مود لغزشی توسط ونگ و همکارانش^۱ [۱] ارائه شده است. برای تاثیر بیشتر میزان دمپ سیال ای.آر بر یک سازه کنترل ارتعاشاتی نتایج تجربی دمپره‌های ای.آر برای محافظت از ارتعاشات حاصل در تحقیق دایک^۲ بررسی شده است [۲]. همچنین رفتار نوسانی تحریک خطی دمپره‌های ام.آر بر روی چهار مدل مختلف نیز مورد مطالعه قرار گرفته است [۳]. لی و همکارانش^۳ به رفتار ویسکوالاستیک در مدل دمپر ام.آر پرداخته‌اند [۴]. همچنین یک سیستم جایگاه تعلیق با مدل کنترلی شوک هوک^۴ با دمپر های ام.آر توسط چیو^۵ معرفی شده است [۵].

با توجه به گسترش این نسل جدید دمپرها در سال‌های اخیر و لزوم طراحی دقیق‌تر برای افزایش کارایی آن‌ها، دستیابی به طراحی بهینه از اهمیت بسزایی برخوردار گردیده است. از طرفی تاکنون در کارهای انجام شده به بهینه‌سازی این نوع دمپرها پرداخته نشده است. از آنجایی که از این دمپرها در صنایع مختلف مثل صنایع

¹Wang et al

²Dyke et al

³LI et al

⁴shockhood

⁵Chio

N_s تعداد قرقره‌های سیم پیچی شده، Q دبی حجمی سیال است. نیروی تولیدی در دمپر F ناشی از افت فشار عبور پیستون از سطح مقطع سیلندر در هر زمان از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$F = \Delta p \pi \frac{((D_p + t_g)^2 - D_r^2)}{4} \quad (4)$$

در نتیجه نیرو ناشی از سرعت پیستون، هندسه سیستم، خواص سیال مگنتولوژیک و چگالی شار مغناطیسی عبوری از مجرای بین سیلندر و پیستون بدست می‌آید.

۴-۱ رابطه غیر خطی مغناطیس ساکن

حجم کوچک سیال ام-آر بین دیواره سیلندر، قطب مغناطیسی پیستون، پیستون و سیلندر تحت تاثیر شار مغناطیسی قرار می‌گیرد. طبق قانون کیروشف برای میدان مغناطیسی خواهیم داشت:

$$\sum H_k L_k = Ni \quad (6)$$

H_k میدان مغناطیسی حاصل از k تعداد ماده بوده و L_k طول موثر آنها که در میدان مغناطیسی می‌باشند است. تعداد دور سیم مغناطیسی پیچیده شده را با N و جریان عبوری از سیم را با i بیان می‌گردد. در قانون میدان مغناطیسی، شار مغناطیسی B با القای مغناطیسی افزایش می‌یابد ($B = \mu \mu_0 H$) باید μ_0 نفوذ پذیری مغناطیسی^۶ در خلا بوده و برابر $(4\pi * 10^{-7} T.m / A)$ می‌باشد، μ نسبت نفوذ پذیری بوده که از خواص ماده می‌باشد. در آستانه میدان (H_c) بیشتر مواد مغناطیسی اشباع می‌شوند.

در این مطالعه از رابطه میدان مغناطیسی که منحنی مغناطیسی را به خوبی بیان می‌کند استفاده می‌نماییم $[7]$

$$H(B) = \frac{H_c B}{J_b} + \frac{1}{2s} * \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{H_c}{J_b} \right) e^{\text{arcsinh}(s(B - J_b))} - e^{\text{arcsinh}(J_b)} \quad (7)$$

که در رابطه بالا S دقت منحنی $B-H$ می‌باشد. چگالی شار مغناطیسی برای هسته B_c برای دیواره B_w بوده و با توجه به بقای شار مغناطیسی عبوری Φ_B خواهیم داشت:

$$\Phi_B = B_g A_g \quad (8)$$

$$B_c = \frac{\Phi_B}{A_c} \text{ و } B_w = \frac{\Phi_B}{A_w} \quad (9)$$

در روابط بالا A_w ، A_g ، A_c به ترتیب مساحت سطح مقطع هسته، مجرای عبوری سیال و دیواره سیلندر می‌باشد. با تعیین میزان B_g می‌توان با کمک روابط (۸) و (۹) میزان چگالی شار و شار مغناطیسی را بدست آورد. همچنین با داشتن پارامترهای مغناطیسی (S و H_c ، J_b) برای فولادو سیال ام-آر سیستم، القای مغناطیسی هر قسمت را با کمک رابطه (۷) محاسبه نمود.

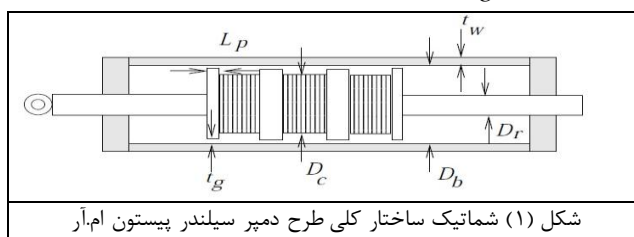
با بدست آوردن B_g و H برای هر عضو مغناطیسی و کمک از رابطه (۱۰) می‌توان جریان الکتریکی مورد نظر را محاسبه نمود.

هوافضا و در ماهواره‌ها استفاده می‌شود طراحی بهینه آن می‌تواند تاثیر بسزایی در کاهش هزینه‌ها، عمر و بازده آن‌ها داشته باشد. این مطالعه در حقیقت خلا ایجاد شده مربوط به طراحی دمپر مگنتولوژیک را پر می‌کند. ابتدا دمپر مذکور شبیه سازی شده و بخشی از نتایج حاصله با نتایج تجربی مقایسه می‌شود. سپس پارامترهای موثر بر عملکرد این دمپرها شناسایی شده و میزان اثرگذاری هر کدام از آن‌ها بر عملکرد سیستم مطالعه شده است. همچنین توسط سیستم معکوس که طراحی شده دمپر بهینه بدست آمده است. این سیستم معکوس ترکیبی از مدل نیوروفازی (Neuro-Fuzzy) و الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) می‌باشد. در اثر این بهینه سازی دمپری طراحی شده که انرژی کمی مصرف می‌کند به عبارتی با حداقل انرژی الکتریکی بالاترین عملکرد را دارد و واکنش دمپر نیز بسیار سریع می‌باشد.

۱-۱ طراحی مفهومی دمپر

شکل (۱) ساختار اصلی یک دمپر سیلندر پیستون مگنتولوژیک را نشان می‌دهد که در آن قرقره سیم پیچی شده با خطوط عمودی هاشور خورده و پیستون دمپر که از جنس فولاد می‌باشد به عنوان یک هسته مغناطیسی برای این سیم پیچ می‌باشد تا بتوان شار مغناطیسی ایجاد کند. جریان شار مغناطیسی به حول محور هسته فولادی به قطر D_c دوران دارد، قطب مغناطیسی پیستون به طول L_p ، ضخامت مجرایی که سیال از میان آن عبور می‌کند t_g و ضخامت دیواره سیلندر t_w می‌باشد.

دمپر مورد نظر برای طراحی دارای شش پارامتر هندسی فیزیکی می‌باشد، که شامل قطر محفظه مورد نظر که یک لوله توخالی تراشیده شده می‌باشد D_b ، قطر میله پیستون D_r ، ضخامت دیواره سیلندر t_w ، قطر هسته D_c ، طول قطب L_p و ضخامت شکاف عبوری سیال t_g می‌باشد.



تنش برشی کل سیال مگنتولوژیک از دو قسمت تشکیل می‌گردد، تنش برشی تسلیم ناشی از اعمال شار مغناطیسی و تاثیر آن بر روی سیال و تنش برشی ناشی از ویسکوزیته [7]. افت فشار عبوری از پیستون Δp وابسته به ویسکوزیته و تنش تسلیم سیال دارد [8]. از ساختار سیال نیو تنی می‌توان Δp_N را از رابطه (۳) تقریب زد.

$$\Delta p_N = \frac{12Q\eta(2N_s)L_p}{\pi(D_p + t_g)t_g^3} \quad (3)$$

⁶ Magnetic permeability

مجموع قدر مطلق به عدد صفر نزدیکتر باشند و هر چه این نزدیکی بیشتر باشد، مناسبتر بودن مدل را نشان می‌دهند.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - T_i)^2}{N} \quad (14)$$

$$NMSE = \frac{1}{\sigma^2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - T_i)^2 \quad (15)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - T_i)}{N} \quad (16)$$

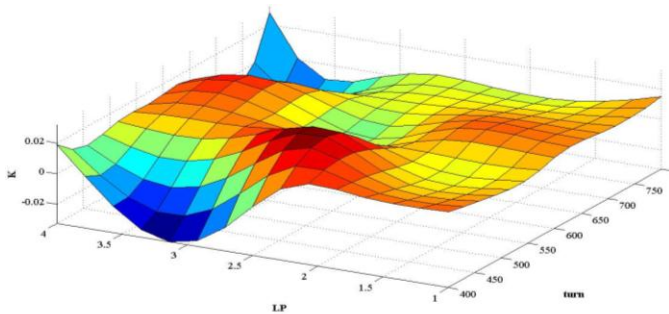
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - T_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - T_m)^2} \quad (17)$$

به طوری که O_i اولین مقدار عددی، T_i اولین مقدار تخمین زده شده، N تعداد داده‌ها و σ^2 واریانس داده‌های عددی می‌باشد. در جدول (۱) خطاهای حاصله برای تجزیه و تحلیل عملکرد نیوروفازی نشان داده شده است. مقدار کم خطاها و همچنین مقدار بسیار نزدیک R^2 به ۱ ضریب مشخصه نشان دهنده صحت و دقت عالی مدل نیوروفازی می‌باشد.

جدول (۱) عملکرد نیوروفازی برای مقادیر آموزش و تست.

	MSE	NMSE	MAE	R ²
Train	0.000138	0.0023	0.007	0.997
Test	0.0001383	0.0024	0.0071	0.998

شکل (۲) نسبت K بر حسب تعداد دور سیم پیچ و طول قطب پیستون را نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان دید که افزایش تعداد دور سیم پیچ باعث افزایش نسبت K می‌شود. این رفتار به خوبی توسط مدل نیوروفازی تخمین زده شده است، زیرا این پیش بینی تایید کننده رفتار فیزیکی نیز می‌باشد.



شکل (۲) بهترین پیشگویی مدل نیوروفازی بر اساس K بر حسب تعداد دور سیم پیچ (Turn) و طول قطب پیستون (L_p)

$$i = \frac{1}{N} (2H_g t_g + H_c (l_c + l_p) + H_p (D_p + t_w) + H_w (l_c + l_p)) \quad (10)$$

N تعداد دور سیم پیچ برای هر قرقره، l_c, l_p به ترتیب طول هسته و قطب بوده و القای مغناطیسی را در مجرای عبوری سیال، قطب و هسته به ترتیب H_g, H_p, H_c نشان داده می‌شود. L خودالقایی (اندوکتانس)، R مقاومت الکتریکی همچنین T ثابت زمانی القایی (به عبارتی زمان واکنش سیال) می‌باشد که از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$L = \frac{N^2 \phi B}{i} \quad (11)$$

$$R = rN \pi D_c N_s \quad (12)$$

$$T = \frac{L}{R} \quad (13)$$

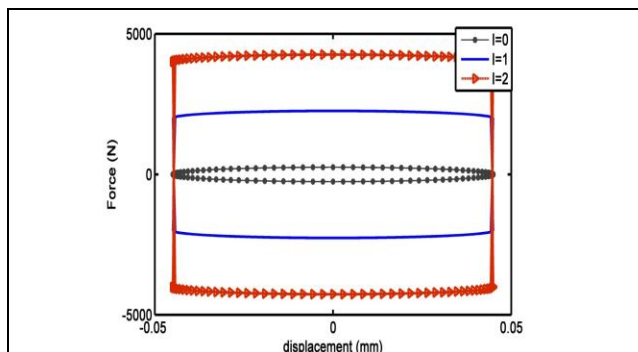
در رابطه (۱۲) Γ مقاومت هر واحد طول سیم مغناطیسی انتخاب شده بوده همچنین برای بالا بردن عملکرد دمپر و میدان مغناطیسی قوی تر می‌توان از چند قرقره سیم پیچی شده N_s و یا سیم پیچی در چند لایه انجام شود (N_l).

۲-۲ بهینه سازی دمپر ام.آر با استفاده از سیستم

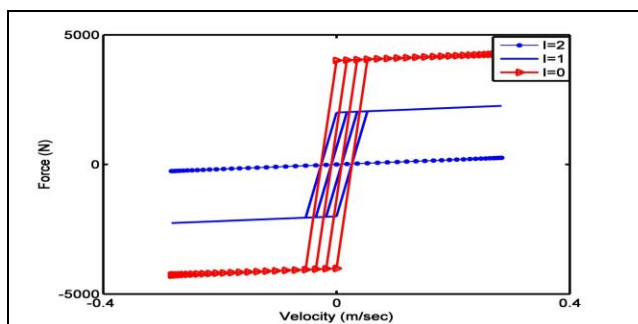
معکوس

برای بهینه سازی دمپر مورد مطالعه، تعداد دور سیم پیچ (turn)، فاصله مجرای عبوری سیال (t_g) و طول قطب پیستون (L_p) به عنوان پارامتر ورودی و پارامتر K ($K=F/(T.J)$) به عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شده است. پارامتر K بیان کننده نیروی تولیدی بهینه (F)، میزان مصرف انرژی حداقل (J)، سرعت واکنش بالاتر (T) می‌باشد. سیستم معکوس ترکیبی از مدل نیوروفازی و الگوریتم ازدحام ذرات می‌باشد. ابتدا یک دمپر سیلندر پیستون با سیال مگنتولوژیک شبیه سازی شده و عملکرد آن به وسیله مدل نیوروفازی پیش بینی و سپس با الگوریتم ازدحام ذرات بهینه سازی شده است. در این مدل سازی مقدار ضخامت مجرا، طول قطب پیستون، تعداد دور سیم پیچ و تعداد قرقره‌های سیم پیچی به عنوان ورودی و نسبت نیرو به زمان واکنش و انرژی الکتریکی مصرفی به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. کل داده‌های مورد استفاده ۷۵۳۳ عدد بوده که از حل جریان متفاوت بدست آمده است. داده‌ها برای معرفی به نیوروفازی به صورت تصادفی به دو گروه تقسیم شدند: حالت آموزش و تست. مدل نیوروفازی به وسیله داده‌های آموزشی یاد می‌گیرد و بعد از آموزش، به وسیله داده‌های تست توانایی این مدل در پیش گویی دقیق از داده‌ها مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در مجموع برای محاسبه خطای این مدل از خطای مجموع مربعات (MSE)، خطای بی بعد مجموع مربعات (NMSE)، خطای مجموع قدر مطلق (MAE) و ضریب مشخصه (R^2) استفاده شده است (معادلات (۱۴) تا (۱۷)). در کل مناسب‌ترین تخمین نیوروفازی در حالی بدست می‌آید که مقدار ضریب مشخصه به عدد ۱، خطای مجموع مربعات و خطای بی بعد مجموع مربعات و خطایی

این مقادیر را در مدل شبیه سازی قرار داده شده است خطایی ایجاد شده برابر ۵/۷٪ می باشد که قابل قبول می باشد. این دمپر در بازه گسترده ای از نیروی میرایی در جریان های مختلف الکتریکی می تواند عمل کند. شکل (۴) و (۵).



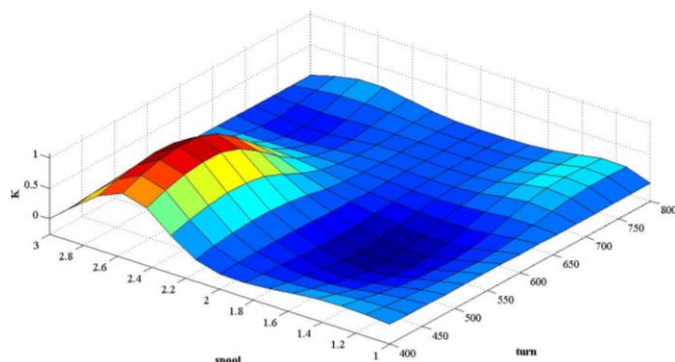
شکل (۴) تغییرات نیرو نسبت به جابجایی در جریان های مختلف و فرکانس 1HZ



شکل (۵) تغییرات نیرو نسبت به سرعت در جریان های مختلف و فرکانس 1HZ

۴ - مرجع

- [1] Wang K W, Kim Y S and Shea D B 1994 "Structural vibration control via electrorheological-fluid-based actuators with adaptive viscous and frictional damping" J. Sound Vib. 177 227-37
- [2] Dyke S J, Spencer B F Jr, Sain M K and Carlson J D 1998 "An experimental study of MR dampers for seismic protection Smart Mater". Struct. 7 693-703
- [3] Wereley N M, Pang L and Kamath G M 1998 "Idealized Hysteresis modeling of electrorheological and magnetorheological dampers" J. Intell. Mater. Syst. Struct. 9 642-9
- [4] Li W H, Yao G Z, Chen G, Yeo S H and Yap F F 2000 "Testing and steady state modeling of a linear MR damper under sinusoidal loading Smart Mater". Struct. 9 95-102
- [5] Choi S B, Nam M H and Lee B K 2000 "Vibration control of a MR seat damper for commercial vehicles" J. Intell. Mater. Syst. Struct. 11 936-44
- [6] Henri GAVIN, Jesse HOAGG and Mark DOBOSSY (2001). "OPTIMAL DESIGN OF MR DAMPERS". Proc. U.S.-Japan Workshop on Smart Structures for Improved Seismic Performance in Urban Regions, 14 August 2001, Seattle WA, ed. K. Kawashima, B.F. Spencer, and Y. Suzuki, pp 225-236.
- [7] Gavin, H.P. (1998). "Design method for high-force electrorheological dampers." Smart Materials and Structures, Vol. 7, No. 5, 664-673.



شکل (3) بهترین پیشگویی مدل ANFIS بر اساس نسبت K بر حسب تعداد دور سیم پیچ (turn) و تعداد قرقره های سیم پیچی شده (Spool) در تحقیق حاضر، هدف از بهینه سازی دست یابی به ماکزیمم مقدار نسبت K می باشد. بهینه سازی برای یافتن بهترین مقدار ضخامت مجرا، طول قطب، تعداد دور سیم پیچ و تعداد قرقره های سیم پیچی شده مناسب برای رسیدن به ماکزیمم مقدار K انجام شده است. تابع هدف K برای همه دمپرها با روش نیوروفازی بر اساس نتایج عددی بدست آمده از حل عددی بدست آمده است. نتیجه بهینه سازی در جدول (2) نشان داده شده این مقادیر بهترین حالت برای بیشترین مقدار K می باشد. لازم به ذکر می باشد که مقدار تعداد قرقره های سیم پیچ باید عددی صحیح باشد بنابراین مقدار بدست آمده برای آن را به عدد مناسب تقریب زده می شود.

جدول (2) مشخصات دمپر بهینه شده

turn	spool	gap	LP	K
745.63	2.12	0.705	1.044	4.597

الگوریتم ازدحام ذرات $K=4.597$ را برای این دمپر تقریب زده است. برای اعتبار سنجی نتایج الگوریتم فوق با شبیه سازی عددی برای تعداد دور سیم پیچ 746، تعداد قرقره های سیم پیچی شده 2، طول قطب پیستون 1.044mm و ضخامت مجرای عبوری سیال بین سیلندر و پیستون 0.75mm مقدار K محاسبه می شود. نسبت نیروی دمپر به انرژی الکتریکی مصرفی و زمان واکنش $K=4.86$ بدست می آید، در صورتی که با روش ازدحام ذرات مقدار $K=4.597$ بدست آمده است. میزان خطای آن طبق رابطه (18) معادل ۵/۷٪ می باشد.

$$Error = \left| \frac{K(CFD) - K(PSO)}{K(CFD)} \right| = 0.057 \quad (18)$$

در پایان می توان با توجه به مقادیر دمپر بهینه شده مقدار نیروی دمپر را بر حسب سرعت و جابجایی در جریان های مختلف بدست آورد. (شکل (4) و (5))

۳ - نتیجه گیری و جمع بندی

با طراحی تئوری یک دمپر سیلندر پیستون و شناسایی پارامتر های موثر بر آن سعی بر بهینه سازی آن گردیده. هدف اصلی بهینه سازی یافتن بهترین مقدار ضخامت مجرا، طول قطب، تعداد دور سیم پیچ و تعداد قرقره های سیم پیچی شده مناسب برای رسیدن به ماکزیمم مقدار k بوده است. مقادیر بهینه در جدول (۲) مشاهده می شود و برای اطمینان از این بهینه سازی