eISME2013-1738

بررسی میزان اثرگذاری پارامترهای طراحی دمپر با سیال مگنتولوژیک بر توابع هدف

محمد حسن جوارشکیان[۱]، علی اسماعیلی[۲]، حامد صفارزاده[۳]

[۱]محمد حسن جوارشکیان، دانشیار و عضو هیت علمی دانشگاه فردوسی مشهد، javareshkian@um.ac.ir
[۲]دانشجوی ارشد هوافضا دانشگاه فردوسی مشهد Aliesmaeli30316@yahoo.com
[۳]دانشجوی ارشد هوافضا دانشگاه فردوسی مشهد Hamed.Saffarzadeh@Gmail.com

چکیده

در این تحقیق به منظور بررسی اثر فاکتورهای مختلف طراحی و تعیین میزان اثرگذاری هر یک از این فاکتورها بر عملکرد دمپر با سیال مگنتولوژیک از روش سطح پاسخ، نوع طراحی مرکب مرکزی، استفاده گردید. از آنجایی که در طراحی این نوع دمپرها پارامترهایی چون تعداد سیم پیچ، تعداد قرقره‌های سیم‌پیچی شده، طول پیستون و ضخامت گپ تاثیر مستقیم و بسزایی بر عملکرد دمپر داشته، لذا با استفاده از این روش می توان میزان حساسیت توابع هدف که شامل مقدار نیروی استهلاک شده، تاخیر زمانی و میزان مصرف انرژی می باشد، به هر یک از پارامترهای طراحی سنجید. همچنین در پایان روابط موجود بین توابع هدف و پارامترهای مذکور ارائه شده است.

واژه های کلیدی

دمپر - سیال مگنتولوژیک - حساسیت - تابع هدف

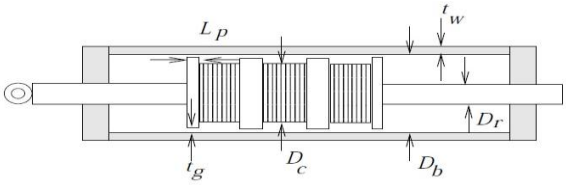
مقدمه

با توجه به نیاز روزافزون طراحی دقیق‌تر و بهینه در صنایع مختلف، مهندسان و دانشمندان را به استفاده از روش‌های مدرن و قدرتمند سوق می‌دهد. از جمله تجهیزاتی که به طور وسیع در صنایع مختلف بکار گرفته می‌شود، دمپرها می‌باشند. در جدیدترین نوع دمپرها از سیال هوشمند مگنتولوژیک استفاده شده است، به طوری که یک پیستون الکترومغناطیسی از آن عبور کرده و بر سیال مگنتولوژیک 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. این نوع دمپر به دلیل خاصیتی که سیال هوشمند دارد باعث افزایش قابلیت‌های دمپر شده است [۱-۶]. اما با توجه به استفاده از این نوع دمپرها، نیاز برای طراحی دقیق‌تر همچنان حس شده و برای دست‌یابی به ماکزیمم عملکرد می‌توان این نوع دمپرها را نیز بهینه کرد. به همین منظور، محققان زیادی به استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی روی آوردند [۱۲-۷]. اما نکته حائز اهمیت این است که تمامی این روش‌ها معایبی داشته که مانع دسترسی به طراحی صحیح و دقیق خواهد شد. مهمترین مشکل روش‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیگ یا الگوریتم‌های ازدحام ذرات این است که نمی‌توانند میزان اثرگذاری هر یک از پارامترهای طراحی را بر تابع هدف دریابند و در حقیقت در این روش‌ها معمولا ضرایب وزنی را به صورت تجربی و یا تصادفی انتخاب می‌کنند و همین امر منجر به تولید خطا در یافتن مقادیر بهینه می‌شود. در صورتی که اگر میزان تاثیرگذاری پارامترهای طراحی بر توابع هدف به طور دقیق مشخص شود، آنگاه می‌توان به دمپر با قابلیت‌های فوق‌العاده دست یافت.

در این تحقیق، با استفاده از روش پاسخ سطح بر مبنای روش طراحی مرکب مرکزی به بررسی میزان حساسیت پارامترهای طراحی بر توابع هدف پرداخته می‌شود. پارامترهای طراحی شامل تعداد سیم پیچ، تعداد قرقره‌های سیم‌پیچی شده، طول پیستون و ضخامت گپ بوده و میزان نیروی استهلاک شده، تاخیر زمانی دمپر و میزان انرژی مصرفی آن به عنوان توابع هدف انتخاب گردیده است.

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.



شکل ۱: شماتیک ساختار کلی طرح دمپر سیلندر پیستون مگنتولوژیگ

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[۱۳]. افت فشار عبوری از پیستون Δp وابسته به ویسکوزیته و تنش تسلیم سیال دارد[۱۴]. از ساختار سیال نیو تنی می‌توان Δp_N را از رابطه (۱) تقریب زد.

$$\Delta p_N = \frac{12Q\eta(2N_s)L_p}{\pi(D_p+t_g)t_g^3} \quad (۱)$$

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:

$$F = \Delta p \pi \frac{((D_p+t_g)^2 - D_r^2}{4} \quad (۲)$$

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.

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

$$\sum H_k L_k = Ni \quad (۳)$$

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 Nو جریان عبوری از سیم را با i بیان می شود. در قانون میدان مغناطیسی، شار مغناطیسی B با القای مغناطیسی افزایش می‌یابد($B = \mu\mu_0 H$) μ_0 نفوذ پذیری مغناطیسی[۱] در خلا بوده و برابر($4\pi * 10^{-7} T.m/A$) می‌باشد، μ نسبت نفوذ پذیری بوده که از خواص ماده می‌باشد.

در این مطالعه از رابطه میدان مغناطیسی که منحنی مغناطیسی را به خوبی بیان می‌کند استفاده می‌شود[۱۳]:

$$H(B) = \frac{H_c B}{J_b} + \frac{1}{2s} * \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{H_c}{J_b}\right)\left(e^{\arcsin h(s(B-J_b))} - e^{\arcsin h(J_b)}\right) \quad (۴)$$

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:

$$\Phi_B = B_g A_g \quad (۵)$$

$$B_c = \frac{\Phi_B}{A_c}, \quad B_w = \frac{\Phi_B}{A_w} \quad (۶)$$

در روابط بالا A_c، A_g، A_w به ترتیب مساحت سطح مقطع هسته ، مجرای عبوری سیال و دیواره سیلندر می‌باشد. با تعیین میزان B_g می‌توان با کمک روابط (۴)،(۵) و(۶) میزان چگالی شار و شار مغناطیسی را بدست آورد. همچنین با داشتن پارامترهای مغناطیسی (sو H_c, J_b) برای فولادو سیال مگنتولوژیک سیستم، القای مغناطیسی هر قسمت را با کمک رابطه (۴) محاسبه نمود.

با بدست آوردن B_g و H برای هر عضو مغناطیسی می‌توان جریان الکتریکی مورد نظر را محاسبه نمود.

$$i = \frac{1}{N}(2H_g t_g + H_c(l_c + l_p) + H_p(D_p + t_w) + H_w(l_c + l_p)) \quad (۷)$$

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 و 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.

$$L = \frac{N_s N \phi_B}{i} \quad (۸)$$

$$R = rN\pi D_c N_s \quad (۹)$$

$$T = \frac{L}{R} \quad (۱۰)$$

در رابطه (۹) r 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 Ns و یا سیم پیچی در چند لایه انجام شود(N_l).

تئوری روش پاسخ سطح

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی سودمند برای مدل سازی و آنالیز مسائل است که اثر چندین متغیر بر روی یک یا چند پاسخ را بررسی می‌کند. با استفاده از این روش می‌توان به نقطه بهینه پاسخ دست یافته و همچنین میزان تاثیرگذاری پارامترهای مختلف بر خروجی را آنالیز کرد. در این روش می‌توان از دو مدل درجه اول و دوم بر حسب نیاز استفاده کرد. اگر پاسخ تابعی خطی از متغیرهای مستقل باشد، طبق رابطه (۱۱) یک مدل مرتبه اول خواهیم داشت:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (۱۱)$$

که در این رابطه y متغیر پاسخ، β_i ها ضرایب معادله رگرسیون، x متغیر رمزی[۲] و ε خطای تصادفی را نشان می‌دهد. اگر در سیستم انحنا وجود داشته باشد، یک چند جمله‌ای[۳] از درجه بالاتر باید مورد استفاده قرار گیرد. مدل مرتبه دوم با رابطه (۱۲) قابل بیان خواهد بود:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k}\beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k}\beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}\beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (۱۲)$$

---

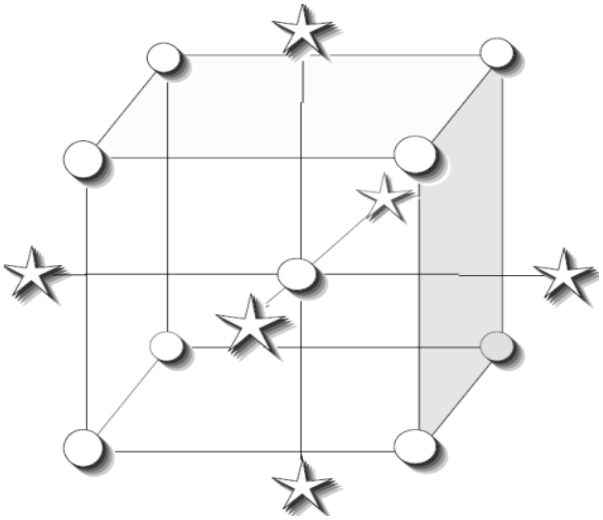
[۱] Magnetic permeability

[۲] Coded Variables

[۳] Polynomial

که پارامتر x^2 در این رابطه می‌تواند انحنای موجود در این سیستم را تحت پوشش قرار دهد.

RSM نیز مانند سایر طراحی‌ها یک روش مرحله به مرحله است و معمولاً در ابتدا یک مدل مرتبه اول کفایت می‌کند ولی برای تعیین دقیق‌تر از مدل مناسب به مسئله، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که معتبرترین و تواناترین روش، روش طراحی مرکب مرکزی می‌باشد. این روش نیز از زیر مجموعه‌های روش سطح پاسخ است. روش طراحی مرکب مرکزی یکی از بهترین طراحی‌ها جهت به دست آوردن مدل‌های درجه دوم می‌باشد. در این روش طراحی با تعداد کمتری آزمایش نسبت به روش‌های مشابه انجام می‌گیرد. این روش معمولا دارای کارایی بالاتری نسبت به نوع متعارف 3^k طراحی فاکتوریل است.ساختار طراحی مرکب مرکزی با سه متغییر در شکل ۲ آمده است. این ساختار متشکل از یک فاکتوریل مرکزی است که یک مکعب را تشکیل می‌دهد. هر یک از اضلاع مکعب نشان دهنده‌ی اندازه‌های رمزی ۱+ و ۱- می‌باشند که با دایره در این شکل مشخص شده‌اند. نقاط ستاره‌ای نشان دهنده‌ی نقاط محوری است.



شکل ۲: ساختار طراحی مرکب مرکزی برای سه ورودی

بعد از اینکه مدل مربوطه بدست آمد، لازم است که ارزیابی شود. به همین منظور پارامترهایی برای ارزیابی تعریف شده‌اند که عبارتند از:

۱) F-value و P-value: برای تائید مدل ارائه شده و میزان دقت آن در برازش داده‌ها می‌توان از این دو پارامتر بهره برد که به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردند:

$$F = \frac{MS_{Model}}{MS_E} \qquad (۱۳)$$

در این رابطه MS_{Model} میانگین مربعات مدل و MS_E میانگین مربعات خطا می‌باشد.

۲) R^2: برای تعیین دقت مدل و قسمتی از تغییرپذیری که توسط مدل شرح داده می‌شود، از پارامتری به نام ضریب تعیین استفاده می‌گردد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} = \frac{SS_{Model}}{SS_{Total}} \qquad (۱۴)$$

نتایج

در این تحقیق، به منظور بررسی اثر فاکتورهای مختلف و تعیین میزان تاثیرگذاری هر یک از فاکتورها در عملکرد دمپر مگنتولوژیک از روش سطح پاسخ (RSM) از نوع طراحی مرکب مرکزی استفاده گردیده است. از آنجایی که نیروی استهلاک شده، زمان استهلاک و انرژی مصرفی تاثیر مستقیمی بر عملکرد این نوع دمپرها دارند، به همین منظور آن‌ها را به عنوان توابع هدف یا پاسخ در نظر گرفته می‌شود. همچنین پارامترهایی مانند تعداد سیم پیچ (N)، تعداد قرقره‌های سیم‌پیچی شده (N_s)، طول پیستون (Lp) و ضخامت گپ (t_g) تاثیر مستقیم و بسزایی بر عملکرد دمپر داشته که به همین دلیل میزان تاثیرگذاری این پارامترها به عنوان پارامترهای تاثیرگذار بر پاسخ مورد مطالعه قرار گرفته است.

در روش طراحی مرکب مرکزی هر یک از پارامترها در نقاط حداقل (۱-)، حداکثر (۱+) و یک نقطه در مرکز این دو، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس بر اساس این روش، چندین چیدمان مختلف از پارامترهای تاثیرگذار طراحی شده که لازم است براساس این چیدمان پاسخ‌ها بدست آیند. در نتیجه با استفاده از روابط تحلیلی مربوط به دمپرهای مگنتولوژیک (که در بالا ذکر شد) به ازای این چیدمان‌ها، پاسخ‌های مورد نظر بدست آمده و بر اساس همین پاسخ‌ها و با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) برای هر یک از پاسخ‌ها مدلسازی صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه رابطه بین پارامترها و پاسخ‌ها غیر خطی بوده، از مدل درجه دوم استفاده می‌شود که از نظر آماری نیز به طور مناسبی بر داده‌های پاسخ‌ها منطبق می‌باشد. جدول واریانس (ANOVA) برای اطمینان از کارایی مدلسازی انجام شده استفاده گردیده است. البته این جدول برای پاسخ‌های مختلف آورده شده است. جدول ۱ کارایی مدل برای پاسخ نیرو، جدول ۲ برای پاسخ زمانی و جدول ۳ برای پاسخ انرژی مصرفی را نشان می‌دهند.

جدول ۱: جدول ANOVA برای پاسخ نیرو

Source	Sum of Squares	Mean Square	F-value	p-value
Model	109.84	12.20	823.54	< 0.0001
N	0.47	0.472	31.87	< 0.0001
N_s	4.70	4.70	317.23	< 0.0001
t_g	92. 80	92.80	6261.90	< 0.0001
L_p	1.92	1.92	129.73	< 0.0001
		R^2=0.9973		

جدول ۲: جدول ANOVA برای پاسخ زمان

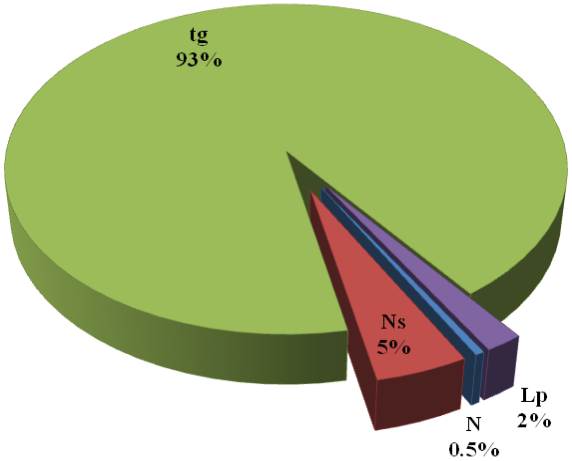
Source	Sum of Squares	Mean Square	F-value	p-value
Model	31.50	3.50	6.7×10^5	< 0.0001
N	2.16	2.16	4.14×10^5	< 0.0001
N_s	25.23	25.23	48.3×10^5	< 0.0001
t_g	3.00	3.00	5.74×10^5	< 0.0001
L_p	0.47	0.47	0.9×10^5	< 0.0001
		R^2=0.9999		

جدول ۱: جدول ANOVA برای پاسخ انرژی مصرفی

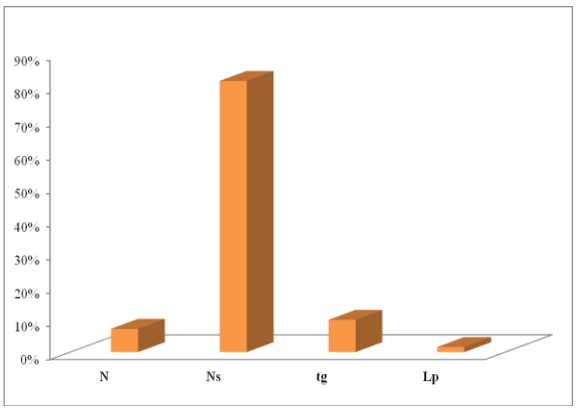
Source	Sum of Squares	Mean Square	F-value	p-value
Model	8.29	0.83	2.05×10^5	< 0.0001
N	2.16	2.16	5.36×10^5	< 0.0001
N_s	5.88	5.88	14.6×10^5	< 0.0001
t_g	0.0042	0.0042	1043.42	< 0.0001
L_p	0.00088	0.00088	217.10	< 0.0001
		R^2=0.9999		

مقدار R^2 حدود ۰/۹۹۷۳ و ۰/۹۹۹۹ که خیلی به عدد یک نزدیک می‌باشند نشان‌دهنده‌ی این است که تغییرپذیری داده‌ها به خوبی توسط مدل شرح داده شده است. همچنین مقدار بسیار کوچک p-value در حدود کم‌تر از ۰/۰۰۰۱ نیز بیانگر دقت بسیار مناسب مدل مورد استفاده می‌باشد.

حال بر اساس همین مدلسازی، میزان حساسیت پارامترها بر پاسخ‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است، به طوری که در شکل ۳ میزان تاثیرگذاری پارامترهای مختلف بر پاسخ نیرو به تصویر کشیده شده است. همانطور که از شکل برمی‌آید ضخامت گپ (tg) حدود ۹۳٪ بر نیروی استهلاک شده توسط دمپر مورد نظر تاثیر می‌گذارد، در حالی که تعداد سیم پیچ‌ها کم‌تر از ۱٪ اثر وارد می‌نماید. در نتیجه در صورتی که هدف از طراحی دمپر مگنتولوژیک دست‌یابی به مقدار نیروی استهلاک شده بیشتری باشد لازم است فقط ضخامت گپ را تغییر داد.

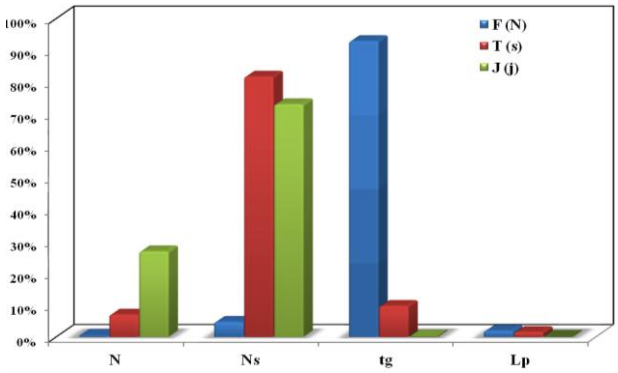


شکل ۳: میزان اثرگذاری پارامترهای طراحی بر نیرو



شکل ۴: میزان اثرگذاری پارامترهای طراحی بر زمان

همچنین میزان اثرگذاری پارامترها بر پاسخ زمان در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که از شکل فوق برمی‌آید، تعداد قرقره‌های سیم‌پیچی شده (N_s) بیش از ۸۰٪ بر مدت زمان استهلاک اثرگذار است. در مقابل طول پیستون (Lp) کم‌ترین اثر را دارد. به منظور مقایسه مناسب‌تر بین میزان اثرگذاری هر پارامتر بر پاسخ‌ها، شکل ۵ ارائه شده، به طوری که در این شکل میزان حساسیت‌ها مقایسه شده‌اند. از این شکل می‌توان فهمید که تعداد سیم‌پیچ‌ها (N) بر انرژی مصرفی در مقایسه با دیگر پاسخ‌ها اثرگذارتر بوده، در مقابل تعداد قرقره‌های سیم‌پیچی شده (N_s) علاوه بر اینکه بر زمان بیشترین اثر را می‌گذارد، بر انرژی مصرفی نیز ماکزیمم تاثیر را دارد. هرچند که این پارامتر بر نیروی استهلاک شده تاثیر کم‌تری دارد اما به دلیل اینکه دو پاسخ دیگر نسبت به آن حساسیت زیادی دارند، لذا در طراحی این نوع دمپرها می‌تواند نقش بسزایی داشته باشد و باعث افزایش عملکرد دمپر مگنتولوژیک گردد. نکته حائز اهمیت دیگر، این است که طول پیستون تاثیر چندانی بر هیچ یک از پاسخ‌ها ندارد.



شکل ۵: مقایسه میزان اثرگذاری پارامترهای طراحی بر توابع هدف

بر اساس این مدلسازی انجام شده، روابط تحلیلی که بین پاسخ‌ها و پارامترهای تاثیرگذار وجود دارد نیز بدست آمده است. روابط (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) به ترتیب بیانگر رابطه تحلیلی بین پارامترها و پاسخ‌های نیرو، زمان و انرژی مصرفی می‌باشند:

$$In(j) = -0.529 + 0.003N + 1.144N_s - 0.021t_g + 0.003N_s t_g - 0.004t_g L_p - 0.142N_s^2 + 0.036t_g^2 \quad (۱۵)$$

$$In(F) = 10.581 + 0.001N + 1.181N_s - 13.19t_g + 0.518L_g 0.001Nt_g - 0.328t_g L_p - 0.168N_s^2 + 7.768t_g^2 \quad (۱۶)$$

$$In(F) = -5.305 + 0.003N + 2.283N_S - 1.528t_G + 0.083L_{P_S} 0.027N_S L_P - 0.292N_S^2 + 0.507t_g^2 - 0.006L_P^2 \quad (۱۷)$$

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، به منظور بررسی اثر فاکتورهای مختلف و تعیین میزان تاثیرگذاری هر یک از فاکتورها در عملکرد دمپر مگنتولوژیک از روش سطح پاسخ (RSM) از نوع طراحی مرکب مرکزی استفاده گردیده است. از آنجایی که نیروی استهلاک شده، زمان استهلاک و

انرژی مصرفی تاثیر مستقیمی بر عملکرد این نوع دمپرها دارند، آن‌ها را به عنوان توابع هدف یا پاسخ در نظر گرفته و پارامترهای تعداد سیم پیچ (N)، تعداد قرقره‌های سیم‌پیچی شده (N_s)، طول پیستون (Lp) و ضخامت گپ (t_g) به عنوان پارامترهای تاثیرگذار بر پاسخ مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا بر اساس روش طراحی مرکب مرکزی، چندین چیدمان مختلف از پارامترهای تاثیرگذار طراحی شده و براساس روابط تحلیلی مربوط به دمپرهای مگنتولوژیک و این چیدمان‌ها، پاسخ‌ها بدست آمدند و سپس با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) برای هر یک از پاسخ‌ها مدلسازی صورت گرفته است. مقدار R^2 حدود ۰/۹۹۷۳ و ۰/۹۹۹۹ که خیلی به عدد یک نزدیک می‌باشند، نشان‌دهنده‌ی این است که تغییرپذیری داده‌ها به خوبی توسط مدل شرح داده شده است. همچنین مقدار بسیار کوچک p-value در حدود کم‌تر از ۰/۰۰۰۱ نیز بیانگر دقت بسیار مناسب مدل مورد استفاده می‌باشد. بر اساس نتایج این مدلسازی، تعداد سیم‌پیچ‌ها (N) بر انرژی مصرفی در مقایسه با دیگر پاسخ‌ها اثرگذارتر بوده، در مقابل تعداد قرقره‌های سیم‌پیچی شده (N_s) علاوه بر اینکه بر زمان بیشترین اثر را می‌گذارد، بر انرژی مصرفی نیز ماکزیمم تاثیر را دارد. هرچند که این پارامتر بر نیروی استهلاک شده تاثیر کم‌تری دارد اما به دلیل اینکه دو پاسخ دیگر نسبت به آن حساسیت زیادی دارند، لذا در طراحی این نوع دمپرها می‌تواند نقش بسزایی داشته باشد و باعث افزایش عملکرد دمپر مگنتولوژیک گردد. نکته حائز اهمیت دیگر، این است که طول پیستون تاثیر چندانی بر هیچ یک از پاسخ ها ندارد. در پایان نیز روابط تحلیلی موجود بین پارامترها و پاسخ‌ها بدست آمده است.

مراجع

[1] Occhiuzzi, A., Spizzuoco, M. and Serino, G. 2003. “Experimental Analysis of Magnetorheological Dampers for Structural Control". Journal of Smart Materials and Structures, 12:703–711.

[2] Terasawa, T. et al. 2004. “Adaptive Identification of MR Damper for Vibration Control," 43rd IEEE Conference on Decision and Control.

[3] Xu, Z.D. and Guo, Y.Q. 2006. “Fuzzy Control Method for Earthquake Mitigation Structures with Magnetorheological Dampers," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 17(10):871–881.

[4] Shen, Y., Golnaraghi, M. and Heppler, G. 2006. “Semi-active Vibration Control Schemes for Suspension Systems Using Magnetorheological Dampers," Journal of Vibration and Control, 12(1):3–24.

[5] Dixit, R. and Buckner, G. 2005. “Sliding Mode Observation and Control for Semiactive Vehicle Suspensions”. Journal of Vehicle System Dynamics, 43(2):83–105.

[6] Guglielmino, E. et al. 2005. “Hybrid Variable Structure-Fuzzy Control of a Magnetorheological Damper for a Seat Suspension”. International Journal of Vehicle Autonomous Systems, 3(1):34–46.

[7] Parlak, Z., Engin, T., Çallı, İ., 2012. “Optimal design of MR damper via finite element analyses of fluid dynamic and magnetic field”. Mechatronics.

[8] Feng, Z., Hou, Z., Zhang, G., 2012. “Multiobjective Optimization of Structural Parameters Designing for Magnetorheological Damper Based on Genetic Algorithms”. Springer, pp. 1455-1460.

[9] Segla, S., Kajaste, J., Keski-Honkola, P., 2011. “Optimization of Semi-active Seat Suspension with Magnetorheological Damper”. Springer Verlag, p. 393.

[10] Elhami, M.R., Daneshdoost, C., Madady, D., 2012. “Semi-active Control of Structure Vibrations with MR Damper Using Fuzzy Control System (FLC) and Optimization through Genetic Algorithm (GA) ”. Advances in Computer, Communication, Control and Automation, 583-590.

[11] Nguyen, Q.H., Choi, S.B., 2009. “Optimal design of a vehicle magnetorheological damper considering the damping force and dynamic range”. Smart Materials and Structures 18, 015013.

[12] Nguyen, Q.H., Choi, S.B., 2009. “Optimal design of MR shock absorber and application to vehicle suspension”. Smart Materials and Structures 18, 035012.

[13] W H Liao1 and CY Lai, "Harmonic analysis of a magnetorheological damper for vibration control", Smart Mater. Struct.11 (2002) 288–296 PII: S0964-1726(02)34308-8

[14] Gavin, H.P. (1998). Design method for high-force electrorheological dampers." Smart Materials and Structures, Vol. 7, No. 5, 664-673.