

بررسی تحلیلی و عددی اثر اختلاف فشار و تغییر شاخص رفتار در

میراگرهای مغناطیسی

محمدرضا نجفی
دانشجوی دکتری دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، تهران، ایران
najafi.m@ihu.ac.ir

محمدرضا الهامی*
دانشیار دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، تهران، ایران
mrelhami.63@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۵

چکیده

در این مقاله به بررسی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال^۱ (MR) میراگرهای مغناطیسی^۲ با تأکید بر اثر اختلاف فشار و تغییر شاخص رفتار جریان (n) پرداخته شده است. ابتدا به روش تحلیلی و با استفاده از مدل هرشل باکلی و تقریب صفحات موازی، معادلات حاکم بر رفتار رئولوژیکی سیال MR استخراج و از مدل پلاستیک بینگهام در $n=1$ برای تنش برشی استفاده شد. در ادامه با مدل‌سازی عددی مسئله به صورت سیال گذرا بین دو استوانه هم‌مرکز و اعتبارسنجی آن، پارامترهای سرعت متوسط خروجی، اصطکاک سطح داخلی دیواره و لزجت^۳ ظاهری در اختلاف فشارهای ثابت و متغیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش عدد شاخص جریان (n) در اختلاف فشار ثابت، سرعت خروجی کاهش می‌یابد و افزایش اختلاف فشار منجر به افزایش سرعت در نقاط مختلف قسمت خروجی می‌گردد. همچنین ضریب اصطکاک دیواره در اختلاف فشار ثابت با افزایش n در تمام نواحی افزایش می‌یابد و با افزایش اختلاف فشار، مقدار ضریب اصطکاک نیز افزایش می‌یابد. بررسی لزجت با تغییر n در اختلاف فشار ثابت و همچنین تغییر آن با تغییر اختلاف فشار نشان‌دهنده رفتار کاهش‌ی است.

واژگان کلیدی: سیال مگنتورئولوژیکال، اختلاف فشار، میراگر مغناطیسی، سرعت متوسط خروجی، شاخص رفتار جریان

۱. مقدمه

نیز در این حوزه تعریف می‌شوند که می‌توانند خواصی مانند لزجت و الاستیسته را که مربوط به جریان و تغییر شکل ناشی از وجود اصطکاک داخلی بین ذرات آن (تنش‌های تسلیم) است را تغییر دهد [۲-۴]: به این ویژگی، خواص رئولوژیکی^۴ سیال می‌گویند. رئولوژی شاخه‌ای از علوم طبیعی

امروزه استفاده از مواد هوشمند همچون سیالات غیرنیوتونی بسیار مورد توجه صنایع قرار گرفته است، چراکه این مواد دارای یک یا چند خاصیت قابل تغییر به وسیله محرک خارجی مثل میدان مغناطیسی هستند [۱]. سیال‌های هوشمند

است که به بررسی رفتار و تغییر شکل مواد در اثر تنش‌های وارده می‌پردازد [۵]. سیال‌های مگنتورئولوژیکال (MR) از جمله سیال‌های هوشمند هستند که خواص رئولوژیکی آن (مانند لزجت و تنش برشی) در اثر اعمال میدان الکتریکی و مغناطیسی تغییر می‌کند [۱۲-۶]. سیال‌های MR در صنایعی همچون اتومبیل‌سازی [۱۳]، صنایع نظامی [۱۴-۱۵]، ترمزهای مغناطیسی [۱۶-۱۸]، کلاچ مغناطیسی [۱۹-۲۱]، میرا نمودن ارتعاشات [۲۲-۲۳]، کاربردهای پزشکی [۲۴-۲۵] و دیگر صنایع [۲۶-۳۲] مورد استفاده قرار گرفته است. در گسترش دستگاه‌هایی که از سیالات MR استفاده می‌کنند، کنترل لزجت سیال (با در نظر گرفتن حالت‌های اعمال تنش جریان، برشی و فشاری) اهمیت دارد. کنترل دستگاه‌های حاوی MR می‌تواند به صورت مستقیم از منابع تغذیه معمولی با ولتاژ کم انجام شود [۳۳-۳۵]. پاپل^۵ [۳۶] برای اولین بار سوسپانسیون^۶ را ساخت که در آن ذرات کوچک مغناطیسی به صورت پایدار در داخل یک سیال مناسب پراکنده شده بود و مطالعات خاصی بر روی تأثیر میدان بر روی خواص سیال انجام شد. فیلیپس^۷ [۳۷] درباره کاربردهای مهندسی سیالات دارای تنش تسلیم مطالعاتی را انجام داد و برای اولین بار تقریب صفحات موازی را در شرایطی که شکاف حلقوی نسبت به شعاع حلقه کوچک است، مطرح کرد. وانگ^۸ و همکاران [۳۸] نمونه‌ای از میراگرهای MR را که برای کاهش نوسانات ساختمان‌های بلند استفاده می‌شود را مدل‌سازی و تحلیل کنترلی حلقه باز کردند. چائوچی وانگ و گردانی‌نژاد [۳۹] به صورت تئوری و آزمایشگاهی نشان دادند که مدل سیال هرشل-باکلی می‌تواند به هنگام بررسی رفتار غیرنیوتنی ناحیه برش خورده سیالات MR و ER مورد استفاده قرار بگیرد. چوئی^۹ و همکاران [۴۰] محدودیت‌های تقریب صفحات موازی را برای مدلی که اندازه شکاف حلقوی نسبت به شعاع متوسط بزرگ است، به روش جریان در میراگر MR بیان کردند. آوج کویکز^{۱۰} و همکاران [۴۱]، جی^{۱۱} و همکاران [۴۲]، کوک و

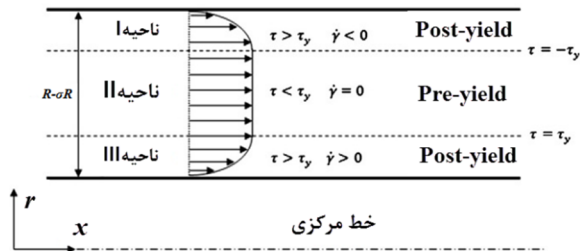
همکاران [۴۳] و دایک^{۱۲} و همکاران [۴۴-۴۶] میراگرهای MR را با استفاده از آرایش ضربه‌گیرها و فنرها مدل کردند و به تخمین رفتار هیستریزیسی^{۱۳} میراگر پرداختند. پارلاک^{۱۴} و همکاران [۴۷] طراحی بهینه‌ای را از لحاظ نیروی میراگر MR مورد استفاده، انجام دادند و برای به دست آوردن مقادیر بهینه پارامترهای طراحی روش جدیدی را برای استفاده هم‌زمان از میدان مغناطیسی و سیال MR و برای تعیین مقادیر بهینه طراحی ارائه کردند.

یکی از متداول‌ترین مدل‌های رئولوژیکال برای سیال‌های هوشمند مغناطیسی، مدل بینگهام پلاستیک^{۱۵} است [۴۸-۴۹]. بررسی عملکرد میراگرهای MR و رفتار رئولوژیکال سیال MR با استفاده از مدل بینگهام پلاستیک مورد بررسی محققان قرار گرفته است [۵۰-۵۱].

هنگ^{۱۶} و همکاران [۵۲] چهار پارامتر بی‌بعد طراحی بر مبنای معادله بینگهام پلاستیک و مدل تحلیلی شبه استاتیک را بررسی کرده و مشخصات طراحی هر پارامتر را فرموله کردند و در پژوهشی دیگر [۵۳] اثر عدد بینگهام و نسبت دامنه هیدرولیکی بی‌بعد روی ضخامت پلاگ بی‌بعد و ثابت دمپینگ ویسکوز معادل را بررسی نمودند.

ذوالفقاریان و همکاران [۵۴-۵۵] اثر میدان مغناطیسی، دما و جنس سیال بر رفتار سیال مگنتورئولوژیکال و همچنین اثر میدان مغناطیسی بر لزجت پلاستیک، تنش برشی روی دیواره شیار و ترم اینرسی که در طراحی میراگرهای مگنتورئولوژیکال در نظر گرفته نمی‌شوند را مورد مطالعه قرار دادند [۵۴-۵۵].

در این پژوهش ابتدا به روش تحلیلی، معادلات حاکم بر رفتار رئولوژیکی سیال MR موجود در میراگرهای مغناطیسی استخراج می‌شود و از روش عددی به بررسی اثر اختلاف فشار و تغییر شاخص رفتار جریان بر رفتار رئولوژیکال سیال MR پرداخته می‌شود که از نوآوری‌های پژوهش حاضر است. همچنین پارامترهایی همچون سرعت متوسط خروجی،



شکل ۲. پروفیل سرعت برای جریان سیال دارای تنش تسلیم

۳. بررسی تحلیلی

با توجه به معادلات عام پیوستگی و بقای مومنتوم خطی، و با ثابت و همگن در نظر گرفتن چگالی سیال و جریان پایدار [۵۹] تانسور تنش و تانسور آهنگ تغییر شکل به صورت زیر

تعریف می‌گردد:

$$\bar{\tau} = \bar{\tau}_y + \eta \bar{D} \quad (1)$$

$$\bar{D} = \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

برای به دست آوردن لزجت ظاهری سیال MR، از مدل هرشل-باکلی^{۱۸} استفاده می‌شود [۶۰] به طوری که برای نرخ کرنش‌های بیشتر از نرخ کرنش بحرانی $\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c$ داریم:

$$\eta = \left(\frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} \right) + k \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)^{n-1} \quad (3)$$

و برای $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c$ داریم:

$$\eta = \tau_y \frac{(2-\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} + k \left[(2-n) + (n-1) \dot{\gamma}/\dot{\gamma}_c \right] \quad (4)$$

که نرخ کرنش به صورت زیر تعریف می‌شود:

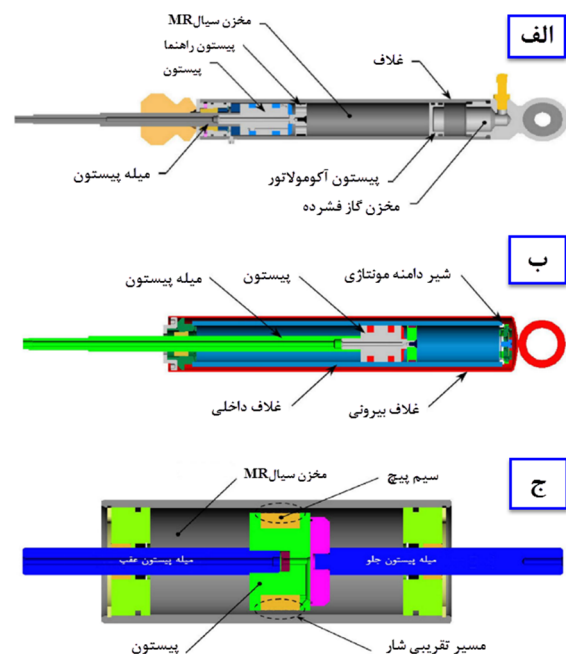
$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \bar{D} : \bar{D}} \quad (5)$$

n به عنوان شاخصی از رفتار سیال، نشان دهنده میزان ضخیم شدن ($n > 1$) و نازک شدن ($n < 1$) برش است. در صورتی که $n = 1$ باشد، می‌توان مدل هرشل-باکلی را به مدل پلاستیک بینگهام تبدیل نمود [۶۰]. شکل ۳ نشان

اصطکاک سطح داخلی دیواره و لزجت در اختلاف فشارهای ثابت و متغیر مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲. تعریف مسئله

میراگرهای MR از نظر طراحی به سه نوع میراگرهای تک مخزنه، دو مخزنه و دوطرفه تقسیم می‌شوند [۵۶-۵۷] که مشکل اصلی آنها پایداری سیال مغناطیسی آنهاست [۵۸]. در شکل ۱ سه نوع میراگر MR نمایش داده شده است.



شکل ۱. نمایش سه نوع میراگر MR؛ الف) تک مخزنه ب) دو مخزنه ج) دوطرفه

شکل ۲ نشان می‌دهد که با حرکت سیال بین دو استوانه هم‌مرکز، سه ناحیه به وجود می‌آید که ناحیه ۱ و ۳ به تنش تسلیم نرسیده و ناحیه ۲ که ناحیه پلاگ^{۱۷} نیز گفته می‌شود، تنش برشی بیشتری نسبت به تنش تسلیم دریافت می‌کند. در ناحیه پلاگ به دلیل این که سیال برش نمی‌خورد، نرخ کرنش صفر است. با فرض جریان ساکن بین دو صفحه و با فرض عدم لغزش، سرعت سیال در دیواره‌ها برابر صفر و در مرزهای ناحیه پلاگ برابر با مقدار ثابت u_{plug} است.

$$d[-2\pi r L \tau_{rx}] = \Delta P \times 2\pi r \cdot dr \quad (6)$$

با انتگرال‌گیری از این معادله و مرتب کردن جواب آن برحسب τ_{rx} داریم:

$$\begin{cases} \tau_{rx} = -\frac{\Delta P \cdot r}{2L} + \frac{A_1}{r} & \sigma R \leq r \leq a \\ \tau_{rx} = \frac{\Delta P \cdot r}{2L} + \frac{A_2}{r} & b \leq r \leq R \end{cases} \quad (7)$$

نیروی برشی کلی وارده بر دیواره‌های حلقه برابر با نیروی ناشی از فشار کلی Δp وارد بر کل سیال داخل حلقه است. بنابراین:

$$\frac{\Delta P R (1 - \sigma^2)}{2L} = \sigma [\tau_{rx}]_{r=\sigma R} + [\tau_{rx}]_{r=R} \quad (8)$$

با جای‌گذاری تنش برشی از معادلات ۷ در معادله ۸ و حل آن، نتیجه می‌دهد:

$$A_1 = -A, \quad A_2 = A \quad (9)$$

پس از جای‌گذاری رابطه ۹ در معادلات ۷ و در نظر گرفتن نرخ برش به صورت تابع صریحی از تنش برشی یعنی؛ $\dot{\gamma} = f(\tau_{rx})$ ، پروفیل‌های نرخ برش به صورت زیر نوشته می‌شوند:

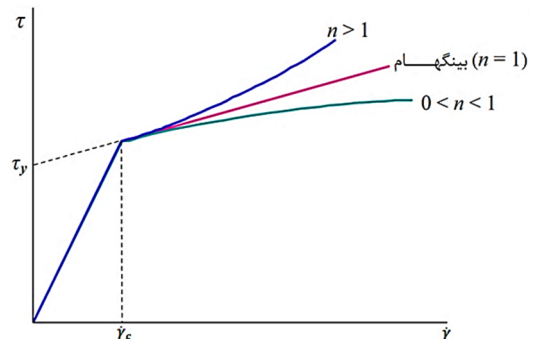
$$\begin{cases} \dot{\gamma} = \left(\frac{du_1}{dr}\right)_1 = g_1(r) & \sigma R \leq r \leq a \\ \dot{\gamma} = \left(\frac{du_1}{dr}\right)_2 = g_2(r) & b \leq r \leq R \end{cases} \quad (10)$$

نیروی برشی کلی وارده بر سطوح استوانه‌ای پلاگ حلقوی غیربرشی برابر است با [۴۰]:

$$b - a = \frac{2L\tau_Y}{\Delta P} \quad (11)$$

از معادله ۱۱ جهت محاسبه حداقل اختلاف فشار که به صورت $\Delta P_{min} = \frac{2L\tau_Y}{R(1-\sigma)}$ ساده شده است، استفاده می‌شود. با توجه به این که شرایط مرزی در سطوح پلاگ غیربرشی باید $\left(\frac{du_1}{dr}\right)_{r=a} = \left(\frac{du_1}{dr}\right)_{r=b} = 0$ باشد. از معادله ۱۰ داریم:

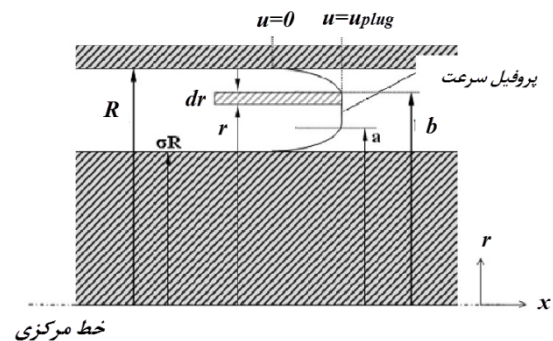
می‌دهد که چگونه برای مدل هرشل-باکلی تنش برشی τ با نرخ کرنش $\dot{\gamma}$ تغییر می‌کند که می‌توان با قرار دادن $n=1$ مدل هرشل باکلی را به مدل پلاستیک بینگهام تبدیل نمود.



شکل ۳. تغییرات تنش برشی نسبت به نرخ کرنش برای مدل هرشل باکلی [۶۰]

۳-۱ استخراج معادلات

در طراحی شکاف حلقوی میراگر MR از تقریبی استفاده می‌شود که این مجموعه را با جریان سیال بین دو صفحه موازی تخت گسترده نامحدود تقریب می‌زنند. علامت‌گذاری و قراردادهای استفاده شده برای استخراج معادلات حاکم، بر اساس شکاف حلقوی متقارن محوری نمایش داده شده در شکل ۴ است.



شکل ۴. پروفیل سرعت برای جریان سیال دارای تنش تسلیم در

یک جریان حلقوی

ناحیه پلاگ بین $r=a$ و $r=b$ محدود می‌شود. با نوشتن تعادل نیرو برای المان حلقوی به طول L بین $r=\sigma R$ و $r=a$ ، خواهیم داشت:

$$g_1(a) = g_2(b) = 0 \quad (12)$$

با در نظر گرفتن شرایط مرزی غیر لغزشی در دیواره‌های حلقه یعنی $u=0$ در $r=R$ و $r=\sigma R$ و با توجه به معادله ۱۰:

$$\begin{cases} u_1(r) = \int_{r=\sigma R}^r g_1(r) \cdot dr & \sigma R \leq r \leq a \\ u_1(r) = \int_{r=b}^r g_2(r) \cdot dr & b \leq r \leq R \end{cases} \quad (13)$$

چون پلاگ حلقوی غیربرشی همانند یک جسم جامد با سرعت ثابت u_{plug} حرکت می‌کند،

شرایط مرزی $u_{plug}(r) = u_{plug}$ را در $r=a$ و $r=b$ اعمال می‌کنیم و از آنجا که $u_{plug}(a) = u_{plug}(b)$ است، داریم:

$$\int_{r=\sigma R}^{r=a} g_1(r) \cdot dr = \int_{r=R}^{r=b} g_2(r) \cdot dr \quad (14)$$

معادلات ۱۱، ۱۲ و ۱۴ برای به دست آوردن سه مجهول a ، b و A به کار می‌روند تا پروفیل سرعت جریان و مقدار سرعت پلاگ به دست آید. مقدار آهنگ جریان حجمی کل نیز در Δp داده شده به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود [۶۱]:

$$\begin{aligned} Q &= \int_{r=\sigma R}^{r=a} u(r) \cdot 2\pi r \cdot dr \\ &+ \int_{r=b}^{r=R} u(r) \cdot 2\pi r \cdot dr \\ &+ \int_{r=a}^{r=b} u_{plug} \cdot 2\pi r \cdot dr \end{aligned} \quad (15)$$

با انجام محاسبات عددی برای هر کدام از سه بخش معادله ۱۵ مشخص می‌شود که تنها به پروفیل‌های نرخ برش نیاز است و به توابع سرعت انتگرال گرفته شده نیازی نیست.

۲-۳. مدل هرشل باکلی

ارزیابی خواص رئولوژیکی سیالات MR با استفاده از ویسکومتر^{۱۹} MR نشان داده است که به دلیل وجود

مشخصات غیرخطی در ناحیه برش خورده مدل هرشل باکلی مدل بهتری برای سیالات MR است [۶۲]. رابطه بین تنش برشی و نرخ کرنش برشی برای سیال هرشل باکلی به صورت زیر است:

$$\tau_{rx} = \tau_Y + [k\dot{\gamma}]^{1/m} \quad (16)$$

مقدار $1/m$ به عنوان شاخص رفتار جریان نسبت عکس با مقدار n در معادلات ۳ و ۴ دارد. به طوری که ($m>1$) مقدار نازک شدن و ($m<1$) مقدار ضخیم شدن برش سیال را نشان می‌دهد. با توجه به علامت‌های قراردادی شکل ۵ و تعریف معادله ۱۶ در دو ناحیه جریان و جای گذاری در معادله ۷ خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \tau_Y + k^{1/m} \dot{\gamma}^{1/m} = -\left(\frac{\Delta P \cdot r}{2L} + \frac{A}{r}\right) & , \sigma R \leq r \leq a \\ \tau_Y + k^{1/m} \dot{\gamma}^{1/m} = \frac{\Delta P \cdot r}{2L} + \frac{A}{r} & , b \leq r \leq R \end{cases} \quad (17)$$

با مرتب کردن معادله ۱۷ به صورت توابعی از r معادله به صورت $g_1(r)$ و $g_2(r)$ بیان می‌شود که با جای گذاری در معادله ۱۲ نتیجه می‌دهد:

$$\frac{1}{k} \left(-\frac{\Delta P \cdot a}{2L} - \frac{A}{a} - \tau_Y \right)^m = 0 \quad (18)$$

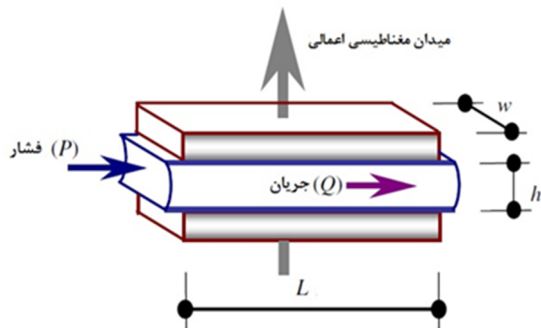
$$\frac{-1}{k} \left(\frac{\Delta P \cdot b}{2L} + \frac{A}{b} - \tau_Y \right)^m = 0 \quad (19)$$

که با حل هم‌زمان این دو معادله داریم:

$$A = \frac{\Delta P a b}{2L} \quad (20)$$

از قرار دادن معادله ۱۷ در ۱۴ و مرتب‌سازی آن به معادله زیر می‌رسیم:

سیال MR بین قطب‌های ساکن قرار می‌گیرد. شکل ۶ چگونگی اعمال میدان مغناطیسی بر سیال در حال حرکت را نشان می‌دهد.



شکل ۶. اعمال میدان مغناطیسی بر سیال MR در حال حرکت

طبق این روش، افت فشار Δp ایجاد شده در جریانی که عامل محرک آن فشار است، با مجموع جزء لزجت Δp_η و جزء Δp_τ ناشی از تنش تسلیم وابسته به میدان مغناطیسی برابر می‌شود [۳۳ و ۳۸] و داریم:

$$\Delta p = \Delta p_\eta + \Delta p_\tau = \frac{12\eta QL}{h^3 w} + \frac{c\tau_Y L}{h} \quad (23)$$

در معادله بالا، c ضریبی است که به سرعت جریان بستگی دارد و دارای مقداری در محدوده ۲/۰۷ (برای $\Delta p_\tau/\Delta p_\eta$ کمتر از تقریباً ۱) تا ۳/۰۷ (برای $\Delta p_\tau/\Delta p_\eta$ بیشتر از تقریباً ۱۰۰) است. این پارامتر طبق معادله ۲۴ برای جریان برشی قابل محاسبه است [۳۳]:

$$c \approx 2.07 + 1/(1 + 0.4 \mathcal{T}) \quad (24)$$

که \mathcal{T} طبق معادله زیر تعریف می‌شود:

$$\mathcal{T} = \frac{wh^2\tau_Y}{12Q\eta} = \frac{wh^2\tau_Y}{12A_p\nu_0\eta} \quad (25)$$

افت هد h_p و افت فشار Δp جریان نیز به صورت زیر نسبت به یکدیگر تعریف می‌شوند [۳۸]:

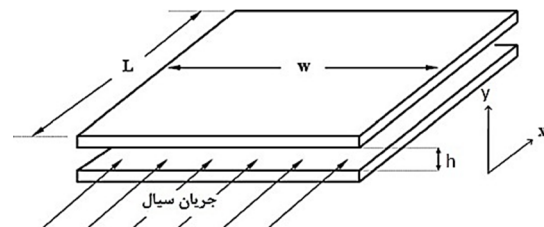
$$h_p = \frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{12\eta QL}{\rho g h^3 w} + \frac{c\tau_Y L}{\rho g h} \quad (26)$$

$$\left(\int_{r=\sigma R}^{r=a} \left(-\frac{\Delta P \cdot r}{2L} - \frac{A}{r} - \tau_Y \right)^m \cdot dr + \int_{r=R}^{r=b} \left(\frac{\Delta P \cdot r}{2L} + \frac{A}{r} - \tau_Y \right)^m \cdot dr \right) = 0 \quad (21)$$

معادلات ۲۰ و ۲۱ به همراه معادله ۱۱ برای یافتن سه مجهول a ، b ، A به کار برده می‌شوند. به دلیل این که انتگرال‌های معادله ۲۱ حل تحلیلی جز برای حالت خاص $m=1$ (که مدل هرشل باکلی به بینگهام تبدیل می‌شود) ندارند، جواب‌ها به صورت عددی باید محاسبه شوند. سپس با قرار دادن جواب‌های به دست آمده در انتگرال‌های معادله ۱۵ آهنگ جریان قابل محاسبه است.

۳-۳. تقریب صفحات موازی

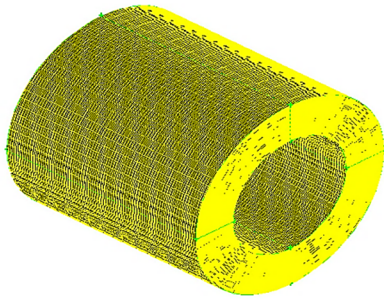
شکل ۵ جریان بین صفحات موازی را نشان می‌دهد. به خاطر کوچک بودن شکاف جریان و قطر پیستون این نوع میراگرها، می‌توان میدان جریان تقارن محوری ایجاد شده در آنها را، با جریان بین یک مجرای موازی تقریب زد [۴۰]. به دلیل شباهت به مدل تقارن محوری، پارامتر w محیط متوسط حلقه میراگر است و پارامتر h عرض شکاف است.



شکل ۵. جریان بین صفحات موازی تخت ساکن

یک عبارت کلی برای آهنگ جریان Q سیال هرشل باکلی با افت فشار اصطکاکی Δp به صورت معادله ۲۲ ارائه شده است [۴۰]:

$$Q = \frac{wh^2(\tau_w - \tau_Y)^{m+1}}{2(m+1)k\tau_w} \left[1 - \frac{(\tau_w - \tau_Y)}{(m+2)\tau_w} \right] \quad (22)$$



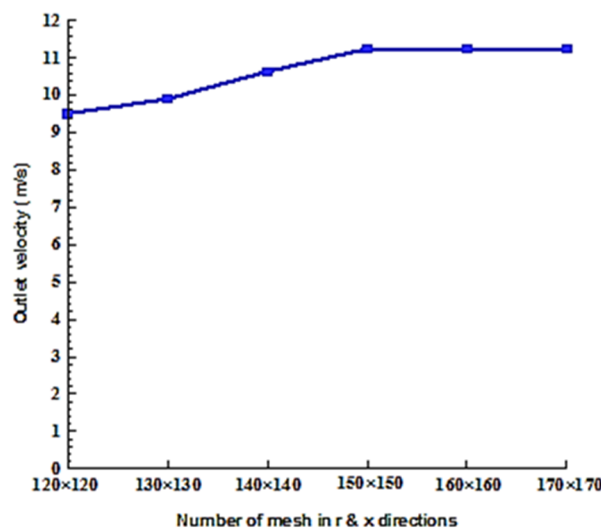
شکل ۷. هندسه حاکم بر حل عددی

پارامترهای هندسی و فیزیکی مسئله در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای هندسی و فیزیکی مسئله

| مشخصات | مقادیر |
|------------|---------------------------|
| R | ۵۰ mm |
| σ | ۰/۶ |
| L | ۱۰۰ mm |
| τ_y | ۲/۸۶۵ kPa |
| k | ۳/۸۹ kg.s ² /m |
| n | ۰/۷۹ |
| Δp | ۵۵ kPa |

شکل ۸ نشان می‌دهد که سرعت خروجی از شبکه‌بندی 150×150 به بالا دیگر تغییری نمی‌کند، بنابراین به منظور کاهش زمان محاسبات از این شبکه‌بندی استفاده شده است.



شکل ۸. نمودار استقلال شبکه

۳-۴. شرایط مرزی

با توجه به این که در این پژوهش از روش جریان استفاده شده است، سیال MR در فضای بین دو استوانه ساکن به ازای اختلاف فشار $\Delta p = 55 \text{ kPa}$ حرکت می‌کند. جریان لایه‌ای، تراکم‌ناپذیر و پایدار در نظر گرفته شده و سرعت سیال در دیواره‌ها با فرض عدم لغزش برابر صفر است و شرط مرزی ورودی و خروجی از نوع فشار در نظر گرفته شده است.

۴. بررسی عددی

۴-۱. هندسه مسئله

بیشتر میراگرهای MR تحت اعمال تنش جریان و دارای دو استوانه هم‌مرکز که عرض شکاف بین آنها کم است، ساخته می‌شوند. در کار حاضر نیز از روش عملکردی نوع جریان استفاده شده است که سیال MR تحت اختلاف فشار معینی از بین دو استوانه هم‌مرکز جریان می‌یابد. ابتدا هندسه مسئله در نرم‌افزار گمبیت^{۲۰} مدل‌سازی شد و با توجه به معادلات غیرخطی حاکم بر جریان، از روش عددی حجم محدود و الگوریتم سیمپل^{۲۱} به بررسی مسئله توسط نرم‌افزار انسیس فلونت^{۲۲} پرداخته شد. هندسه حاکم بر مسئله کار حاضر در شکل ۷ نشان داده شده است.

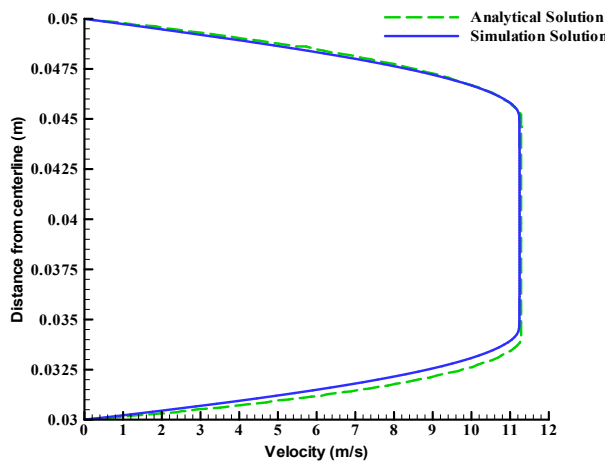
۴-۲. صحت‌سنجی نتایج

متوسط برابر ۳/۶۲ درصد است که نشان‌دهنده صحت نتایج است.

نتایج پروفیل سرعت مقطع خروجی به صورت عددی با پژوهش انجام شده توسط چوئی و همکاران^{۳۳} [۴۰] مورد مقایسه قرار گرفت. جهت محاسبه خطای متوسط از معادله ۲۷ استفاده شده است. با توجه به شکل ۹ مقدار خطای

$$Er_m = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \left(\frac{u_{analytical_i} - u_{simulated_i}}{u_{analytical_i}} \right) \quad (27)$$

× 100



شکل ۹. اعتبارسنجی حل عددی با حل تحلیلی مرجع [۴۰]

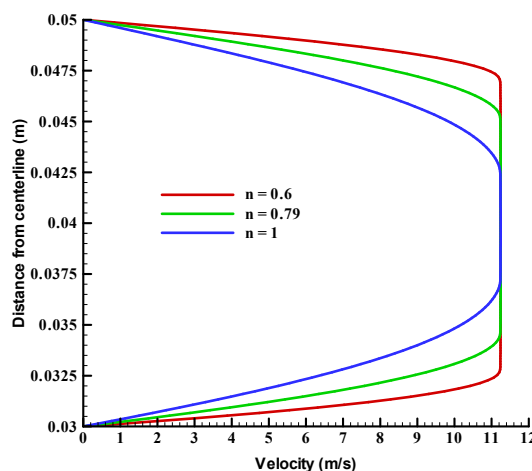
۵. نتایج

ناحیه پلاگ در پروفیل سرعت مقطع خروجی کاهش می‌یابد، درحالی‌که سرعت بیشینه ناحیه پلاگ (uplug) ثابت بوده و تغییری نمی‌کند.

۵-۱. بررسی سرعت متوسط خروجی در اختلاف

فشار ثابت

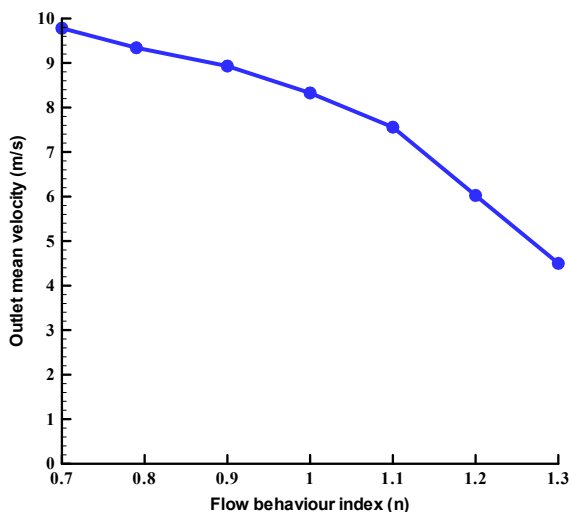
شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش عدد شاخص رفتار جریان (n) برای سیال MR در اختلاف فشار ثابت، ضخامت



شکل ۱۰. تأثیر شاخص رفتار جریان بر ضخامت ناحیه پلاگ در اختلاف فشار ثابت $\Delta p = 55 \text{ kPa}$

تغییرات سرعت متوسط خروجی برحسب شاخص رفتار جریان (n) در شکل ۱۱ آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش عدد شاخص جریان، میزان سرعت متوسط خروجی سیال کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده تغییر رفتار رئولوژیک سیال در فشار ثابت است. همان‌گونه که در حل تحلیلی، تنها برای $n=m=1$ جواب قابل دستیابی بود؛ شکل ۱۱ نیز این فرضیه را تأیید کرده و نشان می‌دهد با توجه به اینکه شیب

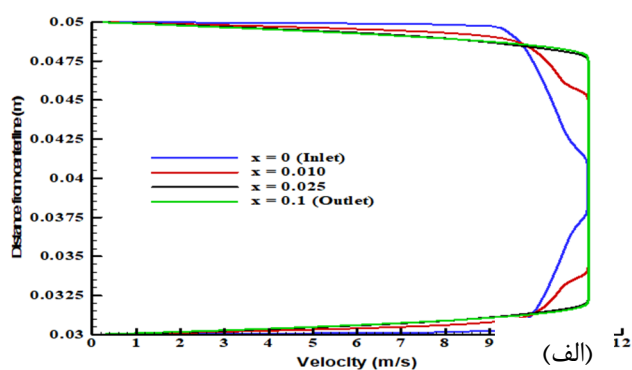
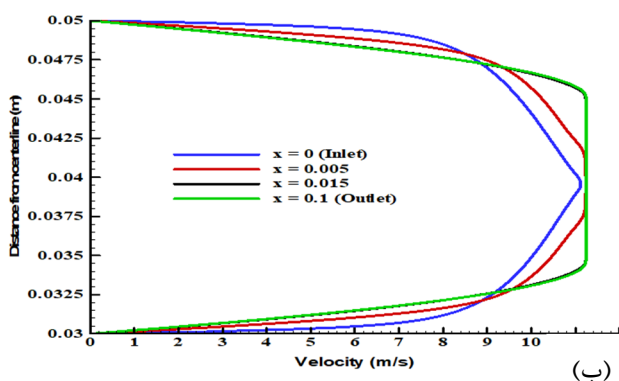
نمودار در بازه 0.85 تا 1 کم است، با در نظر گرفتن $n=1$ در رابطه تنش برشی هرشل باکلی، می‌توان آن را به مدل پلاستیک بینگهام تبدیل کرد و بدین ترتیب محاسبات نیز با خطای کمتر از ده درصد انجام می‌گردد. این فرضیه باعث سهولت در محاسبات طراحی میراگرهای MR در صنعت می‌گردد.



شکل ۱۱. تغییرات سرعت متوسط خروجی نسبت به شاخص رفتار جریان در فشار ثابت $\Delta p = 55 \text{ kPa}$

شکل ۱۲ تفاوت پروفیل سرعت در مقاطع مختلف به ازای اختلاف فشار ثابت $\Delta p = 55 \text{ kPa}$ برای $n = 0.5$ و $n = 0.79$ را نشان می‌دهد. جریان به ازای اختلاف فشار ثابت

با افزایش مقدار شاخص رفتار جریان و در نتیجه با تغییر رفتار رئولوژیک آن، زودتر و در فاصله‌ای کمتر نسبت نقطه صفر (شروع) جریان به حالت توسعه یافته می‌رسد.

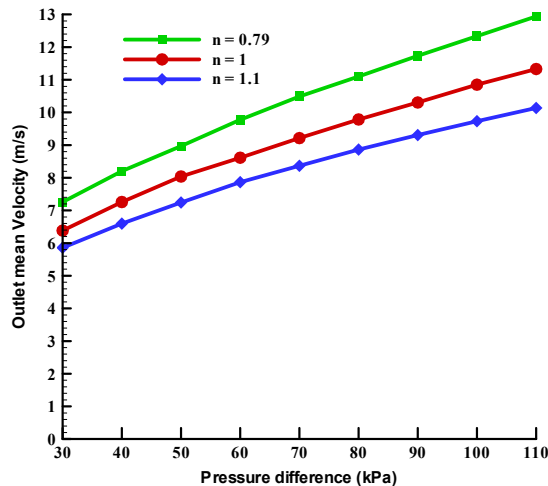


شکل ۱۲. تفاوت پروفیل سرعت در مقاطع مختلف در طول جریان با اختلاف فشار ثابت $\Delta p = 55 \text{ kPa}$ برای (الف) $n = 0.5$ و (ب) $n = 0.79$

۵-۲. بررسی سرعت متوسط خروجی در اختلاف فشار متغیر

سرعت سیال در مقطع خروجی افزایش می‌یابد در نتیجه سرعت متوسط خروجی نیز افزایش خواهد یافت اما ضخامت ناحیه پلاگ کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۳ سرعت متوسط خروجی نسبت به اختلاف فشار برای مقادیر n نشان داده شده است. با افزایش اختلاف فشار،

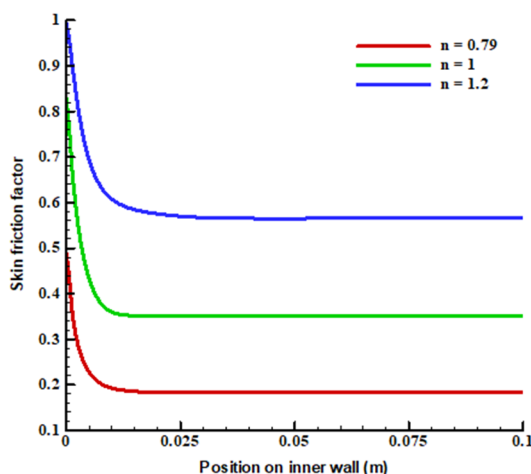


شکل ۱۳. تغییرات سرعت متوسط خروجی نسبت به اختلاف فشار

۵-۳. بررسی ضریب اصطکاک دیواره در اختلاف فشار ثابت

جریان از حالت درحال توسعه به توسعه یافته است و همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب اصطکاک سطحی در ناحیه توسعه یافته ثابت خواهد شد زیرا مقدار تنش برشی وارد بر دیواره‌ها ثابت خواهد ماند و پروفیل سرعت نیز تغییری نخواهد کرد، همچنین با افزایش شاخص جریان سیال میزان ضریب اصطکاک دیواره در تمام نواحی بیشتر خواهد شد.

شکل ۱۴ چگونگی افزایش ضریب اصطکاک سطحی را بر روی دیواره استوانه داخلی در طول استوانه نسبت به افزایش مقدار n نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۱۲ مبنی بر وجود فاصله بین نقطه رسیدن به حالت توسعه یافته و نقطه صفر سیال، می‌توان گفت که افت شدید ابتدایی به دلیل گذار

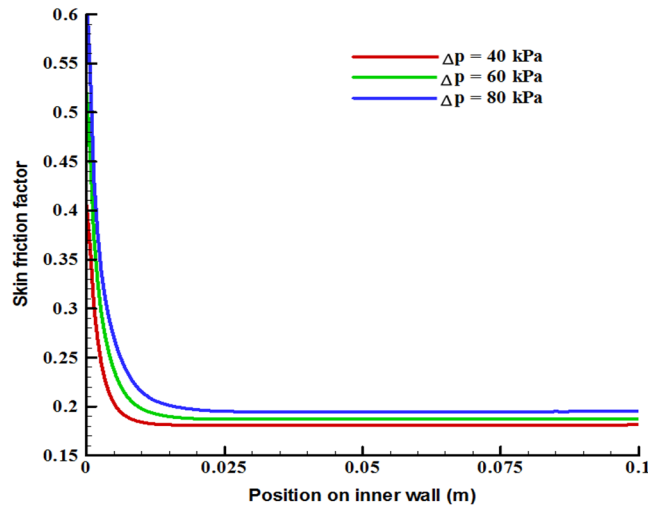


شکل ۱۴. تأثیر شاخص رفتار جریان بر ضریب اصطکاک سطحی دیواره استوانه داخلی در اختلاف فشار ثابت $\Delta p = 55 \text{ kPa}$

۴-۵. بررسی ضریب اصطکاک دیواره در اختلاف فشار متغیر

افزایش اختلاف فشار، ضریب اصطکاک سطحی بر دیواره استوانه داخلی به ازای n ثابت افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش نیروهای وارده بر دیواره داخلی ناشی از افزایش اختلاف فشار است.

شکل ۱۵ تأثیر اختلاف فشار روی ضریب اصطکاک سطحی دیواره استوانه داخلی به ازای $n = 0.79$ را نشان می‌دهد. با

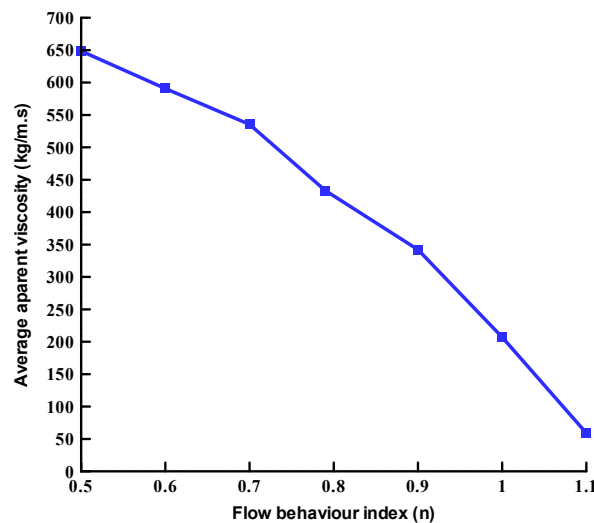


شکل ۱۵. تأثیر اختلاف فشار بر ضریب اصطکاک سطحی دیواره استوانه داخلی به ازای $n = 0.79$

اختلاف فشار ثابت، لزجت ظاهری متوسط سیال با افزایش n به دلیل کاهش ضخامت ناحیه پلاگ کاهش می‌یابد.

۴-۵. بررسی تغییر لزجت سیال در اختلاف فشار ثابت

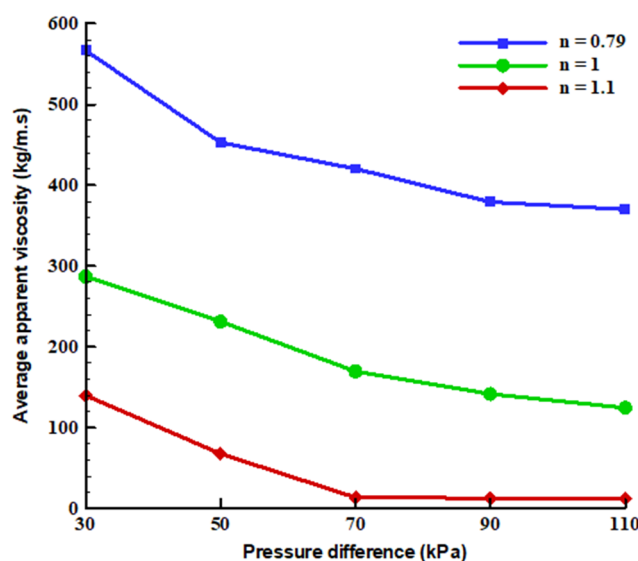
در شکل ۱۶ لزجت ظاهری متوسط سیال برای مقادیر مختلف n رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به ازای



شکل ۱۶. تغییرات لزجت ظاهری متوسط سیال نسبت به شاخص رفتار جریان به ازای اختلاف فشار $\Delta p = 55$ kPa

۵-۶. بررسی تغییر لزجت سیال در اختلاف فشار متغیر

شکل ۱۷ تغییرات لزجت ظاهری متوسط نسبت به افزایش اختلاف فشار را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش اختلاف فشار، لزجت ظاهری متوسط سیال MR کاهش می‌یابد؛ زیرا افزایش اختلاف فشار تنش‌های ایجاد شده در لایه‌های سیال که در نواحی برش خورده وجود دارند را افزایش داده و موجب کاهش ضخامت ناحیه پلاگ می‌شود. به عبارتی دیگر افزایش ضخامت ناحیه برش خورده نشان



شکل ۱۷. تغییرات لزجت ظاهری متوسط نسبت به افزایش اختلاف فشار

می‌دهد که در نواحی بیشتری از سیال، تنش برشی از مقدار تنش تسلیم سیال گذشته است و در نهایت لزجت ظاهری سیال کاهش یافته است.

لازم به ذکر است که به منظور افزایش لزجت ظاهری سیال در اختلاف فشار مورد نظر می‌توان با افزایش شار مغناطیسی اعمالی تنش تسلیم سیال MR را افزایش داد تا به ازای اختلاف فشار مورد نظر لزجت دلخواه حاصل گردد. البته این امر مستلزم این است که سیال MR به اشباع مغناطیسی نرسیده باشد.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله بررسی اثر اختلاف فشار و تغییر شاخص رفتار جریان بر رفتار رئولوژیکال سیال هوشمند مغناطیسی (MR) موجود در میراگرهای مغناطیسی و به صورت گذرا بین دو استوانه هم‌مرکز به دو صورت عددی و تحلیلی انجام گرفت و نتایج صحت‌سنجی شد. ابتدا با روش تحلیلی، معادلات حاکم بر رفتار رئولوژیکی سیال MR استخراج شد و از مدل هرشل باکلی به منظور ارزیابی آن و از تقریب صفحات موازی جهت به دست آوردن پارامترهای مختلف استفاده شده است. ثابت شد که می‌توان برای

سیالاتی که شاخص رفتار جریان آنها در بازه بین ۰/۸۵ تا ۱/۱ است می‌توان با احتساب خطایی حدود ۱۰ درصد، از مدل پلاستیک بینگهام ($n=1$) برای تنش برشی آنها استفاده نمود.

بررسی سه پارامتر سرعت خروجی، ضریب اصطکاک و لزجت ظاهری به صورت عددی صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که با افزایش عدد شاخص جریان (n) در اختلاف فشار ثابت، میزان سرعت خروجی کاهش می‌یابد و جریان زودتر به حالت توسعه یافته می‌رسد و افزایش اختلاف فشار منجر به افزایش سرعت در نقاط مختلف قسمت خروجی می‌گردد

| | |
|--|--------------------|
| نرخ کرنش تغییر حالت سیال از نیوتنی به غیر نیوتنی | $\dot{\gamma}_c$ |
| تنش برشی سیال | τ_{rx} |
| ثابت انتگرال گیری | A, A_1, A_2 |
| آهنگ جریان حجمی | Q |
| عرض جریان بین قطب‌های ساکن | w |
| عرض شکاف میراگر (در طول $R-\sigma R$) | h |
| افت فشار ناشی از جزء لزجت | Δp_η |
| افت فشار ناشی از تنش تسلیم | Δp_τ |
| طول جریان بین قطب‌های ساکن | L |
| تنش تسلیم بی‌بعد | \mathcal{T} |
| سطح مقطع پیستون | A_p |
| سرعت پیستون | u_0 |
| افت هد | h_p |
| چگالی جرمی مایع | ρ |
| سرعت در نواحی ۱ تا ۳ پروفیل سرعت | $u_i, i = 1, 2, 3$ |

که در مجموع موجب افزایش سرعت متوسط خروجی می‌شود. ضریب اصطکاک دیواره در اختلاف فشار ثابت با افزایش n در تمام نواحی روند صعودی دارد و همچنین با افزایش اختلاف فشار، مقدار ضریب اصطکاک نیز افزایش می‌یابد. تغییرات لزجت ظاهری متوسط سیال برای n ثابت با افزایش اختلاف فشار روند نزولی دارد، چراکه منجر به کم شدن ضخامت ناحیه پلاگ می‌شود. با افزایش شاخص رفتار جریان در اختلاف فشار ثابت، لزجت ظاهری متوسط سیال کاهش یافته و در نتیجه ضخامت ناحیه پلاگ کاهش می‌یابد.

۷. پیوست ۱، علائم و اختصارات

| | |
|----------------|------------------------------------|
| $\bar{\tau}$ | تانسور تنش |
| η | لزجت ظاهری |
| $\bar{\tau}_y$ | تانسور تنش تسلیم |
| \bar{D} | تانسور آهنگ تغییر شکل |
| k | نرخ تغییر تنش برشی نسبت به کرنش کل |
| m, n | شاخص رفتار جریان |

۸. مأخذ

- [1] Alavi, M.A., Sobhnamayan, F., "Analysis, Application and Stating Governing Equations of Smart Fluids", *19th Annual Conference on Mechanical Engineering-ISME2011, 10-12 May, The University of Birjand, Birjand, Iran, 2011.*
- [2] Frank, M., "White," *Fluid Mechanics*, McGraw Hill., 8th ed., 2015.
- [3] Bird, R. Byron., Warren e., "Stewart, Edwin N. Lightfoot, *Transport Phenomen*", John Wiley & son, New York, 1960.
- [4] Chhabra, Raj P., and John Francis Richardson, "Non-Newtonian flow in the process industries: fundamentals and engineering applications", Butterworth-Heinemann, 1999.
- [5] Malkin, Alexander, and Alexander Y. Malkin, "Rheology fundamentals", ChemTec publishing, 1994.
- [6] Baranwal, Deepak, and T. S. Deshmukh. "MR-fluid technology and its application-a review", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2012, Vol.2, no.12, pp.563-569.
- [7] Ahmadian, Mehdi, and James A. Norris, "Experimental analysis of magnetorheological dampers when subjected to impact and shock loading", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2008, Vol.13, no.9, pp.1978-1985.
- [8] Mikułowski, G., "Adaptive impact absorbers based on magnetorheological fluids", *IPPT PAN*, 2008.
- [9] Zhang, Xianzhou, Weihua Li, and X. L. Gong, "Study on magnetorheological shear thickening fluid", *Smart materials and structures*, 2008, Vol.17, no.1, p.015051.

- [10] Bossis, Georges, A. Cifre, Yann Grasselli, and Olga Volkova, "Discontinuous shear thickening in magnetorheological suspensions", In *27th Nordic Rheology Conference "Rheology for a better world"*, 2018, Vol.26, pp87-91.
- [11] Peng, Gangrou, "Novel shear thickening and magnetorheological materials and their application in controllable electrolytes." 2016.
- [12] Bossis, G., Y. Grasselli, A. Meunier, and O. Volkova, "Tunable discontinuous shear thickening with MR suspensions", In *15th International Conference on Electrorheological fluids and Magnetorheological suspensions*, 2016.
- [13] Lindler, Jason E., Glen A. Dimock, and Norman M. Wereley, "Design of a magnetorheological automotive shock absorber", In *Smart Structures and Materials 2000: Smart Structures and Integrated Systems*, 2000, Vol.3985, pp.426-437. *International Society for Optics and Photonics*.
- [14] Liu, Xin-yun, Da-lin Wu, and Jian Hou, "Design and analysis of a scheme for the naval gun test shell entering the bore", *Defence Technology*, 2020.
- [15] Poynor, James Conner, "Innovative designs for magneto-rheological dampers", PhD diss., Virginia Tech, 2001.
- [16] Calarasu, D., C. Cotae, and R. Olaru, "Magnetic fluid brake", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1999, Vol.201, no.1-3, pp.401-403.
- [17] Karakoc, Kerem, Edward J. Park, and Afzal Suleman, "Design considerations for an automotive magnetorheological brake", *Mechatronics*, 2008, Vol.18, no.8, pp.434-447.
- [18] Huang, Jin, J. Q. Zhang, Yan Yang, and Y. Q. Wei, "Analysis and design of a cylindrical magneto-rheological fluid brake", *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, Vol.129, no.1-3, pp.559-562.
- [19] Bucchi, Francesco, Paola Forte, Francesco Frendo, and R. Squarcini, "A magnetorheological clutch for efficient automotive auxiliary device actuation", *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 2013, Vol.7, no.23, pp.62-74.
- [20] Wessling, Lisa, "Physical modeling of a clutch for heavy vehicles", 2011.
- [21] 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.
- [22] Giuclea, M., Sireteanu, T., Stancioiu, D. and Stammers, C.W., "Modelling of magnetorheological damper dynamic behaviour by genetic algorithms based inverse method". *Proc. R. Acad. Series A*, 2004, Vol.5, no.1, p.5563.
- [23] Spencer Jr, BrnF, S. J. Dyke, M. K. Sain, and Jdf Carlson, "Phenomenological model for magnetorheological dampers", *Journal of engineering mechanics*, 1997, Vol.123, no.3, pp. 230-238.
- [24] Guðmundsson, Ketill Heiðar, "Design of a magnetorheological fluid for an MR prosthetic knee actuator with an optimal geometry", 2011.
- [25] Carlson, J. David, Wilfried Matthis, and James R. Toscano, "Smart prosthetics based on magnetorheological fluids", In *Smart structures and materials 2001: industrial and commercial applications of smart structures technologies*, 2001, Vol.4332, pp. 308-316., *International Society for Optics and Photonics*.
- [26] Kim, Do Kyung, Maria Mikhaylova, Fu Hua Wang, Jan Kehr, Börje Bjelke, Yu Zhang, Thomas Tsakalakos, and Mamoun Muhammed, "Starch-coated superparamagnetic nanoparticles as MR contrast agents", *Chemistry of Materials*, 2003, Vol.15, no.23, pp.4343-4351.
- [27] Hong, R. Y., B. Feng, L. L. Chen, G. H. Liu, H. Z. Li, Y. Zheng, and D. G. Wei, "Synthesis, characterization and MRI application of dextran-coated Fe₃O₄ magnetic nanoparticles", *Biochemical Engineering Journal*, 2008, Vol.42, no.3, pp.290-300.
- [28] Chertok, Beata, Bradford A. Moffat, Allan E. David, Faquan Yu, Christian Bergemann, Brian D. Ross, and Victor C. Yang, "Iron oxide nanoparticles as a drug delivery vehicle for MRI monitored magnetic targeting of brain tumors", *Biomaterials*, Vol.29, no.4, pp.487-496.

- [29] Hiergeist, R., W. Andrä, N. Buske, R. Hergt, I. Hilger, U. Richter, and W. Kaiser, "Application of magnetite ferrofluids for hyperthermia", *Journal of magnetism and Magnetic Materials*, 1999, Vol.201, no.1-3, pp.420-422.
- [30] Ban, Shuai, and Vladislav Korenivski, "Pattern storage and recognition using ferrofluids", *Journal of applied physics*, 2006, Vol.99, no.8, p.08R907.
- [31] Vander Wal, Randall L., and Thomas M. Tichich, "Comparative flame and furnace synthesis of single-walled carbon nanotubes", *Chemical Physics Letters*, 2001, Vol.336, no.1-2, pp.24-32.
- [32] Raj, Kuldip, B. Moskowitz, and R. Casciari, "Advances in ferrofluid technology", *Journal of magnetism and magnetic materials*, 1995, Vol.149, no.1-2, pp.174-180.
- [33] Yang, Gary, B. F. Spencer Jr, J. D. Carlson, and M. K. Sain, "Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations", *Engineering structures*, 2002, Vol.24, no.3, pp.309-323.
- [34] Kim, Jeong-Hoon, Chong-Won Lee, Byung-Bo Jung, Youngjin Park, and Guangzhong Cao, "Design of magneto-rheological fluid based device", *KSME international journal*, 2001, Vol.15, no.11, pp.1517-1523.
- [35] Jolly, Mark R., Jonathan W. Bender, and J. David Carlson, "Properties and applications of commercial magnetorheological fluids", *Journal of intelligent material systems and structures*, 1999, Vol.10, no.1, pp.5-13.
- [36] Stephen, Papell Solomon, "Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles." *U.S. Patent 3,215,572, issued November 2, 1965.*
- [37] Phillips, Robert William, "*Engineering applications of fluids with a variable yield stress*", PhD diss., University of California, Berkeley, 1969.
- [38] Wang, J. Y., Y. Q. Ni, J. M. Ko, and B. F. Spencer Jr., "Magneto-rheological tuned liquid column dampers (MR-TLCDs) for vibration mitigation of tall buildings: modelling and analysis of open-loop control", *Computers & structures*, 2005, Vol.83, no.25-26 pp.2023-2034.
- [39] Wang, Xiaojie, and Faramarz Gordaninejad, "Field-controllable electro- and magneto-rheological fluid dampers in flow mode using Herschel-Bulkley theory", In *Smart Structures and Materials 2000: Damping and Isolation*, 2000, Vol.3989, pp.232-243. *International Society for Optics and Photonics.*
- [40] Chooi, Weng W., and S. Olutunde Oyadiji, "Design, modelling and testing of magnetorheological (MR) dampers using analytical flow solutions", *Computers & structures*, 2008, Vol.86, no.3-5, pp.473-482.
- [41] Awrejcewicz, Jan, and Larisa P. Dzyubak, "Hysteresis simulation and investigation of the control parameter planes", In *Proc. Fifth EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference*, 2005.
- [42] Ji, Han-Rok, Yeong-Jong Moon, Chun-Ho Kim, and In-Won Lee, "Structural vibration control using semiactive tuned mass damper", In *The Eighteenth KKCNN Symposium on Civil Engineering-KAIST6*, 2005, pp.18-20.
- [43] Kwok, N. M., Q. P. Ha, J. Li, B. Samali, and S. M. Hong, "Parameter identification for a magnetorheological fluid damper: an evolutionary computation approach", In *Proc. Sixth Intl. Conf. on Intelligent Technologies*, 2005, pp. 115-122.
- [44] Dyke SJ, Spencer Jr, BF, Sain MK, Carlson JD, "On the efficacy of magnetorheological dampers for seismic response reduction", In: *Proceedings of the ASME 16th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise*, Paper No. DETC97VIB3828, 1997, 10 p.
- [45] Spencer Jr, BrnF, S. J. Dyke, M. K. Sain, and JDf Carlson, "Phenomenological model for magnetorheological dampers", *Journal of engineering mechanics*, 1997, Vol.123, no.3, pp.230-238.
- [46] Dyke, S. J., B. F. Spencer Jr, M. K. Sain, and J. D. Carlson, "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction", *Smart materials and structures*, 1996, Vol.5, no.5, p.565.

- [47] Parlak, Zekeriya, Tahsin Engin, and İsmail Çallı, "Optimal design of MR damper via finite element analyses of fluid dynamic and magnetic field", *Mechatronics*, 2012, Vol.22, no.6, pp.890-903.
- [48] Kamath, Gopalakrishna M., Melanie K. Hurt, and Norman M. Wereley, "Analysis and testing of Bingham plastic behavior in semi-active electrorheological fluid dampers", *Smart Materials and Structures*, 1996, Vol.5, no.5 p.576.
- [49] Yoo, Jin-Hyeong, and Norman M. Wereley, "Quasi-steady axisymmetric Bingham-plastic model of magnetorheological flow damper behavior", In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2005, Vol.4210, pp.375-380.
- [50] Yoo, Jin-Hyeong, and Norman M. Wereley, "Nondimensional analysis of annular duct flow in magnetorheological/electrorheological dampers", *International Journal of Modern Physics B*, 2005, Vol.19, no.07n09, pp.1577-1583.
- [51] Wang, D. H., H. X. Ai, and W. H. Liao, "A magnetorheological valve with both annular and radial fluid flow resistance gaps," *Smart materials and structures*, 2009, Vol.18, no.11, p.115001.
- [52] Hong, S. R., S. B. Choi, Y. T. Choi, and N. M. Wereley, "Non-dimensional analysis and design of a magnetorheological damper", *Journal of Sound and Vibration*, 2005, Vol.288, no.4-5, pp.847-863.
- [53] Hong, S. R., N. M. Wereley, Y. T. Choi, and S. B. Choi, "Analytical and experimental validation of a nondimensional Bingham model for mixed-mode magnetorheological dampers", *Journal of Sound and Vibration*, 2008, Vol.312, no.3, pp.399-417.
- [54] Zolfagharian, Mohammad Mehdi, Mohammad Hassan Kayhani, and Mahmood Norouzi, "Manufacturing and testing of an optimized Magneto-Rheological (MR) fluid and modelling of a Twin tube MR damper using a modified non-Newtonian model using analytical quasi-static, analytical unsteady, numerical and experimental methods", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 2019.
- [55] Zolfagharian, Mohammad Mehdi, Mohammad Hassan Kayhani, Mahmood Norouzi, and Amir Jalali, "Parametric investigation of twin tube magnetorheological dampers using a new unsteady theoretical analysis", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, Vol.30, no.6, pp.878-895.
- [56] Ahamed, Raju, Md Meftahul Ferdous, and Yancheng Li, "Advancement in energy harvesting magneto-rheological fluid damper: A review", *Korea-Australia Rheology Journal*, 2016, Vol.28, no.4, pp.355-379.
- [57] Wereley, Norman M., and Li Pang, "Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models", *smart materials and structures*, 1998, Vol.7, no.5, p.732.
- [58] Wahid, S. A., I. Ismail, S. Aid, and M. S. A. Rahim, "Magneto-rheological defects and failures: A review", In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, Vol.114, no.1, p.012101, *IOP Publishing*, 2016.
- [59] Batchelor, George K., "*An Introduction to Fluid Dynamics*", Cambridge, 1967, UP xviii 615.
- [60] Tanner, R. I., "*Engineering Rheology*", Clarendon Press, Oxford, 1988.
- [61] Çeşmeci, Şevki, and Tahsin Engin., "Modeling and testing of a field-controllable magnetorheological fluid damper", *International Journal of Mechanical Sciences*, 2010, Vol.52, no.8, pp.1036-1046.
- [62] Chooi, Weng Wai, "*Experimental characterisation of the properties of magnetorheological (MR) fluids and MR damper*", PhD diss., The University of Manchester, 2005.

1. Magneto-Rheological
2. Magnetic Damper
3. Viscosity
4. Rheological
5. Pople
6. Suspension
7. Phillips, R.W.
8. Wang & [et al.]
9. Chooi & [et al.]
10. Awrejcewicz & [et al.]
11. Ji & [et al.]
12. Dyke & [et al.]
13. Hysteresis
14. Parlak
15. Bingham plastic
16. Hong & [et al.]
17. Plug zone
18. Herschel-Bulkley
19. Viscometer
20. GAMBIT Software
21. SIMPLE algorithm
22. ANSYS FLUENT Software
23. Chooi & [et al.]