



بررسی رفتار حالت گذرای سیال مگنتورئولوژیکال در کوپلینگ مغناطیسی

یوسف حجت^{1*}، کیوان کاکاوند²، مجتبی قدسی³، علی اصغر مداح⁴

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

4- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 143-14115، yhojjat@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 بهمن 1392

پذیرش: 11 مهر 1393

ارائه در سایت: 12 مهر 1393

کلید واژگان:

سیال مگنتورئولوژیکال

مدل ماکسول

حالت گذرا

مغناطیس

پاسخ زمانی

در این مقاله مدل جدیدی برای پاسخ سیال مگنتورئولوژیکال به ورودی جریان در حالت گذرا ارائه شده است. اکثر مدل‌های ارائه شده برای این سیال مربوط به حالت پایدار سیال بوده و در مدل‌های معدودی که برای حالت گذرا ارائه شده ورودی جریانی الکتریکی به صورت پله ای و نرخ برش ثابت فرض شده است. در مدلی که در این پژوهش برای حالت گذرای سیال مگنتورئولوژیکال توسعه داده شده، جریان الکتریکی ورودی به صورت تابع نمایی و نرخ برشی به صورت متغیر در نظر گرفته شده است. با توجه به لختی مغناطیسی ناشی از اندوکتانس کوئل، چگالی شار مغناطیسی نمی‌تواند به صورت پله ای باشد، بنابراین مدل ارائه شده با واقعیت تطابق بیشتری دارد. برای صحت سنجی مدل ارائه شده و نیز بررسی خواص سیال به عنوان پارامتر ورودی مدل، یک کوپلینگ آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده که در آن میدان مغناطیسی در راستای عمود بر جهت برشی به سیال اعمال شده و خروجی آن تنش برشی به صورت تابعی از زمان است. تطابق خروجی‌های مدل با نتایج تجربی، دقت قابل قبول مدل را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج تئوری و تجربی، از مدل موجود جهت ایجاد یک گشتاور کنترل شده و دقیق برای کاربرد در کوپلینگ مغناطیسی استفاده شده و نتایج قابل قبولی به دست آمده است.

Study on the Transient State behavior of Magneto Rheological Fluid in Magnetic Coupling

Yossef Hojjat*, Keyvan Kakavand, Mojtaba Ghodsi, Ali Asghar Maddah

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, yhojjat@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 29 January 2013
Accepted 03 October 2014
Available Online 04 October 2014

Keywords:

Magneto Rheological Fluid
Maxwell model
Transient state
Magnetism
Response Time

ABSTRACT

In this paper a new model is developed to describe the response of Magneto-rheological fluids (MRF) in transient state. The models which are developed so far, cover the steady-state flow, or address the transient state, with step-wise input electrical current and constant shear rate. In this paper, a new model for transient state of MRF is developed in which the input electrical current is an exponential function in different values of shear rate. Due to the magnetic inertia caused by the inductance of the coil, the real magnetic flux density could not be step-wise. Hence, compare with the other models, this model is in well agreement with reality. To verify the presented model and study the fluid properties as input parameters, an experimental coupling is designed and fabricated. The coupling applies magnetic field perpendicular to shear direction, and measures the shear stress as a function of time. The results of the proposed model show acceptable agreement with experimental observations. According to experimental and theoretical results, the presented model is applied to a controllable torque coupling and acceptable results were obtained.

است [2].

1- مقدمه

سیال مگنتورئولوژیکال در عدم حضور میدان مغناطیسی رفتاری مشابه با سیال پایه دارد، اما به محض قرارگرفتن در معرض میدان، ذرات مغناطیسی شروع به ایجاد ساختار زنجیره ای کرده و در نتیجه خواص گرانروی سیال تغییر می‌کند [3]. از این قابلیت به طور روز افزون در کاربردهای مهندسی مانند سامانه های ترمز ضد قفل [4-6]، کلاچ مغناطیسی [7-9]، دمپینگ ارتعاشات [10،11] و در کاربردهای مختلف پزشکی استفاده می شود [12].

سیال مگنتورئولوژیکال نوعی از مواد هوشمند است که تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی، تغییر گرانروی می‌دهد [1]. به عبارت دیگر این سیال در اثر میدان مغناطیسی خارجی به حالت نیمه جامد یا ویسکوالاستیک تبدیل می‌شود. ساختار آن متشکل از ذرات فرومغناطیسی معلق در یک سیال پایه است. ذرات عموماً آلیاژهای آهن – کبالت و گاهی نانو ذرات منگنز و نیکل بوده و سیال پایه عموماً از روغن های هیدروکربنی یا سیلیکونی تشکیل شده

Please cite this article using:

Y. Hojjat, K. Kakavand, M. Ghodsi, A.A. Maddah, Study on the Transient State behavior of Magneto Rheological Fluid in Magnetic Coupling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 156-162, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Y. Hojjat, K. Kakavand, M. Ghodsi, A.A. Maddah, Study on the Transient State behavior of Magneto Rheological Fluid in Magnetic Coupling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 156-162, 2014 (In Persian)

رفتار عملگر هایی با مد ولوی¹، تحت چگالی شار ثابت استفاده کردند [17]. این مدل علی رغم تطابق مناسب با داده های تجربی تنها برای ورودی آمپر پله ای در نرخ برش ثابت در حالت گذرا بررسی شده است.

در این مقاله، با در نظر گرفتن جریان ورودی به صورت تابع نمایی و نیز نرخ برشی متغیر به تعمیم مدل ارائه شده توسط لئون پرداخته شده است. با در نظر گرفتن ورودی جریان نمایی که باعث ایجاد چگالی شار نمایی می گردد، مدل پوشش مناسب تری را ایجاد می کند، زیرا شیب تغییرات چگالی شار مغناطیسی نسبت به زمان در حالت نمایی، برخلاف حالت پله ای ثابت نیست. همچنین ایجاد چگالی شار مغناطیسی به صورت پله ای آن گونه که در مدل لیون فرض شده است، به سبب لختی های مغناطیسی ناشی از اندوکنانس کوئل، در عمل امکان پذیر نیست. همچنین در مدل ارائه شده در این مقاله نرخ برشی به صورت متغیر در نظر گرفته شده، که این فرض تطابق بیشتری با عملکرد سیال در کاربردهای مهندسی دارد.

دسته ای از پارامترهای ورودی این مدل مربوط به خواص سیال است که باید به صورت تجربی به دست آید. بدین منظور، یک کوپلینگ آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. مدار مغناطیسی کوپلینگ آزمایشگاهی، با استفاده از شبیه سازی المان محدود، به گونه ای طراحی شده است که میدان مغناطیسی اعمالی به سیال عمود بر راستای برش باشد. با استفاده از کوپلینگ آزمایشگاهی مذکور، نتایج مدل تعمیم یافته صحت سنجی شده است. نتایج مدل تطابق مناسبی با داده های تجربی نشان می دهد، در نهایت، مدل توسعه یافته جهت اعمال یک گشتاور کنترل شده و دقیق در یک سیستم کنترل گشتاور به کار گرفته شد.

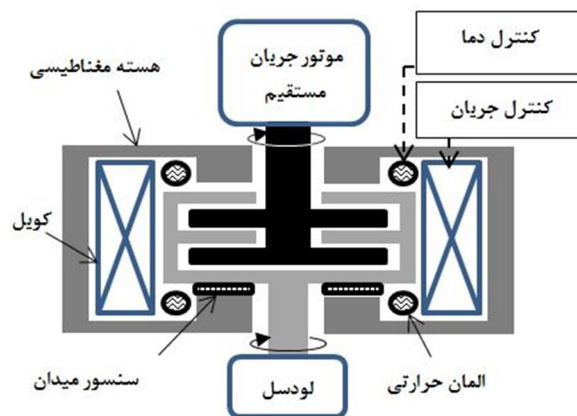
2- طراحی و ساخت کوپلینگ آزمایشگاهی

برای اندازه گیری برخی متغیرهای ورودی مدل و نیز صحت سنجی آن، یک کوپلینگ آزمایشگاهی با قابلیت اعمال میدان مغناطیسی کنترل شده در راستای عمود بر نرخ برشی سیال طراحی و ساخته شد. این کوپلینگ دارای قابلیت اعمال نرخ برشی متغیر در راستای مماسی می باشد، خروجی این کوپلینگ تنش برشی به صورت تابعی از زمان است. طرح واره کوپلینگ در شکل 1- الف و تصویر آن در شکل 1- ب نشان داده شده است.

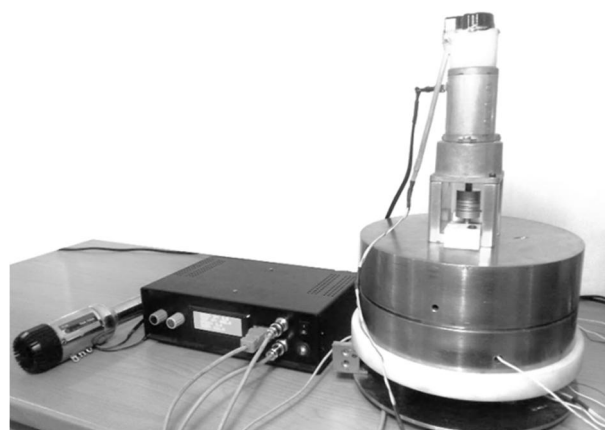
برای اعمال نرخ برش متغیر از موتور جریان مستقیم استفاده شده است. میدان مغناطیسی توسط سیم پیچی با 2200 دور سیم به قطر 1/1 میلی متر اعمال می شود و مسیر مغناطیسی توسط قطعات واسط با جنس آهن خالص با درصد کربن 0/0131 که دارای خواص مغناطیسی و سطح اشباع مناسبی است، بسته می شود. شار مغناطیسی توسط سنسور اثر هال² اندازه گیری می شود. کنترل دمای سیال در این کوپلینگ با اعمال جریان کنترل شده به گرم کن توسط کنترل کننده³ صورت می گیرد. سنسور دمای به کار رفته در این پژوهش از نوع پی تی 100⁴ است.

2-1- مدار مغناطیسی (کوپلر مغناطیسی)

طراحی مدار مغناطیسی به گونه ای است که بتوان میدان مغناطیسی را در جهت عمود بر راستای برشی سیال اعمال کند. این کار از طریق شبیه سازی مدار مغناطیسی، با استفاده از نرم افزار المان محدود انسیس⁵ انجام شده است. کوپلینگ موتور از جنس فولاد ضدزنگ 304 انتخاب شده است. این نوع فولاد غیر مغناطیسی بوده و ضریب تراوایی مغناطیسی آن یک است.



شکل 1- الف شماتیک اجزای کوپلینگ آزمایشگاهی اندازه گیری تنش برشی



شکل 1- ب کوپلینگ آزمایشگاهی اندازه گیری تنش برشی

به سبب کاربردهای گسترده عملگرهایی که از این سیال استفاده می کنند، تلاش های فراوانی جهت مدل سازی رفتار این سیال توسط محققین مختلفی صورت گرفته است. بیشتر این مدل سازی ها رفتار سیال در حالت پایدار را مورد مطالعه قرار می دهند. به طور مثال زوبیتا و همکاران در سال 2005 یک روش عددی برای توصیف تنش برشی بر حسب نرخ برش سیال مگنتورئولوژیکال ارائه دادند [13]. همچنین کارلسون با ارائه مدلی برای سیال فقط به بررسی سیال در حالت پایدار آن پرداخته است [14]. خروجی این مدل و مدل های مشابه برای کنترل عملگرهایی که از این سیال استفاده می کنند، کاربرد دارد. علی رغم این موضوع، این مدل ها راجع به محدوده زمانی از لحظه اعمال میدان تا زمان رسیدن سیال به حالت پایدار اطلاعاتی را ارائه نمی کنند. این زمان نقش مهمی در عملکرد و نیز کنترل عملگرهایی که از سیال مگنتورئولوژیکال استفاده می کنند، ایفا می کنند. به عبارت دیگر با دانستن رفتار سیال در حالت گذرا می توان کنترل موثرتری روی آن داشت.

جان و همکاران در سال 2004 با بررسی داده های تجربی گزارش کرده اند که با افزایش دامنه جریان ورودی پاسخ زمانی سیستم برای رسیدن به پایداری افزایش می یابد [15]. لازم به ذکر است که در کار تجربی ایشان انتخاب جنس فرو مغناطیس برای پرپ اعمال کننده تنش احتمال ایجاد خطا را در نتایج تقویت می کند. لئون و همکاران در سال 2007 مدلی جهت بررسی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال در حالت گذرا ارائه دادند [16]. آنها از مدل ویسکوالاستیک ماکسول، برای سیال مگنتورئولوژیکال استفاده کردند، با این تفاوت که برخی پارامترهای مدل را به صورت تابعی از زمان ارائه نمودند. این مدل به عنوان پایه ای برای کارهای بعد از آن به شمار می رود. به عنوان مثال شاهین حسین و همکاران در سال 2012 از این مدل جهت تخمین

1- Valve mode

2- ctyjs119

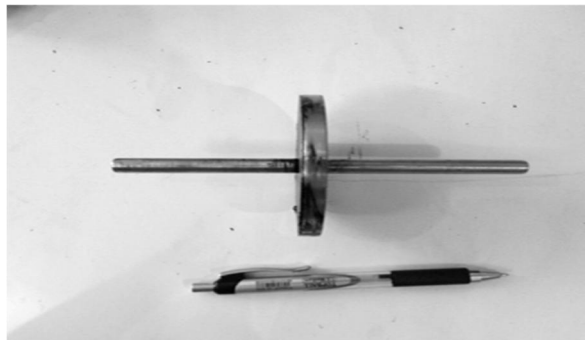
3- PID

4- Pt100 thermocouple

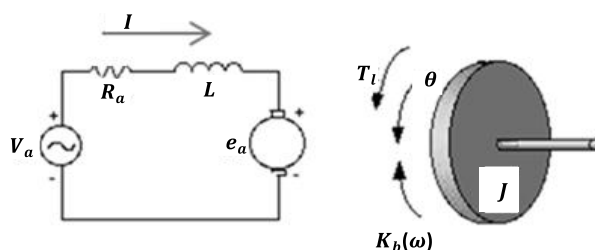
5- ANSYS14



شکل 3- الف مجموعه شفت و کوپلینگ موتور



شکل 3- ب مجموعه مونتاژی شفت و کوپلینگ موتور



شکل 4 مدار معادل الکتریکی موتور جریان مستقیم

2-2- شفت و کوپلینگ

برای بررسی سیال مگنتورئولوژیکال در حالت گذرا در نرخ های برشی متغیر، کوپلینگی با سه صفحه مطابق شکل 3-الف طراحی گردید. کوپلینگ مونتاژ شده در شکل 3-ب نشان داده شده است. کوپلینگ از سه صفحه با فاصله 0/5 و شعاع 30 میلیمتر تشکیل شده است. علت استفاده از سه صفحه افزایش حساسیت گشتاور خروجی می باشد.

2-3- موتور جریان مستقیم

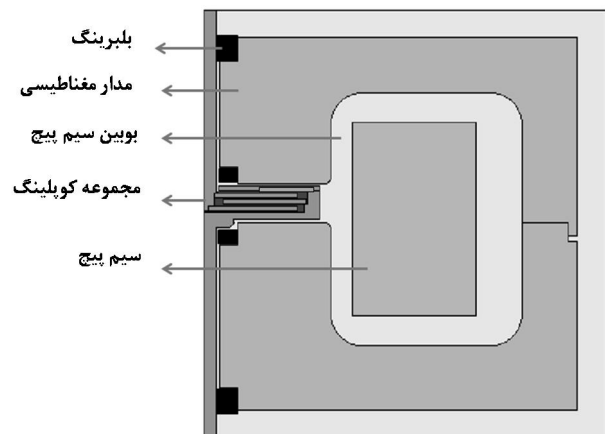
برای ایجاد برش با نرخ متغیر از موتور جریان مستقیم با ولتاژ نامی 24 ولت، استفاده شده است. شکل 4 مدار معادل الکتریکی موتور جریان مستقیم را نشان می دهد. در این مدار موتور از منبعی تغذیه می شود که در شکل با V_a نشان داده شده است.

معادلات حاکم بر موتور جریان مستقیم به دو قسمت الکتریکی، رابطه 1 و دینامیکی، رابطه 2 تقسیم می شود.

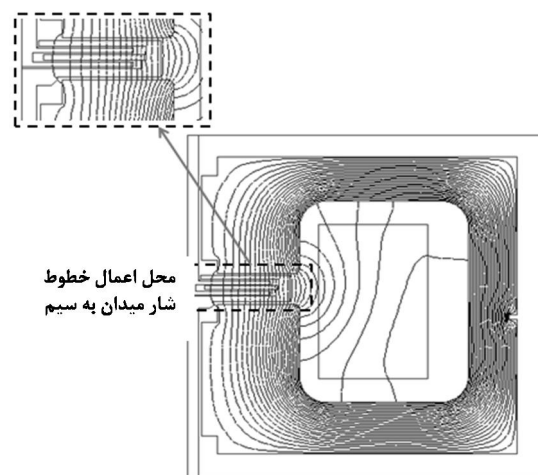
$$V_a = RI(t) + L \frac{dI}{dt} + K_b \omega(t) \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_t I(t) - K_r \omega(t) - T \quad (2)$$

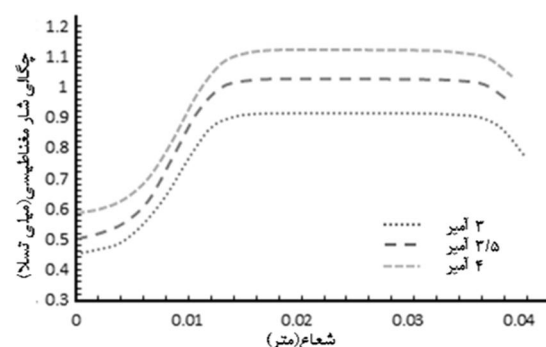
که در آن R ، L ، K_t ، K_r ، J و T به ترتیب: ثابت گشتاور، ضریب اصطکاک موتور، جریان ورودی، مقاومت، اندوکتانس کوپل، سرعت زاویه ای، لختی و گشتاور ورودی موتور می باشند. مشخصات موتور در جدول 1 نشان داده شده است. مقدار لختی با استفاده از تست تجربی و مقادیر دیگر با استفاده از اطلاعات فنی موتور بدست آمده است.



شکل 2- الف اجزا مغناطیسی کوپلینگ



شکل 2- ب نتیجه آنالیز عددی خطوط چگالی شار مغناطیسی



شکل 2- ج تغییرات چگالی شار مغناطیسی در منطقه مشخص شده در قسمت ب

همچنین در این پژوهش از بلبرینگ های غیر مغناطیسی استفاده شده تا اثرات ناخواسته میدان مغناطیسی بر عملکرد سامانه حذف شود. خواص مغناطیسی بلبرینگ نزدیک به 1 در نظر گرفته شد. شکل 2-الف یک نیمه مدل دو بعدی متقارن مدار مغناطیسی را در نرم افزار انسیس نشان می دهد. تحلیل عددی انجام شده در شکل 2-ب نشان می دهد که راستای خطوط شار مغناطیسی در مدار مغناطیسی عمود بر جهت برشی سیال وارد می شود. شکل 2-ج، شار مغناطیسی در مرکز هسته آهنی، در ازای اعمال جریان 3، 3/5 و 4 آمپر مثبت به کوپل را نشان می دهد. با توجه به هندسه کوپلر و لزوم تعبیه کردن فضایی جهت قرارگیری کوپلینگ، میدان مغناطیسی در مرکز مدار مغناطیسی افت می یابد و با حرکت در راستای شعایی این مقدار افزایش یافته و به یک مقدار ثابت و یکنواخت می رسد.

چگالی‌های شار مغناطیسی مختلف را نشان می‌دهد. آزمایش‌ها در دمای ثابت 25 درجه سانتیگراد انجام شده است. با توجه به شکل، مخصوصاً در چگالی شار مغناطیسی بالا (مقادیر بالاتر از صد میلی تسلا) تنش برشی ایجاد شده مستقل از نرخ برش است. در چگالی شار پایین نیز این فرض می‌تواند به صورت قابل قبولی انجام گیرد. ولی در صورت عدم حضور میدان تغییر تنش برشی بر حسب نرخ برش، مشابه با رفتار سیال پایه است.

$$\tau + \lambda \dot{\tau} = P|B| \quad (3)$$

شکل 7 تغییرات تنش برشی بر حسب چگالی شار مغناطیسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل با خطوط ممتد نشان داده شده است، می‌توان این تغییرات را با یک رابطه خطی برازش و به صورت رابطه 4 نشان داد.

$$\tau = 13.02 \times B \quad (4)$$

چگالی شار مغناطیسی نیز تابعی از جریان الکتریکی اعمالی است که می‌توان آن را به صورت رابطه 5 نشان داد.

$$B = \mu \frac{N}{L} I(t) = c \times I(t) \quad (5)$$

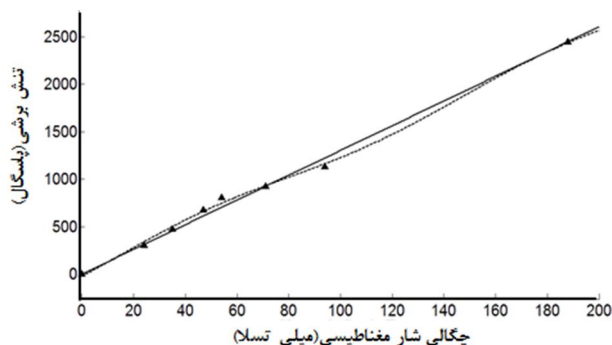
در رابطه 5، $N = 2200$ تعداد دور کوئل تحریک، $L = 12\text{mm}$ فاصله بین دو سر هسته آهنی، μ قابلیت تراوایی مغناطیسی سیال و I جریان عبوری از کوئل تحریک است.

با جایگذاری رابطه 4 به صورت تابعی از زمان در مدل، معادله اصلی مدل به صورت رابطه 6 به دست می‌آید.

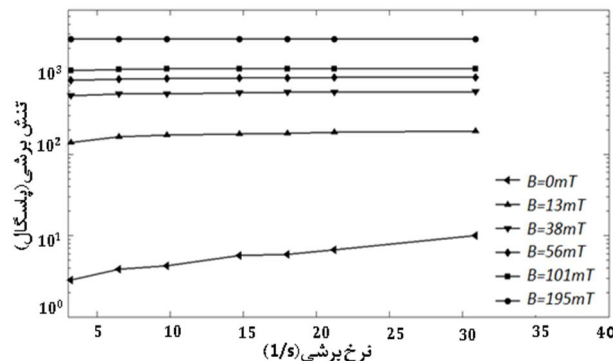
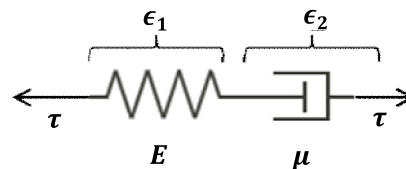
$$\tau + \lambda \dot{\tau} = 13.02 \times B(t) \quad (6)$$

تعیین چگالی شار به صورت تابعی از زمان، جهت حل معادله 6 الزامی است. همان‌طور که از رابطه 5 مشخص می‌شود، جریان اعمالی نقش اصلی در تعیین چگالی شار مغناطیسی ایفا می‌کند. شکل 8 مدار الکتریکی و نیز شیوه تولید جریان را نشان می‌دهد. تولید جریان باید به صورت کنترل شده با شکل موج مشخص جهت اعمال در رابطه 6 باشد. با توجه به این‌که حالت گذرای کوئل در اعمال جریان مستقیم، نزدیکی زیادی به تابع نمایی دارد، از ورودی جریان نمایی برای این کار استفاده شده است. از آنجا که جز تولید کننده جریان، ترانزیستور ماسفت می‌باشد، می‌توان با کنترل کلیدزنی آن، شکل موج مشخص را ایجاد نمود. ترانزیستور ماسفت¹ با ولتاژ کاری 200 ولت، جریان 12 آمپر و زمان برخاست 19 نانو ثانیه به کار برده شد. اعمال 12 ولت به دروازه گین ماسفت، موجب قرارگیری آن در حالت اشباع می‌گردد.

شکل 9 مجموعه کنترلی جهت کنترل کلید زنی ماسفت، از تولید موج مربعی² با تغییر فرکانس ورودی توسط میکرو کنترلر 8 بیتی³ را نشان می‌دهد.



شکل 7 تغییرات تنش برشی تابعی از چگالی شار مغناطیسی



شکل 6 تغییرات تنش برشی در نرخ برش و چگالی شار مغناطیسی متفاوت

جدول 1 پارامترهای موتور جریان مستقیم

پارامتر	مقدار	واحد
(مقاومت مدار) R	2	Ω
(اندوکتانس کوئل) L_f	46×10^{-6}	H
(ثابت گشتاور) K_b	56×10^{-3}	N.m/A
(ضریب اصطکاک) K_f	1384×10^{-3}	N.ms
(لختی سیستم) J	$4/94 \times 10^{-5}$	kg.m ²
(ثابت EMF) K_m	59×10^{-3}	V/rad/s

2-4- سیال مگنتورئولوژیکال

برای انجام آزمایش بهتر است گرانیوی اولیه سیال مگنتورئولوژیکال پایین باشد تا به طور کامل بین صفحات انتقال دهنده گشتاور، پخش و پراکنده شود. به همین دلیل سیال مگنتورئولوژیکال با پایه روغن سیلیکونی 100 و ذرات فرو مغناطیس آهن- کربن با درصد وزنی 10 به کار برده شد.

3- مطالعات تئوری

جهت تخمین رفتار سیال مگنتورئولوژیکال در نرخ برشی بالا و در حالت گذرا، از مدل ماکسول استفاده شد. یکی از مدل‌های ساده جهت بیان سیال‌های ویسکو الاستیک، مدل ماکسول می‌باشد. همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است، می‌توان رفتار سیال ویسکو الاستیک را توسط فنر و دمپر مدل کرد. موادی که هم مشخصات سیال ایده آل و هم جامد الاستیک (با برگشت الاستیک جزئی پس از تغییر شکل) را از خود نشان می‌دهند؛ جزو سیالات ویسکو الاستیک طبقه بندی می‌شوند.

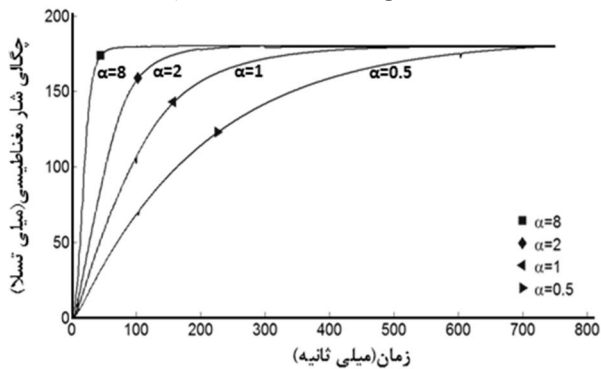
اگر کرنش ناشی از فنر را با ϵ_1 و کرنش ناشی از دمپر را با ϵ_2 نشان دهیم، نرخ کرنش کل را می‌توان به صورت $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2$ نشان داد. که در آن، η ویسکوزیته، E مدول الاستیک و ϵ نرخ کرنش سیال ویسکو الاستیک می‌باشد.

در این مقاله با الهام از معادله ماکسول مدلی برای توصیف رفتار سیال مگنتورئولوژیکال به صورت معادله 3 ارائه گردید. در معادله مذکور λ به عنوان زمان تاخیر سیال مگنتورئولوژیکال، B و P به ترتیب ورودی میدان مغناطیسی و ضریب تناسبی میدان تعریف شده است. جهت انطباق سیال با مدل تعریف شده و نیز به دست آوردن ورودی‌های مدل، باید رفتار رئولوژیکی سیال مورد بررسی قرار گیرد. شکل 6 تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برش در

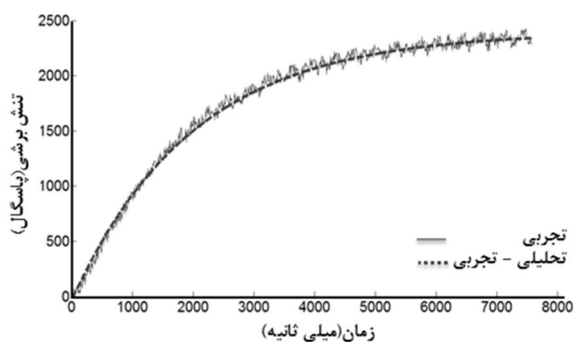
1- IRF640N
2- PWM
3- PIC18F452

صورت نمایی به سیم پیچ کوپل مغناطیسی اعمال گردید. با توجه به سنسور میدان به کار برده شده، تغییرات چگالی شار مغناطیسی بر حسب زمان برای مقادیر مختلف ثابت زمانی جریانی الکتریکی به صورت شکل 10 به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش α ، چگالی شار مغناطیسی با شیب تندتری به مقدار ثابت میل می‌کند. این بدان معنی است که افزایش α ، سبب می‌شود که سیم‌پیچ تحریک زمان گذرای کوتاه‌تری را تجربه کند. مطالعه موجود روی ثابت زمانی جریانی الکتریکی بالاتر از نیم و کمتر از هشت متمرکز شده است. نتایج تنش برشی و تغییرات سرعت زاویه ای کوپلینگ برای $\alpha = 0.5$ در شکل 11 نشان داده شده است.

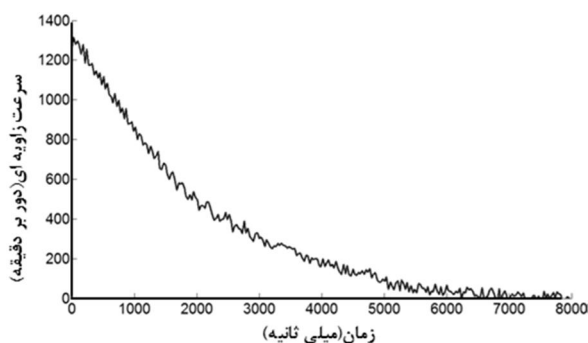
جهت محاسبه زمان تأخیر سیال، برای ثوابت زمانی مختلف جریانی الکتریکی، مقادیر تنش برشی به صورت تجربی اندازه گیری شده و با جایگذاری آن در رابطه 10، زمان تأخیر سیال به دست آمد. از آن جا که ثابت زمانی جریانی الکتریکی عامل اصلی تعیین کننده زمان تأخیر سیال است، می‌توان با تکرار این روند، برای ثوابت زمانی متفاوت رابطه این دو پارامتر را به دست آورد. جهت به دست آوردن تنش برشی، تغییرات سرعت موتور توسط انکودر زاویه ای با تقسیمات 400 پالس در دور اندازه گیری شده و همچنین نمونه برداری با نرخ 100 نمونه بر ثانیه، انجام گرفته است.



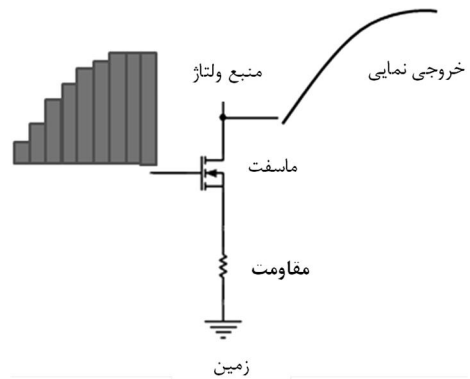
شکل 10 تغییرات چگالی شار مغناطیسی اعمالی به کوپل



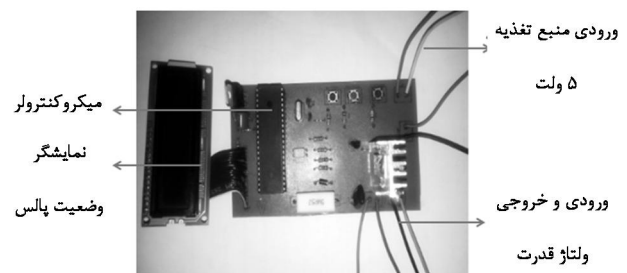
شکل 11- الف رابطه تنش برشی با زمان برای ورودی نمایی



شکل 11- ب رابطه سرعت زاویه ای با زمان برای ورودی نمایی



شکل 8 مدار الکتریکی



شکل 9 مجموعه طراحی شده برای اعمال جریان کنترل شده

در شکل 8، مدار معادل کوپل نشان ارائه گردید. رابطه ولتاژی مدار معادل در رابطه 7 نشان داده شده است.

$$I + \frac{L}{Z} \frac{dI}{dt} = \frac{V_0}{Z} = I(t) \quad (7)$$

که Z, L, I, V_0 به ترتیب ولتاژ، جریان الکتریکی، اندوکتانس و امپدانس کوپل است. مقادیر L و Z به ترتیب 0/423 هانری و 18 اهم می‌باشد. طبق رابطه (8) داریم:

$$I(t) = I_0(1 - e^{-\alpha \times t}) \quad (8)$$

با حل معادله آمپر کوپل برای ورودی آمپر نمایی (رابطه 8) و جایگزینی آن در رابطه 3 چگالی شار مغناطیسی طبق معادله 9 به صورت تابعی از α ، ثابت زمانی جریانی الکتریکی ورودی با در نظر گرفتن ائتلاف مجموعه مغناطیسی، بدست می‌آید. ثابت زمانی جریانی الکتریکی زمان رسیدن موج ولتاژ به حالت پایدار تعیین می‌کند.

$$B(t) = 0.115 \times I = 0.184 \times \left(\frac{23 \times \alpha + \frac{1000}{e^{\alpha \times t}} - \frac{23.5 \times \alpha}{e^{42.55 \times t}} - 1000}{23 \times \alpha - 1000} \right) \quad (9)$$

با قرار دادن چگالی شار مغناطیسی از رابطه 9 در رابطه 6 معادله به صورت رابطه 10 کامل می‌شود.

$$\tau(t, \alpha) + \lambda \tau(t, \alpha) = 2395.6 \times \left(\frac{23 \times \alpha + \frac{1000}{e^{\alpha \times t}} - \frac{23.5 \times \alpha}{e^{42.55 \times t}} - 1000}{23 \times \alpha - 1000} \right) \quad (10)$$

همان‌طور که از رابطه 10 مشخص است، دو مقدار α و λ از پارامترهای مجهول معادله تنش برشی می‌باشند، که α ثابت زمانی جریانی و تابع ورودی اعمالی است. همچنین λ زمان تأخیر سیال، تابع خواص رئولوژیکی یا به عبارتی تابع ویسکوزیته سیال مگنتورئولوژیکال می‌باشد. با داشتن مقدار λ در معادله 10 می‌توان تنش برشی سیال را به صورت تابعی از زمان در حالت گذرا تعریف نمود. نحوه بدست آوردن زمان تأخیر سیال که متأثر از ورودی سیستم می‌باشد، نیازمند مقایسه نتایج آزمایش‌های تجربی می‌باشد.

4- آزمایش‌ها

جهت بدست آوردن رابطه تجربی برای زمان تأخیر سیال، جریان ورودی به

طبق معادله 11 با انتگرال گیری نسبت به سطح پراب مقدار گشتاور به صورت تابعی از زمان به صورت رابطه 12 به دست می‌آید.

$$T(t, \alpha) = 4 \times \int_0^{30} \int_0^{2\pi} \tau(t, \alpha) \times r \, d\theta \, dr \quad (12)$$

با جایگزینی رابطه 1، در رابطه 2 و حل معادله‌های دینامیکی موتور جریان مستقیم، معادله سرعت کوپلینگ بدست می‌آید (رابطه 13).

$$J \frac{d\omega}{dt} + \left(\frac{K_b^2}{R} - K_r \right) \times \omega(t) = \frac{K_b}{R} \times V_a - T(t, \alpha) \quad (13)$$

با اعمال گشتاور به دست آمده از رابطه 12 و جایگزینی پارامترهای موتور و حل عددی معادله 13، تغییر سرعت زاویه‌ای ناشی از گشتاور بدست می‌آید. نتیجه حاصل از حل عددی برای $\alpha=1/5$ در شکل 13 به صورت خط چین نشان داده شده است.

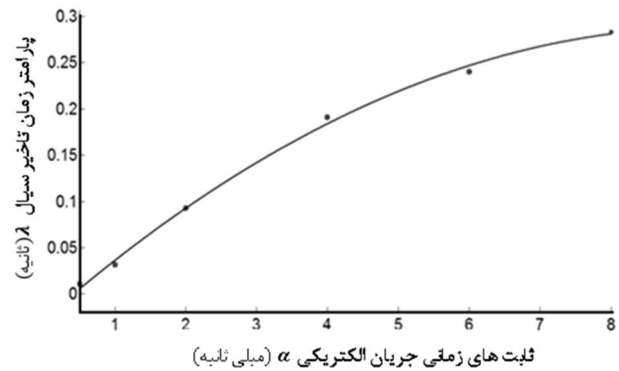
جهت بررسی و صحت سنجی مدل به دست آمده، تغییرات تنش برشی و سرعت زاویه‌ای با استفاده از مدل ارائه شده با ثابت زمانی جریان الکتریکی $1/5$ ، به دست آمد. داده‌های تجربی نیز با همین شرایط کاری در کوپلینگ که در بخش 2، توضیح داده شده، حاصل شد. نتایج هر دو بررسی در شکل 13 نشان داده شده است.

ماکزیمم درصد اختلاف بین مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده 10 درصد است. مقدار اختلاف تا قبل از زمان 500 میلی ثانیه با زمان افزایش می‌یابد و بعد از 500 میلی ثانیه با زمان کاهش یافته تا در طولانی مدت به مقدار ثابت 2 درصد برسد. علت این پدیده را می‌توان در لختی سیال مگنتورئولوژیکال جستجو نمود. در ثانیه‌های نخست لختی سیال در برابر تغییر حالت از نیوتنی به ویسکوالاستیک تا حدودی مقاومت نشان داده و این باعث خطای مدل تا 10 درصد می‌شود. ولی در ثانیه‌های بعد این لختی کم رنگ شده و باعث می‌شود مدل ارائه شده تخمین مناسب تری را از رفتار سیال ارائه دهد. در نتیجه دقت مدل در این زمان‌ها بیشتر می‌گردد.

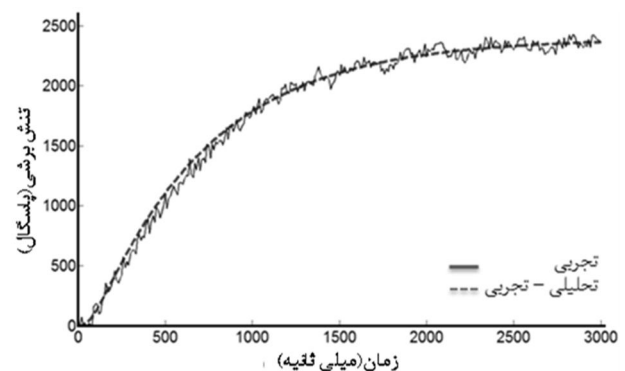
5- نتیجه گیری

در این مقاله با توسعه مدل ماکسول برای مواد ویسکوالاستیک، مدل جدیدی برای تخمین رفتار سیال‌های مگنتورئولوژیکال در ناحیه گذرا ارائه شده است. به سبب وجود لختی در سیال مگنتورئولوژیکال گذار آن از حالت پایه به حالت پایدار زمانی به طول خواهد انجامید. دانستن رفتار سیستم در این زمان برای طراحی و کنترل مناسب انواع عملگرهایی را که بر اساس این سیال کار می‌کنند، ضروری است. طبیعت مدل ارائه شده، برای سیال مگنتورئولوژیکال، مستلزم به دست آوردن پارامترهایی به صورت تجربی می‌باشد. کوپلینگ آزمایشگاهی به گونه‌ای طراحی و ساخته شد که بتوان میدان عمود بر جهت برشی سیال به صورت کنترل شده و در شدت‌های متغیر اعمال نمود. در مدل ارائه شده فرض شده است، تنش برشی اعمال شده به سیال در اثر اعمال میدان مغناطیسی مستقل از نرخ برش است. آزمایش‌های تجربی فرض مذکور را با دقت قابل قبولی تایید می‌کند.

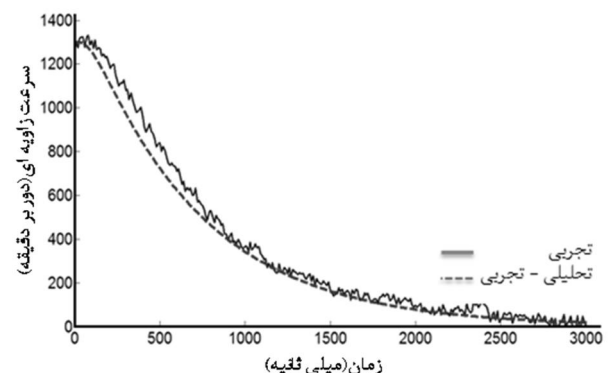
ورودی کوپلینگ جریان الکتریکی ثابت اعمال شده به موتور و جریان الکتریکی متغیر اعمال شده به کوپل است. خروجی مدل، تنش برشی ایجاد شده در سیال و سرعت زاویه‌ای نهایی موتور است. سرعت زاویه‌ای نهایی به دلیل گشتاور اعمالی توسط سیال به محور با سرعت اولیه متفاوت است. پس این پارامتر به نوعی معادل گشتاور اعمالی توسط سیال است. دو پارامتر مذکور برای ثابت زمانی جریان الکتریکی $1/5$ به صورت تجربی بدست آمده و با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل مقایسه گردیده است. مقایسه مقادیر نشان می‌دهد که نتایج تجربی با مدل توسعه داده شده انطباق مناسبی داشته و با ماکزیمم



شکل 12 برآزش زمان تاخیر بر حسب تغییرات ثابت زمانی آمپر



شکل 13 الف صحت سنجی تنش برشی بر حسب زمان برای $\alpha=1/5$



شکل 13 ب صحت سنجی سرعت زاویه‌ای بر حسب زمان برای $\alpha=1/5$

جدول 2 زمان تاخیر سیال در ثابت زمانی جریان ورودی

ثابت‌های زمانی جریان الکتریکی(α) - پارامتر زمان تاخیر سیال(λ)						
α	0/5	1	2	4	6	8
λ	0/011	0/032	0/093	0/191	0/24	0/28

مقادیر زمان تأخیر سیال و ثوابت جریان الکتریکی متناظر با آن در جدول 2 ارائه شده است. طبق جدول 2 با افزایش α ، ورودی میدان به سمت پله سوق داده می‌شود، که این خود باعث تاخیر یا افزایش انحراف پارامتر زمان تاخیر سیال می‌شود.

شکل 12 زمان تأخیر سیال بر حسب ثابت زمانی جریان الکتریکی را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر می‌توان رابطه بین این دو پارامتر را با برآزش یک چند جمله‌ای درجه 2 به صورت رابطه 11 به دست آورد.

$$\lambda = 0.0035 \times \alpha^2 + 0.066 \times \alpha - 0.025 \quad (11)$$

با جایگذاری پارامتر زمان تاخیر سیال از رابطه در رابطه 8، رابطه تنش برشی به عنوان تابعی از زمان، در حالت گذرا بدست می‌آید.

درصد خطای 10 درصد، در زمان های بالاتر این خطا کاهش می یابد.

6- مراجع

- [9] B. Kavlicoglu, F. Gordaninejad, Y. Liu, X. Wang, and N. Cobanoglu, Magneto rheological Fluid Limited Slip Differential Clutch, *Composite and Intelligent Materials Laboratory*, Nevada, 2006.
- [10] M. Giuclea, T. Sireteanu, D. Stancioiu and C. W. Stammers, Modeling of Magneto rheological Damper Dynamic Behavior by Genetic Algorithms Based Inverse Method, *The Romanian Academy*, Vol. 5, No.1, pp.000 - 000, 2004.
- [11] B.F. Spencer, S.J. Dyke, M.K. Sain and J.D. Carlson, Phenomenological Model of a Magneto rheological Damper, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 1, Issue 1-2, pp. 143-146, March 1996.
- [12] K. H. Guðmundsson, *Design of a Magneto rheological Fluid for an MR Prosthetic Knee Actuator with an Optimal Geometry*, Phd Thesis, University of Iceland, Iceland, 2011.
- [13] M. Zubieta, M. J. Elejabarrieta and M. Bou-Ali, A numerical method for determining the shear stress of magnetorheological fluids using the parallel-plate measuring system, *Rheol Acta*, Vol.48, pp. 89-95, 2009.
- [14] F. D. Goncalves, *Characterizing the Behavior of Magneto rheological Fluids at High Velocities and High Shear*, Phd Thesis, Virginia Polytechnic Institute, 2005.
- [15] J. C. Ulicny, M. A. Golden, C. S. Namuduri and D. J. Klingenberg, Transient response of magneto rheological fluids: Shear flow between concentric cylinders, *Journal Of Rheology*, Vol.49, pp.87-104, 2005.
- [16] H. M. Laun and C. Gabriel, Measurement modes of the response time of a magneto rheological fluid (MRF) for changing magnetic flux density, *Rheol Acta*, Vol.46, pp. 665-676, 2007.
- [17] H. Sahin, F. Gordaninejad, X. Wang and Y.Liu, Response time of magnetorheological fluids and magnetorheological valves under various flow conditions, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.23, pp. 949-957, 2012.
- [1] J. White, C. Selig, J. Oakley, M. Anderson and R. Bonazza, The Rayleigh-Taylor Instability at a Water/Magneto rheological Fluid Interface, *International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing*, Cambridge, United Kingdom, 2004.
- [2] A. Katiyar, A.N. Singh, P. Shukla and T. Nandi, Rheological behavior of magnetic nanofluids containing spherical nanoparticles of Fe-Ni, *Powder Technology*, Vol. 224, pp. 86-89, 2012.
- [3] M. Ocalan, G. H. McKinley, Rheology and microstructural evolution in pressure Driven flow of a magneto rheological fluid with strong particle-wall interactions, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23, 9: pp. 969-978, first published on January 29, 2012.
- [4] D. Calarasu, C. Cotae and R. Olaru, Magnetic Fluid brake, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 201, Issues 1-3, pp. 401-403, 1999.
- [5] K. Karakoc, E. J. Park and A. Suleman, Design considerations for an automotive magnetorheological brake, *Mechatronics*, Vol. 18, Issue 8, pp. 434-447, October 2008.
- [6] J. Huang, J.Q. Zhang, Y. Yang and Y.Q. Wei, Analysis and design of a cylindrical magneto-rheological fluid brake, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, Issues 1-3, pp. 559-562, 11 October 2002.
- [7] F. Bucchi, P. Forte and F. Frendo, A magnetorheological clutch for efficient automotive auxiliary device actuation, *Journal of Frattura ed Integrità Strutturale*, Vol.23, pp.62-74, 2013.
- [8] L. Wessling, *Physical modeling of a clutch for heavy vehicle*, Msc. Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 2011.