





دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و مکاترونیک

رساله دکتري مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

بررسی پارامتریک، طراحی بهینه، ساخت و آزمایش دمپر مگنتورئولوژیکال

نگارنده: محمدمهدی ذوالفقاریان

استاد راهنما:

دکتر محمدحسن کیهانی

استاد مشاور:

دکتر محمود نوروزی

تیر ۱۳۹۹

شماره: ۲۰/۲۹۹/۱۱۲
تاریخ: ۹۹/۷/۵
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۱: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای محمد مهدی ذوالفقاریان دانشجوی دکتری رشته مکانیک تبدیل انرژی به شماره دانشجویی ۹۲۴۶۴۱۵ ورودی ۹۲/۱۰ در تاریخ ۹۹/۴/۲۴ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: بررسی پارامتریک، طراحی بهینه، ساخت و آزمایش دمپر مکتورنولوژیکال دفاع و با اخذ نمره ۱۹ به درجه عالی نائل گردید.

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☒ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷ ☐
ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵ ☐ (د) مردود: کمتر از ۱۵ ☐

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	استاد/ استادیار	دکتر محمد حسن کیهانی	استاد	
۲	مشاور/ مشاورین	دکتر محمود نوروزی	دانشیار	
۳	استاد مدعو خارجی	دکتر بهار دهقانی فیروزآبادی	استاد	
۴	استاد مدعو داخلی	دکتر محسن نظری	دانشیار	
۵	استاد مدعو داخلی	دکتر علی عباس نژاد	استادیار	
۶	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مسلم صبوری	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای محمد مهدی ذوالفقاریان بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

گردویی



تقدیم بہ

روح پدرم کہ زندگی را از دستاش،

مادرم کہ محبت را از نگاهش آموختم

و خانواده ام بہ پاس ایثار و فداکاری ہایشان

تشکر و قدردانی

با تقدیر و تشکر از استاد محترم جناب آقای محمد حسن دکتر کیهانی که مرا در طول دوره تحصیل و مراحل مختلف این تحقیق، مشفقانه راهنمایی کرده‌اند.

همچنین با تشکر از جناب آقای دکتر محمود نوروزی، که با قبول زحمت مشاوره، در تمامی مراحل تحقیق و تدوین مرا یاری کرده‌اند.

تهدنامه

اینجانب محمدمهدی ذوالفقاریان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد (دکتری) رشته مکانیک-تبدیل انرژی دانشکده مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی پارامتریک، طراحی بهینه، ساخت و آزمایش دمپر مگنتورئولوژیکال تحت راهنمایی آقای دکتر کیهانی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

۹۹/۴/۲۴

تاریخ



امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

سیال‌های مگنتورئولوژیکال، یکی از انواع سیال‌های هوشمند می‌باشند که تحت میدان مغناطیسی، دارای تنش تسلیم و لزجت قابل افزایش و کنترل می‌شوند. ساختار این سیال‌ها متشکل از ذرات فرو مغناطیسی مثل پودر آهن کربونیل، معلق در یک سیال پایه می‌باشد. یکی از کاربردهای مهندسی مهم این نوع سیالات، دمپرهای مگنتورئولوژیکال می‌باشند که خصوصیات بالقوه آن‌ها، مثل دمپینگ متغیر و قابل کنترل، محققان و شرکت‌های سازنده کمک‌فهرها را بر آن داشت که تحقیقات متعددی در زمینه این نوع سیال‌ها و دمپرهای انجام دهند. هدف از این پژوهش، مدل‌سازی، بررسی پارامتریک، طراحی و ساخت یک نمونه دمپر مگنتورئولوژیکال دو مخزنه می‌باشد. به این منظور، ابتدا، سیال مگنتورئولوژیکال بهینه با پایداری مناسب ساخته شد. جهت ساخت سیال بهینه با پایداری مناسب، پس از انجام آزمایش‌های 'SEM و EDX' روی سه نمونه پودر آهن کربونیل و انتخاب پودر با اندازه ذرات و خلوص مناسب، ۵ نمونه سیال مگنتورئولوژیکال با ترکیب‌های مختلف ساخته و تست‌های پایداری انجام شد. با استفاده از داده‌های رئومتری بدست آمده در میدان‌های مغناطیسی و دماهای مختلف، یک مدل غیر نیوتونی اصلاح‌شده جدید جهت مدل‌سازی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال بهینه ارائه شد و با مدل بینگهام پلاستیک مورد مقایسه قرار گرفت. از مزایای مدل اصلاح‌شده جدید امکان استفاده از آن در مدل‌سازی عددی می‌باشد، بطوریکه نامحدود شدن در حل اتفاق نمی‌افتد و باوجود رفتار دوگانه سیال در ناحیه پس از تسلیم، این مدل، رفتار سیال را به‌صورت تابع پیوسته پیش‌بینی می‌کند. اثر میدان مغناطیسی، دما، جنس سیال و درصد ماده نگه‌دارنده بر رفتار سیال مگنتورئولوژیکال و همچنین اثر میدان مغناطیسی بر لزجت پلاستیک، تنش برشی روی دیواره شیار و ترم اینرسی که در فرمولهای طراحی دمپر مگنتورئولوژیکال در نظر گرفته نمی‌شوند مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین جهت حل معادله انرژی در روش عددی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی سیال ساخته‌شده در آزمایشگاه به‌صورت توابعی از دما اندازه‌گیری و برازش شد. در مرحله بعد، با استفاده از روش‌های تحلیلی شبه استاتیک، تحلیلی ناپایا و عددی و مدل‌های بینگهام

¹ Scanning electron microscope

² Energy Dispersive X-Ray

پلاستیک و مدل اصلاح شده جدید، میدان جریان و فشار سیال مگنتورئولوژیکال، در دمپر مگنتورئولوژیکال، مدل سازی و نیروی دمپینگ محاسبه و مقایسه شد. سپس، اثرات افزایش دمای ناشی از تنش های ایجاد شده در سیال، دامنه و فرکانس نوسان بر تنش تسلیم، تنش برشی روی دیواره، شار حرارتی روی دیواره شیار، نیروی دمپینگ، انرژی دمپ شده و ضریب میرایی معادل دمپر، در دو حالت بدون میدان مغناطیسی و تحت میدان مغناطیسی اشباع، مورد ارزیابی قرار گرفت. عدد رینولدز در شیار پیستون، نیز محاسبه شد که طبق نتایج به دست آمده امکان مغشوش شدن جریان در محدوده سرعت مورد نظر وجود ندارد. همچنین، باهدف رسیدن به حداکثر نسبت ممکن، بین نیروی کل دمپر در حالت اشباع مغناطیسی به حالت بدون میدان مغناطیسی و با استفاده از الگوریتم مونت کارلو در نرم افزار کامسول، عرض شیار بهینه در محدوده نیرویی و عرض شیار مورد نظر جستجو شد. در مرحله بعد قطعات مربوط به پیستون، ساخته شده و پس از سیم پیچی مونتاژ می شود. نهایتاً دمپر مونتاژ شده با استفاده از دستگاه اینسترون مورد تست های نیرویی در میدان های مختلف قرار گرفته و سپس افزایش نیرو و انرژی دمپینگ با افزایش میدان مغناطیسی تا رسیدن به شرایط اشباع بررسی می شود.

کلمات کلیدی: سیال مگنتورئولوژیکال، دمپر مگنتورئولوژیکال، ویسکوزیته، مدل غیرنیوتونی اصلاح شده، نیروی دمپینگ، مدل سازی دمپر، میدان مغناطیسی، دما

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

1- Parametric investigation of twin tube magnetorheological dampers using a new unsteady theoretical analysis, Journal of Intelligent Material Systems and Structures

۲- ساخت و آزمایش سیال مگنتورئولوژیکال بهینه و مدلسازی دمپر مگنتورئولوژیکال دو مخزنه با استفاده از مدل غیر نیوتونی اصلاح شده جدید و روش های تحلیلی شبه استاتیک، تحلیلی ناپایا، عددی و آزمایشگاهی، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

۳- مدلسازی، آزمایش و بررسی پارامتریک عملکرد کمک فنر مغناطیسی هوشمند خودرو، اولین همایش ملی مکانیک محاسباتی و تجربی

۴- مدلسازی، بررسی پارامتریک، ساخت و آزمایش سیال و دمپر مگنتورئولوژیکال هوشمند، چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک هوافضا

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه	۱
۱-۱ فناوری سیال‌های هوشمند و کاربردهای آن	۲
۲-۱ مبانی سیال مگنتورئولوژیکال (MRF)	۴
۱-۲-۱ ساختار سیال مگنتورئولوژیکال (MRF)	۴
۲-۲-۱ مکانیزم عملکرد سیال مگنتورئولوژیکال (MRF)	۵
۳-۲-۱ مدل‌های رئولوژیکال سیال MR	۶
۱-۳-۲-۱ مدل بینگهام پلاستیک	۷
۲-۳-۲-۱ مدل هرشل-بالکی	۸
۳-۱ مودهای عملکرد وسایل استفاده کننده از سیال MR	۸
۴-۱ دمپ‌های مگنتورئولوژیکال (MRFD)	۱۰
۱-۴-۱ انواع دمپر MR	۱۲
۲-۴-۱ مودهای عملکرد دمپ‌های MR	۱۲
۵-۱ مدلسازی تحلیلی شبه استاتیک و محاسبه نیروی دمپینگ	۱۶
۱-۵-۱ مدل‌های شبه استاتیک	۱۷
۱-۱-۵-۱ مدل شبه استاتیک متقارن محوری	۱۸
۲-۱-۵-۱ مدل شبه استاتیک بی بعد	۱۸
۶-۱ طراحی داخلی دمپ‌های MR	۲۳
۱-۶-۱ طراحی بر مبنای حداکثر شدن محدوده دینامیکی	۲۳
۷-۱ انتقال حرارت در دمپ‌های MRF	۲۳
۸-۱ مدل دینامیکی دمپر MRF	۲۴
۹-۱ مروری بر مطالعات انجام شده	۲۴
۱-۹-۱ مطالعات مربوط به مدلسازی عددی و آزمایشگاهی ، طراحی و بهینه سازی	۲۵
۱-۱-۹-۱ مطالعات طراحی	۲۵
۲-۱-۹-۱ مطالعات بهینه سازی	۲۸
۳-۱-۹-۱ مطالعات عددی	۳۱
۲-۹-۱ مطالعات انتقال حرارت و اثرات دمایی	۳۳
۳-۹-۱ مطالعات مربوط به بررسی محدوده فرکانسی	۳۶
۴-۹-۱ مطالعات مدل سازی تحلیلی	۳۶
۵-۹-۱ مطالعات مربوط به سیال MR	۳۷

۳۹.....	۶-۹-۱ نتیجه گیری.....
۴۰.....	۱۰-۱ تحقیق حاضر.....
۴۰.....	۱-۱۰-۱ مشخصات کلی.....
۴۲.....	۲-۱۰-۱ اهمیت، کاربرد و ضرورت تحقیق.....
۴۲.....	۳-۱۰-۱ جنبه های نوآوری.....
۴۳.....	۴-۱۰-۱ ساختار کلی.....
۴۷.....	فصل ۲ ساخت و آزمایش های پایداری، رئومتري و خصوصیات حرارتی سیال مگنتورئولوژیکال.....
۴۸.....	۱-۲ ساخت همزن مکانیکی و سیال مگنتورئولوژیکال.....
۴۹.....	۲-۲ آزمایش پایداری سیال مگنتورئولوژیکال و انتخاب سیال بهینه.....
۵۰.....	۳-۲ آزمایش رئومتري سیال مگنتورئولوژیکال.....
۵۰.....	۴-۲ آزمایش خصوصیات حرارتی سیال مگنتورئولوژیکال.....
۵۳.....	فصل ۳ مدل سازی شبه استاتیک، ناپایا و عددی دمپر مگنتورئولوژیکال دو مخزنه.....
۵۴.....	۱-۳ مدل سازی میدان جریان و فشار در دمپر مگنتورئولوژیکال دو مخزنه.....
۵۴.....	۱-۱-۳ تعریف مسئله.....
۵۴.....	۲-۱-۳ معادلات حاکم و معادلات ساختاری.....
۵۶.....	۳-۱-۳ مدل سازی عددی.....
۵۹.....	۴-۱-۳ مدل سازی تحلیلی.....
۵۹.....	۱-۴-۱-۳ فرضیات و معادلات حاکم.....
۶۲.....	۲-۴-۱-۳ حل تحلیلی شبه استاتیک.....
۶۴.....	۳-۴-۱-۳ مدل سازی تحلیلی ناپایا.....
۶۷.....	۲-۳ محاسبه نیروی دمپینگ.....
۶۹.....	فصل ۴ نتایج آزمایش های پایداری، رئومتري، حرارتی و مدلسازی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال ساخته شده.....
۷۰.....	۱-۴ نتایج آزمایش های پایداری (تست ته نشینی) و ساخت سیال مگنتورئولوژیکال بهینه.....
۷۱.....	۲-۴ نتایج آزمایش های رئومتري.....
۷۲.....	۳-۴ مدل سازی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال.....
۷۲.....	۱-۳-۴ مدلسازی ویسکوزیته.....
۷۶.....	۲-۳-۴ بررسی تابعیت دمایی ثوابت مدل.....
۹۱.....	۳-۳-۴ تاثیر میدان مغناطیسی بر پارامترهای مدل ارائه شده.....

۴-۳-۴	تأثیر پارامترهای مدل ارائه شده بر رفتار رئولوژی سیال مگنتورئولوژیکال.....	۹۴
۴-۴	تأثیر جنس سیال بر خصوصیات رئولوژی سیال مگنتورئولوژیکال.....	۹۵
۵-۴	نتیجه آزمایش های خصوصیات حرارتی.....	۹۶
فصل ۵	نتایج مدل سازی شبه استاتیک، ناپایا و عددی و بررسی پارامتریک دمپر مگنتورئولوژیکال.....	۹۹
۱-۵	مقایسه روشهای شبه استاتیک و ناپایای ارائه شده و بررسی پارامتریک.....	۱۰۰
۱-۱-۵	بررسی میدان جریان، ضخامت ناحیه پلاگ و اختلاف فاز فشار و سرعت سیال مگنتورئولوژیکال.....	۱۰۰
۲-۱-۵	بررسی اثر منحنی های ورودی با دامنه و فرکانسهای مختلف	۱۰۳
۳-۱-۵	بررسی اثر تنش تسلیم.....	۱۰۶
۴-۱-۵	بررسی اثر تغییر عرض شیار.....	۱۰۶
۲-۵	نتایج مدلسازی عددی و مقایسه نتایج مدلها با یکدیگر.....	۱۰۶
۱-۲-۵	بررسی استقلال حل از شبکه و گام زمانی و نوع مش بندی	۱۰۶
۲-۲-۵	بررسی نتایج حل عددی بدون اثرات دمایی	۱۱۱
۳-۲-۵	مقایسه نتایج مدل های عددی و تحلیلی	۱۱۵
۴-۲-۵	بررسی نتایج حل عددی با در نظر گرفتن اثرات دمایی	۱۱۷
۱-۴-۲-۵	مقایسه اثرات دمایی در دو حالت اشباع مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی.....	۱۱۸
۲-۴-۲-۵	بررسی اثر منحنی با فرکانس و دامنه های مختلف بر دما و عملکرد دمپر.....	۱۱۸
۳-۴-۲-۵	بررسی رژیم جریان داخل شیار.....	۱۲۸
۴-۴-۲-۵	بررسی اثر نوع بار.....	۱۳۲
۵-۴-۲-۵	بررسی کانتورهای توزیع تنش، دما و سرعت.....	۱۳۲
۳-۵	بررسی اثر جنس سیال.....	۱۳۷
فصل ۶	طراحی، ساخت و تستهای نیرویی دمپر مگنتورئولوژیکال.....	۱۴۱
۱-۶	طراحی	۱۴۲
۲-۶	ساخت	۱۴۳
۳-۶	تست های نیرویی دمپر	۱۴۴
۴-۶	نتایج تست های نیرویی	۱۴۴

نتیجه گیری.....	۱۵۳
ضمیمه ۱ نتایج تست EDX.....	۱۵۶
ضمیمه ۲ کد متلب حل شبه استاتیک.....	۱۶۵
ضمیمه ۳ کد متلب حل میدان سرعت شبه استاتیک.....	۱۷۷
ضمیمه ۴ کد متلب حل ناپایا.....	۱۸۰
ضمیمه ۵ کد متلب حل میدان جریان ناپایا.....	۲۱۱
ضمیمه ۶ نقشه ها.....	۲۱۹
فهرست منابع	۲۲۲

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: ترکیب‌های بکار گرفته‌شده برای ساخت ۵ نمونه سیال مگنتورئولوژیکال..... ۴۹
- جدول ۱-۳: ابعاد هندسی..... ۵۸
- جدول ۲-۳: شرایط مرزی حل عددی..... ۵۸
- جدول ۳-۳: شرایط مرزی حل تحلیلی:..... ۶۳
- جدول ۱-۴: ضریب تعیین برازش در میدان‌های مختلف..... ۷۷
- جدول ۱-۶: ابعاد هندسی دستگاه اینسترون (mm)in..... ۱۴۸

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: نمونه‌هایی از کاربردهای سیالات مگنتورئولوژیکال در صنعت الف) ترمز مگنتورئولوژیکال [۷] ب) کلاچ مگنتورئولوژیکال [۱۰] ج) مفصل پای مصنوعی مگنتورئولوژیکال [۱۵] د) دمپر مگنتورئولوژیکال [۱۴] ۳
- شکل ۱-۲: تصویر SME از پودر آهن کربونیل ۴
- شکل ۱-۳: زنجیره‌های موازی ذرات در حضور میدان مغناطیسی [۱۶] ۵
- شکل ۱-۴: منحنی تنش تسلیم ایجادشده در سیال MR بر حسب شدت میدان مغناطیسی [۱۷] ۶
- شکل ۱-۵: مدل‌های رئولوژیکال ویسکوپلاستیک [۳] مدل بینگهام و هرشل بالکی ۷
- شکل ۱-۶: مدل بینگهام پلاستیک [۲۶] ۸
- شکل ۱-۷: مود جریان [۲۹] ۹
- شکل ۱-۸: مود برشی [۲۹] ۹
- شکل ۱-۹: مود فشاری [۲۹] ۱۰
- شکل ۱-۱۰: نمونه‌ای از دمپر مگنتورئولوژیکال MRFD و اجزا تشکیل‌دهنده [۳۰] ۱۱
- شکل ۱-۱۱: دمپر تک مخزنه MR الف) فعال ب) دمپر غیرفعال [۳۲] ۱۳
- شکل ۱-۱۲: الف) دمپر MR دو مخزنه ب) دمپر غیرفعال دو مخزنه [۳۲] ۱۴
- شکل ۱-۱۳: دمپر MR دو سر متحرک [۳۲] ۱۴
- شکل ۱-۱۴: دمپرهای MR مود جریانی [۳۳] ۱۴
- شکل ۱-۱۵: دمپر مود برشی دورانی [۳۴] ۱۵
- شکل ۱-۱۶: دمپر MR مود فشاری [۳۵] ۱۶
- شکل ۱-۱۷: دمپرهای مود ترکیبی الف) جریانی-برشی [۳۶] ب) جریانی-برشی-فشاری [۳۷] ۱۷
- شکل ۱-۱۸: معادل‌سازی مجرای حلقوی با مجرای مستطیلی [۳۹] ۱۹
- شکل ۱-۱۹: پروفیل سرعت و نواحی جریان سیال MR بین صفحات موازی [۳۳] ۱۹

- شکل ۱-۲۰: نمونه‌ای از مودهای مختلف تحلیل شده الف) دمپر Valve mode [۳۹] ب) ترکیب مودهای فشاری-برشی-جریانی [۴۱] ج) مدل شیر با هر دو مسیر جریان شعاعی و حلقوی [۳۹] ۲۱
- شکل ۱-۲۱: توزیع نیرو در دمپر MRF ۲۲
- شکل ۱-۲۲: مدل مکانیکی بینگهام برای یک سیال قابل کنترل [۴۹] ۲۴
- شکل ۱-۲۳: تابعیت تنش تسلیم از جابجایی و میدان مغناطیسی در مود فشاری [۸۱] ۳۳
- شکل ۱-۲۴: نمای شماتیک از پیستون دمپر مورد مطالعه ۴۱
- شکل ۲-۱: تصویر اس ای ام از ساختار و اندازه ذرات سه نمونه پودر آهن کربونیل ۴۹
- شکل ۲-۲: فرزکاری میله همزن مکانیکی ب) حديدۀ کاری ج) میله و پره‌های پلاستیکی د) محفظه همزن مکانیکی ه) همزن مغناطیسی و) همزن مکانیکی ۵۱
- شکل ۲-۳: تست ته‌نشینی سیال مگنتورئولوژیکال ۵۲
- شکل ۲-۴: رئومتر مغناطیسی مدل ام سی آر ۳۰۲ مورد استفاده در آزمایش ب) دستگاه اندازه‌گیری خصوصیات حرارتی سیال ۵۲
- شکل ۳-۱: نمای شماتیک از دمپر دو مخزنه مگنتورئولوژیکال مود جریانی و پروفیل سرعت جریان در شیار پیستون ۵۵
- شکل ۳-۲: هندسه مربوط به پیستون و مدار هیدرولیکی و مغناطیسی ۵۸
- شکل ۳-۳: جریان داخل شیار به صورت جریان دوبعدی بین دو صفحه موازی ۵۹
- شکل ۳-۴: تعادل نیرویی در ناحیه پلاگ ۶۷
- شکل ۴-۱: نتایج تست‌های ته‌نشینی (پایداری) سیال‌های ساخته شده الف) مقایسه درصد ته‌نشینی سیال‌ها با زمان ب) تأثیر درصد پودر آهن کربونیل ϕ_{fe} بر میزان ته‌نشینی و پایداری سیال مگنتورئولوژیکال ج) تأثیر درصد ماده نگه‌دارنده ϕ_d بر میزان ته‌نشینی و پایداری سیال مگنتورئولوژیکال ۷۰
- شکل ۴-۲: منحنی‌های تنش-نرخ برش الف) 25 C ب) 40 C ج) 55 C د) 70 C لزجت نرخ برش ه) 25 C و) 70 C ۷۳
- شکل ۴-۳: مقایسه مدل بینگهام پلاستیک و مدل غیر نیوتونی جدید در جریان‌های الف) $I=0A$ ب) $I=0.5A$ ج) $I=1A$ د) $I=1.5A$ و در دماهای ه) $T=25C$ و) $T=40C$ ز) $T=55C$ ح) $T=70C$ ۷۵

شکل ۴-۴: تغییرات میدان بر حسب جریان.....	۷۷
شکل ۴-۵: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $I=0A$ در دماهای $T=25C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=70C$	۷۸
شکل ۴-۶: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $I=0.25A$ در دماهای $T=25C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=70C$	۷۹
شکل ۴-۷: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $I=0.5A$ در دماهای $T=25C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=70C$	۸۰
شکل ۴-۸: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $I=0.75A$ در دماهای $T=25C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=70C$	۸۱
شکل ۴-۹: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $I=1A$ در دماهای $T=25C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=70C$	۸۲
شکل ۴-۱۰: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $I=1.25A$ در دماهای $T=25C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=70C$	۸۳
شکل ۴-۱۱: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $I=1.5A$ در دماهای $T=25C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=70C$	۸۴
شکل ۴-۱۲: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $I=1.75A$ در دماهای $T=25C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=70C$	۸۵
شکل ۴-۱۳: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $I=2A$ در دماهای $T=25C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=70C$	۸۶
شکل ۴-۱۴: بررسی تابعیت دمایی پارامترهای مدل غیرنیوتونی ارائه شده در جریان های $I=0A$, $I=0.25A$	۸۷
شکل ۴-۱۵: بررسی تابعیت دمایی پارامترهای مدل غیرنیوتونی ارائه شده در جریان های $I=0.5A$, $I=0.75A$	۸۸
شکل ۴-۱۶: بررسی تابعیت دمایی پارامترهای مدل غیرنیوتونی ارائه شده در جریان های $I=1A$, $I=1.25A$	۸۹

- شکل ۴-۱۷: بررسی تابعیت دمایی پارامترهای مدل غیرنیوتونی ارائه شده در جریان های $I=1.5A$ $I=1.75A$ ۹۰
- شکل ۴-۱۸: بررسی تابعیت دمایی پارامترهای مدل غیرنیوتونی ارائه شده در جریان $I=2A$ ۹۱
- شکل ۴-۱۹: تابعیت میدانی پارامترهای مربوط به تابع دمایی تنش تسلیم ۹۲
- شکل ۴-۲۰: تابعیت میدانی پارامترهای مربوط به تابع دمایی پارامتر K ۹۲
- شکل ۴-۲۱: تغییرات تنش تسلیم و پارامترهای مربوط به ناحیه پس از تسلیم در مدل ارائه شده با میدان مغناطیسی ۹۳
- شکل ۴-۲۲: تغییرات تنش تسلیم و لزجت پلاستیک در مدل بینگهام پلاستیک ۹۴
- شکل ۴-۲۳: تاثیر پارامترهای مدل ارائه شده بر رفتار رئولوژی سیال مگنتورئولوژیکال ۹۷
- شکل ۴-۲۴: الف) مقایسه نتایج تست های رئومتری سیال بهینه مگنتورئولوژیکال MRF5 با روغن مگنتورئولوژیکال لرد سی جی ۱۴۰ در شرایط اشباع ب) بدون میدان مغناطیسی ج) تنش نرخ برش در میدان $181kA/m$ و $361kA/m$ د) لزجت نرخ برش در میدان $181kA/m$ و $361kA/m$ ه) اثر ماده نگهدارنده ۹۷
- شکل ۴-۲۵: چگونگی تغییرات ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه سیال MRF5 با دما ۹۸
- شکل ۵-۱: مقایسه نتایج کار حاضر با مطالعات پیشین [۹۷] ۱۰۰
- شکل ۵-۲: الف) تغییرات الف) میدان جریان و ب) اینرسی با فرکانس در نواحی تحت میدان مغناطیسی ۱۰۱
- شکل ۵-۳: تغییرات ضخامت ناحیه پلاگ با زمان و فرکانس ۱۰۲
- شکل ۵-۴: تغییرات اختلاف فاز بین اختلاف فشار و سرعت جریان با زمان ۱۰۲
- شکل ۵-۵: دیاگرام نیرو-جابجایی در فرکانس های الف) 0.6 هرتز ب) 6 هرتز ج) 20 هرتز د) 30 هرتز ه) 40 هرتز و) 50 هرتز ۱۰۴
- شکل ۵-۶: دیاگرام نیرو-جابجایی در فرکانس های الف) 0.6 هرتز ب) 6 هرتز ج) 20 هرتز د) 30 هرتز ه) 40 هرتز و) 50 هرتز ۱۰۵
- شکل ۵-۷: تغییرات اینرسی در طول کورس ۱۰۷
- شکل ۵-۸: دیاگرام های نیرو و جابجایی و نیرو-سرعت در دامنه های الف) $A=0.025m$ ب) $A=0.0125m$ ۱۰۷
- شکل ۵-۹: دیاگرام نیرو و جابجایی و نیرو-سرعت در تنش های تسلیم الف) 15 کیلو پاسکال ب) 30 کیلو پاسکال ج) 50 کیلو پاسکال ۱۰۸
- شکل ۵-۱۰: دیاگرام نیرو و جابجایی و نیرو-سرعت در عرض شیار الف) 0.075 متر ب) 0.15 متر ۱۰۹

شکل ۵-۱۱: الف) استقلال حل عددی از شبکه برای دمپر ب) استقلال از گام زمانی ج) و د) مش در ناحیه تحت میدان و شیار پیستون در شرایط عملکرد $f=0.5\text{Hz}$ $a=0.025\text{m}$ ۱۱۰

شکل ۵-۱۲: الف) چگونگی اثر میدان مغناطیسی بر پروفیل سرعت جریان سیال مگنتورئولوژیکال شکل ۷-۱۲- ب) چگونگی تغییرات تنش برشی روی دیواره با افزایش میدان مغناطیسی ۱۱۱

شکل ۵-۱۳: تأثیر میدان مغناطیسی بر توزیع سرعت جریان سیال بهینه ساخته شده مگنتورئولوژیکال MRF5 در دمپر مگنتورئولوژیکال، الف) بدون میدان مغناطیسی ب) تحت میدان مغناطیسی و توزیع فشار ج) بدون میدان مغناطیسی د) تحت میدان مغناطیسی با استفاده از مدل سازی عددی ۱۱۳

شکل ۵-۱۴: تأثیر میدان مغناطیسی بر الف) نیروی ناشی از تنش برشی روی دیواره و ب) نیروی دمپینگ کل ج) اثر کاهش عرض شیار بر اختلاف فشار و تنش برشی روی دیواره.. ه) اثر میدان مغناطیسی بر د) انرژی دمپ شده و و) ضریب میرایی معادل ۱۱۴

شکل ۵-۱۵: مقایسه الف) پروفیل سرعت به دست آمده از هر یک از روش های عددی، تحلیلی شبه استاتیک و ناپایا، در زمان $T/8$ ب) لوپ نیرو-جابجایی به دست آمده از هر یک از روش های عددی، تحلیلی شبه استاتیک ۱۱۶

شکل ۵-۱۶: مقایسه نمودارهای نیرو- سرعت دمپر مگنتورئولوژیکال، به دست آمده از مدل بینگهام پلاستیک و مدل غیر نیوتونی اصلاح شده جدید در دو فرکانس الف) $0/5\text{ Hz}$ ب) $0/25\text{ Hz}$ ۱۱۶

شکل ۵-۱۷: مقایسه نتایج پژوهش حاضر و فرمول متداول دمپر مود جریانی در حالت بدون میدان و تحت میدان مغناطیسی ۱۱۷

شکل ۵-۱۸: مقادیر مربوط به الف) سرعت سیال ب) تنش برشی روی دیواره ج) نیروی ناشی از تنش برشی روی دیواره د) نیروی دمپینگ ه) دمای سیال ه) شار حرارتی روی دیواره در حالت بدون میدان مغناطیسی ۱۱۹

شکل ۵-۱۹: مقادیر مربوط به الف) سرعت سیال ب) تنش برشی روی دیواره ج) نیروی ناشی از تنش برشی روی دیواره د) نیروی دمپینگ ه) دمای سیال ه) شار حرارتی روی دیواره در حالت اشباع مغناطیسی ۱۲۰

شکل ۵-۲۰: اثرات فرکانس بر الف) پروفیل سرعت ب) دما ج) نیروی دمپینگ کل با اثرات حرارتی د) نیروی دمپینگ کل بدون اثرات حرارتی ه) ضریب میرایی معادل و) انرژی دمپ شده ۱۲۱

شکل ۵-۲۱: اثرات فرکانس بر الف) نیروی دمپینگ ب) دمای عرض شیار ج) سرعت عرض شیار ه) ضریب میرایی معادل و) انرژی دمپ شده در شرایط اشباع ۱۲۳

شکل ۵-۲۲: اثرات دامنه نوسان بر الف) نیروی دمپینگ ب) دمای عرض شیار ج) سرعت عرض شیار ه) ضریب میرایی معادل و) انرژی دمپ شده در شرایط اشباع ۱۲۴

- شکل ۵-۲۳: اثرات دامنه نوسان و دما بر الف) نیروی دمپینگ ب) دمای عرض شیار ج) سرعت عرض شیار ه) ضریب میرایی معادل و) انرژی دمپ شده در شرایط اشباع..... ۱۲۶
- شکل ۵-۲۴: تغییرات دمای متوسط ناحیه تحت میدان مغناطیسی با زمان، تحت بارهای نوسانی در الف) فرکانس و ب) دامنه‌های مختلف ج) اثر افزایش دامنه د) اثر افزایش فرکانس..... ۱۲۷
- شکل ۵-۲۵: توزیع تنش تسلیم در عرض شیار در فرکانس، دامنه و زمان‌های مختلف..... ۱۲۹
- شکل ۵-۲۶: توزیع تنش برشی در دیواره شیار پیستون در فرکانس، دامنه و زمان‌های مختلف..... ۱۳۰
- شکل ۷-۲۷: توزیع شار حرارتی در دیواره شیار پیستون در فرکانس، دامنه و زمان‌های مختلف..... ۱۳۱
- شکل ۷-۲۸: بررسی رینولدز جریان در الف) دامنه و ب) فرکانس‌های مورد بررسی و مقایسه ج) نمودارهای نیرو زمان نیرو-جابجایی و) نیرو-سرعت بارهای سینوسی و کسینوس..... ۱۳۳
- شکل ۵-۲۹: توزیع تنش در شیار پیستون در ناحیه تحت میدان مغناطیسی الف) $H=0\text{KA/m}$ ب) $H=91.01\text{KA/m}$ ج) $H=181.77\text{KA/m}$ د) $H=272.099\text{KA/m}$ ه) 361.98kA/m و) 361.98kA/m با در نظر گرفتن اثرات حرارتی..... ۱۳۴
- شکل ۵-۳۰: توزیع دما در شیار و بدنه پیستون در ناحیه تحت میدان مغناطیسی الف) $t=2\text{s}$ ب) $t=4\text{s}$ ج) $t=6\text{s}$ د) $t=8\text{s}$ ه) $t=10\text{s}$ ۱۳۵
- شکل ۵-۳۱: توزیع دما در طول شیار و بدنه پیستون در ناحیه تحت میدان مغناطیسی الف) $t=2\text{s}$ ب) $t=4\text{s}$ ج) $t=6\text{s}$ د) $t=8\text{s}$ ه) $t=10\text{s}$ و) توزیع سرعت در $t=6\text{s}$ ۱۳۶
- شکل ۵-۳۲: اثر جنس سیال بر لوب‌های نیرو-جابجایی و نیرو-سرعت..... ۱۳۸
- شکل ۵-۳۳: اثر جنس سیال بر انرژی دمپینگ و ضریب میرایی..... ۱۳۹
- شکل ۶-۱: تغییرات محدوده دینامیکی با عرض شیار..... ۱۴۳
- شکل ۶-۲: مراحل ساخت الف) فرزکاری ب) تراشکاری ج) قطعات ساخته شده پیستون د) سیم‌پیچی..... ۱۴۵
- شکل ۶-۳: الف) نمای انفجاری از دمپر MR ب) پیستون دمپر MR ج) دمپر MR مونتاژ شده..... ۱۴۶
- شکل ۶-۴: دستگاه اینسترون..... ۱۴۷
- شکل ۶-۵: نمای شماتیک و مشخصات هندسی دستگاه اینسترون..... ۱۴۷
- شکل ۶-۶: منحنی نیرو-جابجایی آزمایشگاهی برای الف) $f=0.5\text{Hz}$ ب) $f=0.15\text{Hz}$ ۱۵۰
- شکل ۶-۷: اثر فرکانس بر منحنی نیرو-جابجایی الف) آزمایشگاهی ب) عددی..... ۱۵۱
- شکل ۶-۸: مقایسه نتایج آزمایشگاهی با کار حاضر الف) $f=0.5\text{Hz}$ ب) $f=0.15\text{Hz}$ ۱۵۲

فهرست علائم

دامنه نوسان، مساحت	$A(m, m^2)$
شتاب	$a(m/s^2)$
سبت تقویت هیدرولیکی	$\bar{A}$
عدد بینگهام	Bi
ثابت دمپینگ و ضریب معادله تنش بر حسب شدت میدان مغناطیسی	C
نیروی دمپینگ غیرفعال ناشی از لزجت	$F\eta(N)$
نیرو	$F(N)$
نیروی دمپینگ ناشی از تنش تسلیم	$F_u(N)$
فرکانس	$f(Hz)$
عرض شکاف	$h(m)$
شدت میدان مغناطیسی	$H(kA/m)$
جریان الکتریکی	$I(A)$
ضریب سختی فنر و هدایت حرارتی	$k(N/m), (W/m.K)$
کلوین و پارامتر مدل غیرنیوتونی	K
جرم	$m(kg)$
پارامتر مدل غیر نیوتونی	n
تابع هدف	OBJ
فشار	$p(Pa)$
دبی، شار حرارتی	$Q(W/m^2, m^3/s)$
شعاع	$r(m)$
شعاع و مقاومت الکتریکی	R
عدد بی بعد رینولدز	Re
دما	$T(K)$
زمان	$t(s)$
سرعت	$u(m/s)$
سرعت	$U(m/s)$
سرعت دیواره	$U_w(m/s)$
عرض شیار	$W(m)$
جابجایی پیستون	$X(m)$
مکان افقی	$x(m)$

y(m)	مکان عمودی
علائم یونانی	
λ	نسبت فشار
$\dot{\gamma}(1/s)$	نرخ برشی
$\bar{\delta}$	ضخامت پلاگ بی بعد
$\delta(m)$	ضخامت پلاگ
Δ	تغییرات
ϕ	نسبت هندسی و اختلاف فاز
$\theta(Rad)$	زاویه
$\eta(Pa.s)$	لزجت دینامیکی
$\mu pPa.s)$	لزجت پلاستیک
$\mu(Pa.s)$	لزجت دینامیکی
$\nu(m^2/s)$	لزجت سینماتیکی
$\rho(kg/m^3)$	چگالی
Γ	تنش تسلیم بی بعد
$\tau(Pa)$	تنش برشی
$\omega(Rad/s)$	فرکانس دایره‌ای
زیرنویس‌ها	
app	ظاهری
qe	معادل
p	پیستون، پلاستیک
uc	غیرقابل کنترل
y	تسلیم
.	تسلیم

فصل اول

مقدمه

۱-۱ فناوری سیال‌های هوشمند و کاربردهای آن

فناوری سیال‌های هوشمند در دهه‌های اخیر به پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای دست یافته است. سیالات هوشمند به خانواده‌ای از سیالات تعلق دارند که خواص آن‌ها، به شدت به میدان مغناطیسی و یا الکتریکی وابسته است. این خانواده از سیالات، شامل سیالات فرو، سیالات الکترورنولوژیکال (ER) و سیالات مگنتورنولوژیکال (MR)^۱ می‌شود [۱]. سیالات فرو سوسپانسیون‌های کلئیدی با ذرات مغناطیسی کوچک‌تر از ۱۰ nm اغلب ساخته شده از (مگنتایت) [۲] هستند که در یک سیال حامل مناسب مانند آب، هیدروکربن‌ها، اترها و... شناور می‌باشند. در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی، لزجت این سیالات افزایش پیدا می‌کند، لزجت با شدت موضعی میدان مغناطیسی متناسب است. سیالات الکترورنولوژیکال و مگنتورنولوژیکال، سوسپانسیون‌های غیر کلئیدی با ذراتی در مقیاس میکرونی کوچک (۵-۱۰ μm) هستند که برخلاف سیالات فرو، معمولاً از نیروهای برونی در آن‌ها صرف نظر می‌شود [۳]. کشف این سیالات به دهه‌ی ۱۹۴۰ برمی‌گردد. سیالات ER و MR به ترتیب به میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با تغییر در رفتار رنولوژیکی پاسخ می‌دهند.

سیال مگنتورنولوژیکال نوعی از مواد هوشمند است که تحت تأثیر میدان مغناطیسی خارجی، تغییر لزجت می‌دهد [۴]. به عبارت دیگر این سیال در اثر میدان مغناطیسی خارجی به حالت نیمه جامد یا ویسکوالاستیک تبدیل می‌شود. ساختار آن متشکل از ذرات فرو مغناطیسی معلق در یک سیال پایه است. ذرات عموماً آلیاژهای آهن – کبالت در مقیاس میکرومتر و سیال پایه عموماً از روغن‌های هیدروکربنی یا سیلیکونی تشکیل شده است [۵]. سیال مگنتورنولوژیکال در عدم حضور میدان مغناطیسی رفتاری مشابه با سیال پایه دارد، اما به محض قرار گرفتن در معرض میدان، ذرات مغناطیسی شروع به ایجاد ساختار زنجیره‌ای کرده و در نتیجه خواص گرانروی سیال تغییر می‌کند. شکل ۱-۱ نحوه تشکیل زنجیره ذرات مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی نشان می‌دهد.

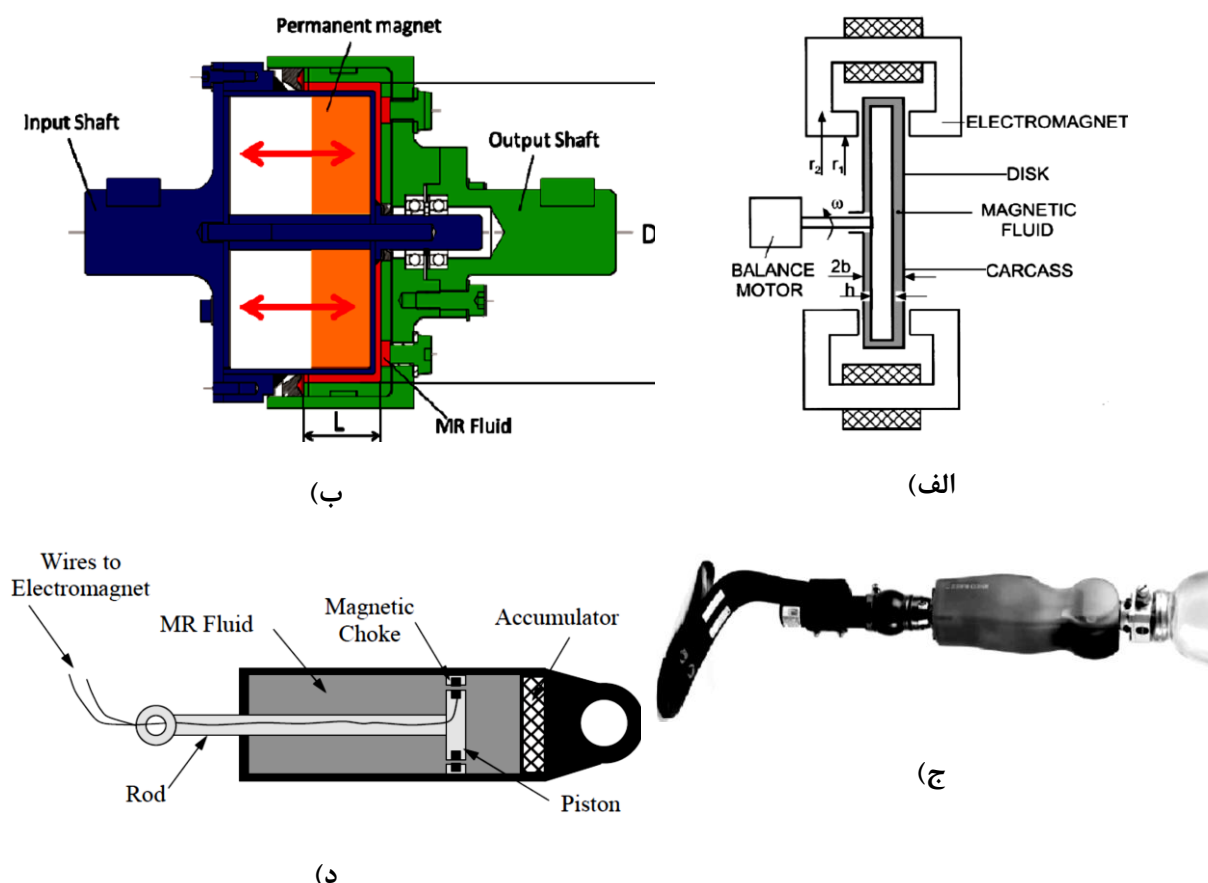
سیالات مگنتورنولوژیکال بر اثر قرار گرفتن در میدان مغناطیسی دارای تنش تسلیم متغیر می‌شوند و تغییرات

¹ Electero rheological

² Magneto rheological

خصوصیات رئولوژیکال این سیالات در کمتر از چند میلی ثانیه اتفاق می افتد [۶]. این خصوصیت آن‌ها را برای بسیاری از کاربردهای صنعتی مناسب می سازد. از این قابلیت به طور روزافزون در کاربردهای مهندسی، سامانه های ترمز ضد قفل [۷-۹]، کلاچ مغناطیسی [۱۰-۱۲] و دمپینگ ارتعاشات [۱۳ و ۱۴] در دمپرها در وسایل نقلیه، پل ها و ماشین های لباسشویی و همچنین در کاربردهای مختلف پزشکی استفاده می شود [۱۵].

دمپرهای MR مصرف انرژی نسبتاً کمی دارند و به صورت نیمه فعال قابل کنترل می باشند [۱۴]. پاسخ سریع، دوام، محدوده دینامیکی وسیع و دمپینگ متغیر پیوسته از دیگر خصوصیات مطلوب این نوع دمپرها می باشد. خصوصیات بالقوه دمپرهای MR شرکت های سازنده کمک فنرها را بر آن داشت که استفاده از این نوع دمپر را کاربردهای مختلف مدنظر قرار دهند. نمونه هایی از کاربردهای سیالات مگنتورئولوژیکال در صنعت در شکل ۱- نشان داده شده است.



شکل ۱- نمونه هایی از کاربردهای سیالات مگنتورئولوژیکال در صنعت الف) ترمز مگنتورئولوژیکال [۷] ب) کلاچ مگنتورئولوژیکال [۱۰] ج) مفصل پای مصنوعی مگنتورئولوژیکال [۱۵] د) دمپر مگنتورئولوژیکال [۱۴].

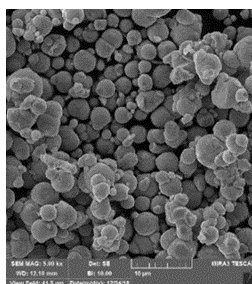
۱-۲ مبانی سیال های مگنتورئولوژیکال (MRF)

همان طور که در پیش تر اشاره شد، سیالات MR سوسپانسیون هایی هستند که تحت میدان مغناطیسی خارجی، به صورت برگشت پذیر، سریع و تنظیم پذیر از حالت جریان آزاد به حالت سیال شبه جامد تبدیل می شوند. در این قسمت به بیان ساختار سیال MR، مدل های رئولوژیکال مربوطه و همچنین مودهای عملکرد و کاربردهای سیال MR پرداخته می شود.

۱-۲-۱ ساختار سیال مگنتورئولوژیکال (MRF)

ساختار سیال MR متشکل از ذرات فرو مغناطیسی به عنوان فاز پراکنده فعال مغناطیسی معلق در یک سیال پایه حامل غیر مغناطیسی و عامل پایدارکننده است.

فاز پراکنده فعال مغناطیسی مهم ترین عامل در قدرت سیالات MR می باشد. ذرات مغناطیسی عموماً آلیاژهای آهن-کبالت و پودر آهن کربونیل در مقیاس میکرومتر تشکیل شده است [۵]. شکل ۱-۲ ساختار ذرات آهن را که توسط SEM تهیه شده نشان می دهد. ذرات تقریباً کروی و با میانگین اندازه ۴-۵ میکرومتر می باشند. سیال حامل معمولاً کروسین، روغن سبک، روغن معدنی و یا روغن های هیدروکربنی یا و آب برخی از سیالات حاملی هستند که در ساخت سیالات MR مورد استفاده قرار می گیرند:



شکل ۱-۲: تصویر^۱ SME از پودر آهن کربونیل

عامل پایدارکننده، فعال کننده های سطح می باشند که مکانیزم پایدارکنندگی آنها الکتروستاتیک می باشد.

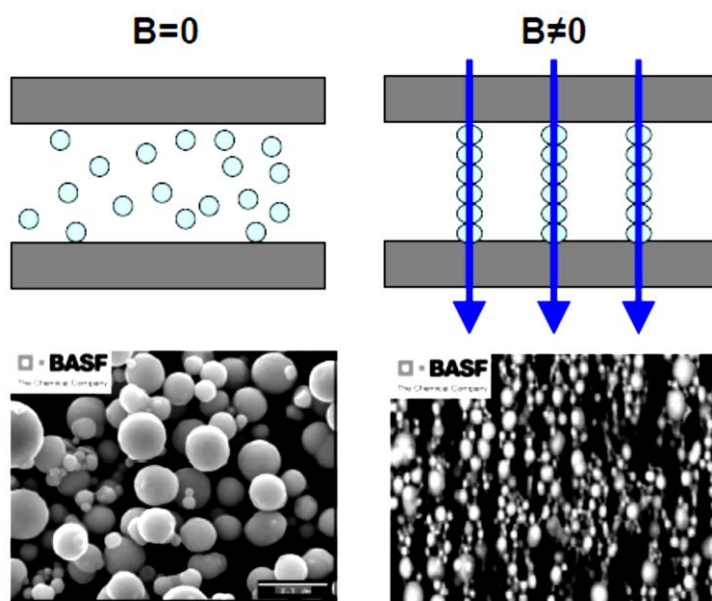
پرکاربردترین فعال کننده های سطح مورد استفاده برای پراکنش ذرات عبارتند از:

^۱ Scanning Electron Microscopy

- مشتقات اسیدهای چرب
- استرهای اسید فسفریک
- اسید پلی آکرلیک
- الکل استیلن

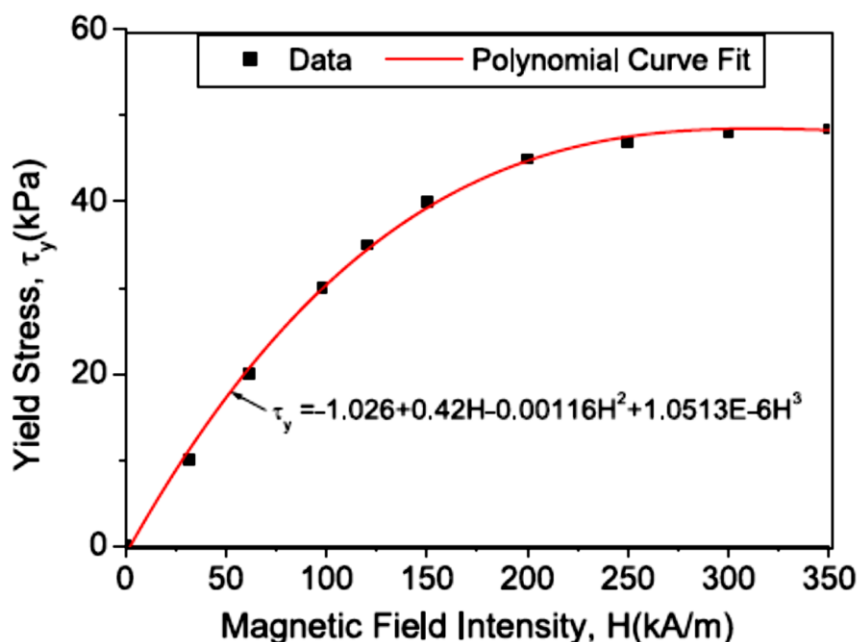
۲-۲-۱ مکانیزم عملکرد سیال مگنتورئولوژیکال (MRF)

معمولاً سیالات مگنتورئولوژیکال مایع‌هایی شبیه روغن موتور می‌باشند. با این وجود در حضور میدان مغناطیسی خارجی، همان‌طور که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، ذرات معلق به صورت دوقطبی‌هایی در راستای میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرند که باعث می‌شود ذرات، زنجیره‌ای موازی با میدان مغناطیسی شکل دهند.



شکل ۳-۱: زنجیره‌های موازی ذرات در حضور میدان مغناطیسی [۱۶]

این پدیده باعث می‌شود سوسپانسیون به حالت شبه جامد تبدیل و حرکت سیال محدود شود؛ به عبارت دیگر سیال دارای تنش تسلیم می‌شود و در نتیجه لزجت ظاهری آن افزایش می‌یابد. مفهوم لزجت ظاهری در بخش مدل‌های رئولوژیکال بیان می‌شود. تنش تسلیم ایجاد شده به صورت تابعی از شدت میدان مغناطیسی استفاده شده (H_{mr})، در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. تنش تسلیم می‌تواند با بکار بردن روش حداقل مربعات سیال MR تقریب زده شود [۱۷].



شکل ۱-۴: منحنی تنش تسلیم ایجادشده در سیال (MRF132-LD) بر حسب شدت میدان مغناطیسی [۱۷]

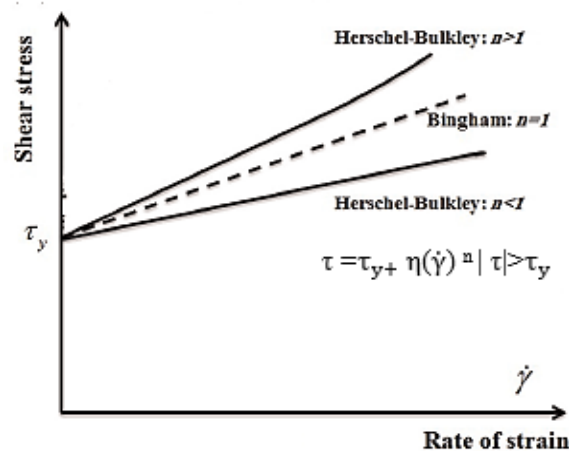
۳-۲-۱ مدل‌های رئولوژیکال سیال MR

یکی از اهداف اصلی مطالعه سیالات MR تعیین مدل رئولوژیکال مناسب برای محاسبه تنش برشی ایجادشده در سیال MR می‌باشد. برای استخراج مدل رئولوژیکال و ثابت‌های مربوط به آن در مودهای عملکرد مختلف سوسپانسیون‌های MR، مطالعات آزمایشگاهی زیادی مورد نیاز است. در همین راستا مطالعات گسترده‌ای برای فهم خصوصیات رئولوژیکال سوسپانسیون‌های MR انجام شده است [۱۸-۲۳]. پارامترهای مدل‌های رئولوژیکال، بخصوص شدت میدان مغناطیسی تابع شرایط عملیاتی می‌باشند. همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد، با بکار بردن میدان مغناطیسی، سیال‌های MR در برابر جریان مقاومت می‌کنند و بنابراین تنش تسلیم و لزجت ظاهری با افزایش شدت میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. در نتیجه با توجه به رفتار تسلیم گونه سیال‌های MR، مدل‌های غیرنیوتونی به‌طور متداول برای تشریح رفتار سیال‌های مگنتورئولوژیکال مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های رئولوژیکال بینگهام پلاستیک^۱ [۲۴] و هرشل بالکلی^۲ [۲۴] به‌طور متداول برای که سیالات MRF استفاده می‌شوند. در شکل ۱-۵ نمودارهای مربوط به مدل‌های ویسکوپلاستیک ارائه شده نشان

^۱. Bingham plastic

^۲. Herschel-Bulkley

داده شده است. در بخش بعد هر کدام از این مدل‌ها به‌طور مجزا معرفی می‌شوند.



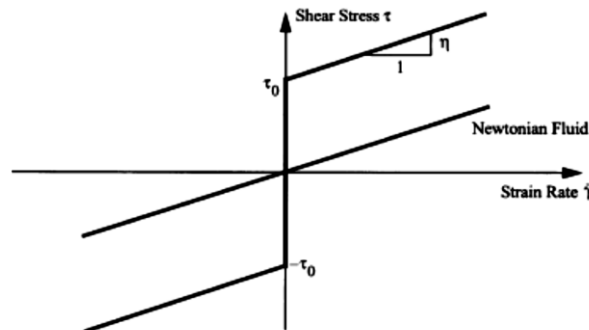
شکل ۱-۵ مدل‌های رئولوژیکال ویسکوپلاستیک [۳] مدل بینگهام و هرشل بالکی

۱-۳-۲-۱ مدل بینگهام پلاستیک

یک ماده پلاستیک، به ماده‌ای می‌گویند که در برابر سطح مشخصی از تنش تغییر شکل صفر یا ناچیزی از خودش نشان می‌دهد. در تنشی بالاتر از آن سطح تنش مشخص که تنش تسلیم نام دارد، ماده به سهولت جریان پیدا می‌کند. حالت پلاستیک برای بسیاری از مواد، متداول است. بسیاری از فلزات در کرنشی کمتر از ۱٪ به تسلیم می‌رسند.

محلول‌های غلیظ از ذرات جامد در سیالات نیوتونی، سیالهای غیرنیوتونی می‌باشند که وقتی تحت تنش برشی قرار می‌گیرند اغلب یک تنش تسلیم از خود نشان می‌دهند و سپس در ناحیه پس از تسلیم رفتاری نیوتونی دارند. این مواد، بینگهام پلاستیک (پس از بینگهام که اولین بار در سال ۱۹۱۶ آن را مطرح کرد) نامیده می‌شوند. مدل بینگهام پلاستیک ساده نشان داده شده در شکل‌های ۱-۵ و ۱-۶، در تشریح مشخصات اصلی وابسته به میدان مغناطیسی سیال مؤثر است [۲۵]. در این شکل، τ_0 تنش تسلیم ایجاد شده با میدان مغناطیسی به کار برده شده، $\dot{\gamma}$ نرخ برش و η لزجت پلاستیک پس از تسلیم مستقل از میدان مغناطیسی است که به عنوان شیب اندازه‌گیری شده تنش برشی نسبت به کرنش برشی تعریف می‌شود. با افزایش میدان

مغناطیسی مقدار تنش تسلیم افزایش می‌یابد تا اینکه در حالت اشباع مغناطیسی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. همچنین لزجت ظاهری η_{app} در ناحیه پس از تسلیم، لز تقسیم تنش بر نرخ برش بدست می‌آید.



شکل ۱-۶: مدل بینگهام پلاستیک [۲۶]

۱-۲-۳-۲ مدل هرشل-بالکلی

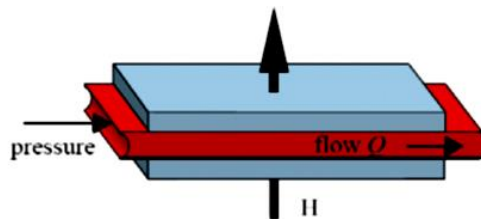
مدل هرشل بالکلی [۲۷] یک رابطه غیرخطی است که در شکل ۱-۵ نشان داده شده است و در آن τ_0 تنش تسلیم ایجادشده با میدان مغناطیسی به کاربرده شده، K شاخص تغییر شکل پذیری یا لزجت پلاستیک و n شاخص رفتار سیال می‌باشد که $n=1$ برای سیال بینگهام، $n<1$ برای شرایط رقیق شونده^۱ در ناحیه پس از تسلیم و $n>1$ برای شرایط غلیظ شونده^۲ در ناحیه پس از تسلیم می‌باشد. از آنجایی که سیالات MR و ER رفتار غلیظ شونده نشان می‌دهند که در شکل ۱-۵ نشان داده شده است، مدل ویسکوپلاستیک هرشل-بالکلی می‌تواند برای تطبیق این اثر به کاربرده شود؛ بنابراین جایگزین کردن لزجت ثابت با مدل قانون توانی وابسته به نرخ برش بسیار مفید است. رفتار رقیق شونده و غلیظ شونده مربوط به حالت‌هایی است که با افزایش تنش و نرخ برش لزجت به ترتیب کاهش و افزایش یابد.

۱-۳-۱ مودهای عملکرد وسایل استفاده‌کننده از سیال MR

وسایلی که از سیال MR استفاده می‌کنند مانند دمپرها، کلاچ‌ها، ماشین‌های چاپ، سوپاپ‌های هیدرولیکی و... دارای آینده نویدبخشی هستند. ترمزها، کلاچ‌ها، دمپرها و کاربردهای پزشکی از جمله وسایلی که از سیالات

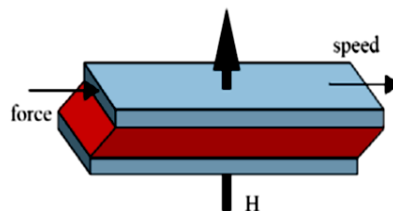
¹. shear thinning
². shear thickening

۱-مود جریان^۱: این مود به طور گسترده مورد استفاده است که در آن لزجت سیال جاری بین دو صفحه ثابت با تغییر میدان مغناطیسی، تغییر می کند. در این مود، ناحیه فعال به عنوان نواحی ای تعریف می شوند که در معرض خطوط میدان مغناطیسی قرار گرفته اند. دمپرها، سوپاپ های خودتنظیم و جذب کننده های شوک^۲ نمونه هایی از وسایلی هستند که در این مود عمل می کنند [۲۸].



شکل ۱-۷: مود جریان [۲۹]

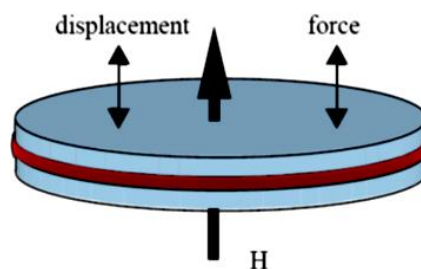
۲-مود برشی^۳: در این مود سیال MR، بین صفحات لغزان نسبت به هم قرار دارد و در معرض میدان مغناطیسی که جهتش عمود بر جهت صفحات برشی است، می باشد. ترمزها، کلاچ ها و دمپرها نمونه هایی از وسایلی هستند که در مود برشی عمل می کنند [۲۸].



شکل ۱-۸: مود برشی [۲۹]

۳-مود فشاری^۴: در این مود فاصله بین صفحات موازی در حین عملکرد وسیله تغییر می کند. در این مود نیروی نسبتاً زیادی به دست می آید. این مود به طور خاص برای دمپرها با دامنه کم و نیروهای دینامیکی بالا مناسب است [۲۸].

1. flow mode (valve mode)
2. shock absorber
3. shear mode (clutch mode)
4. squeeze mode (compression mode)



شکل ۱-۹: مود فشاری [۲۹]

۴-۱ دمپره‌های مگنتورئولوژیکال (MRFD)

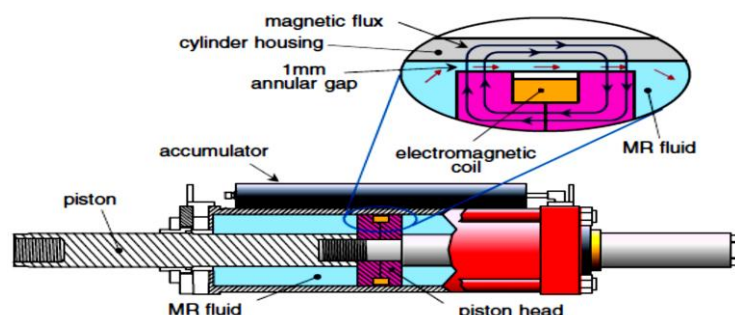
هدف اصلی استفاده از دمپر در هر کاربرد دینامیکی، پراکنش انرژی است. در غیر این صورت انرژی اضافی در داخل سیستم باقی می‌ماند و منجر به خرابی زودرس تجهیزات می‌شود. دمپر انرژی اضافی را پراکنده و اصولاً تبدیل به حرارت می‌کند.

کاربرد سیالات مگنتورئولوژیکال در مهندسی عمران، مهندسی ایمنی، حمل‌ونقل به‌سرعت با توسعه وسایل مگنتورئولوژیکال و بخصوص دمپره‌های MRF در حال رشد می‌باشند. دمپره‌های MRF به دلیل خصوصیات دینامیکی عالی که در ادامه برشمرده می‌شود می‌تواند توانایی برجسته‌ای در کنترل نیمه فعال ارتعاشات از خود نشان دهد. برخی از خصوصیات برجسته دمپره‌های MRF عبارت‌اند از ۱- پاسخ سریع، ۲- ظرفیت نیروی بزرگ، ۳- مصرف انرژی پایین و ۴- ارتباط ساده بین ورودی الکتریکی و خروجی مکانیکی. به دلیل قابلیت کنترل پیوسته بین حالت‌های روشن و خاموش یا به عبارتی فعال و غیرفعال، طرز کار آن روزبه‌روز در سیستم‌های تعلیق وسایل نقلیه و سیستم‌های زیرساختی عمرانی در مقابل زلزله و نیروی باد در حال افزایش است.

یک دمپر MR متداول همان‌طور که در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است، از یک سیلندر که به دو بخش پر از سیال MR که با یک سر پیستون جدا شده تشکیل شده است. روی سر پیستون یک مدار مغناطیسی قرار دارد؛ و هنگامی که میل پیستون حرکت می‌کند، سیال درحالی که در معرض میدان مغناطیسی ایجاد شده است، در فاصله شعاعی بین سیلندر و پیستون و یا سوراخ داخل پیستون جریان می‌یابد. همچنین یک محفظه گاز

در قسمت پایین یا کناری سیلندر و یا یک سیلندر چسبیده به بدنه اصلی برای جبران حجم میل پیستون که در قسمت بالایی سیلندر است قرار دارد.

نیروی دمپینگ دمپرها MR، می تواند با تغییر لزجت و به ویژه تنش تسلیم سیال مگنتورئولوژیکال داخل آن کنترل شود. در این دمپرها، سیال وقتی در معرض میدان مغناطیسی قرار می گیرد می تواند در حدود چند میلی ثانیه از حالت سیال غلیظ به سیال شبه جامد تغییر کند. سیال می تواند به همان سرعتی که میدان مغناطیسی حذف می شود، کاملاً به حالت سیال معمولی اولیه برگردد. همان طور که در قسمت ۱-۲-۲ نشان داده شد، ذرات آهن در راستای میدان مغناطیسی به خط می شوند تا یک زنجیره تشکیل دهند و در نهایت سیال MR در حضور میدان مغناطیسی تقریباً رفتاری شبیه مدل بینگهام-پلاستیک نشان می دهند. در غیاب میدان مغناطیسی ذرات آهن به صورت آزاد در سیال حامل حرکت می کنند و سیال MR مانند سیالات نیوتونی رفتار می کنند. از آنجایی که نیروی دمپینگ دمپرها MR می تواند با کنترل جریان خارجی و در نتیجه میدان مغناطیسی تغییر کند این نوع دمپرها را دمپرها قابل کنترل یا هوشمند نیز می گویند. اگرچه نیروی دمپینگ قابل کنترل هستند ولی چگونگی تغییر نیروهای دمپینگ بر مبنای سنسورهای دینامیکی است که پاسخ دینامیکی دمپر را دریافت می کند. جهت میدان مغناطیسی و محل قرار گرفتن کوئل ها و همچنین بقیه اجزای دمپر در شکل ۱-۱۰ مشخص شده است. همان طور که مشاهده می شود، جهت میدان مغناطیسی عمود بر جهت جریان سیال می باشد و با افزایش و کاهش جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی و در نتیجه لزجت ظاهری سیال تغییر کرده و نیروی دمپینگ کنترل می شود. در این نوع دمپر MR نشان داده شده در شکل ۱-۱۰، محل قرار گرفتن کوئل ها روی پیستون می باشد.



شکل ۱-۱۰: نمونه ای از دمپر مگنتورئولوژیکال MRFD و اجزا تشکیل دهنده [۳۰]

۱-۴-۱ انواع دمپر MR

دمپره‌های MR دارای سه مدل اصلی می‌باشند. تک مخزنه، دو مخزنه و دو سر متحرک. از این سه مدل، مدل تک مخزنه که در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده، متداول است. مکانیزم انباره جهت جبران تغییر در حجم ناشی از حرکت میل پیستون می‌باشد [۳۱]. پیستون انباره مانعی بین سیال MR و گاز فشرده شده (معمولاً نیتروژن) که جهت جبران تغییرات حجم ایجاد شده به هنگام ورود میل پیستون به داخل سیلندر استفاده می‌شود، ایجاد می‌نماید. همان‌طور که در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده است، دمپر MR دو مخزنه دارای دو مخزن ذخیره سیال است. در این مدل، دمپر دارای یک محفظه‌ی داخلی و یک محفظه‌ی خارجی می‌باشد که به وسیله‌ی یک سوپاپ انتهایی از یکدیگر جدا شده‌اند. حجم قرار گرفته بین محفظه‌ی داخلی و محفظه‌ی خارجی، مخزن خارجی نامیده می‌شود. محفظه‌ی داخلی به وسیله‌ی سیال MR پر می‌گردد. لذا هیچ حجم هوایی وجود نخواهد داشت. برای جبران تغییرات حجم ایجاد شده به خاطر حرکت میل پیستون، از مخزن خارجی که بخشی از آن توسط سیال MR پر شده، استفاده می‌شود؛ بنابراین، مخزن خارجی در یک دمپر دو مخزنه کاری را می‌کند که مکانیزم انباره پنوماتیکی در یک دمپر تک مخزنه انجام می‌دهد. آخرین نوع از دمپره‌های MR دمپر دو سر متحرک نامیده می‌شود، چون یک میل پیستون با قطر یکسان از دو سر سیلندر بیرون آمده است. شکل ۱-۱۳ یک دمپر MR دو سر متحرک را نشان می‌دهد. چون به هنگام حرکت میل پیستون نسبت به بدنه‌ی دمپر هیچ تغییری در حجم رخ نمی‌دهد، دمپر دو سر متحرک نیاز به مکانیزم جبران سازی ندارد. این نوع دمپر در دوچرخه‌ها تفنگ و پایداری ساختمان‌ها در هنگام زلزله کاربرد دارد.

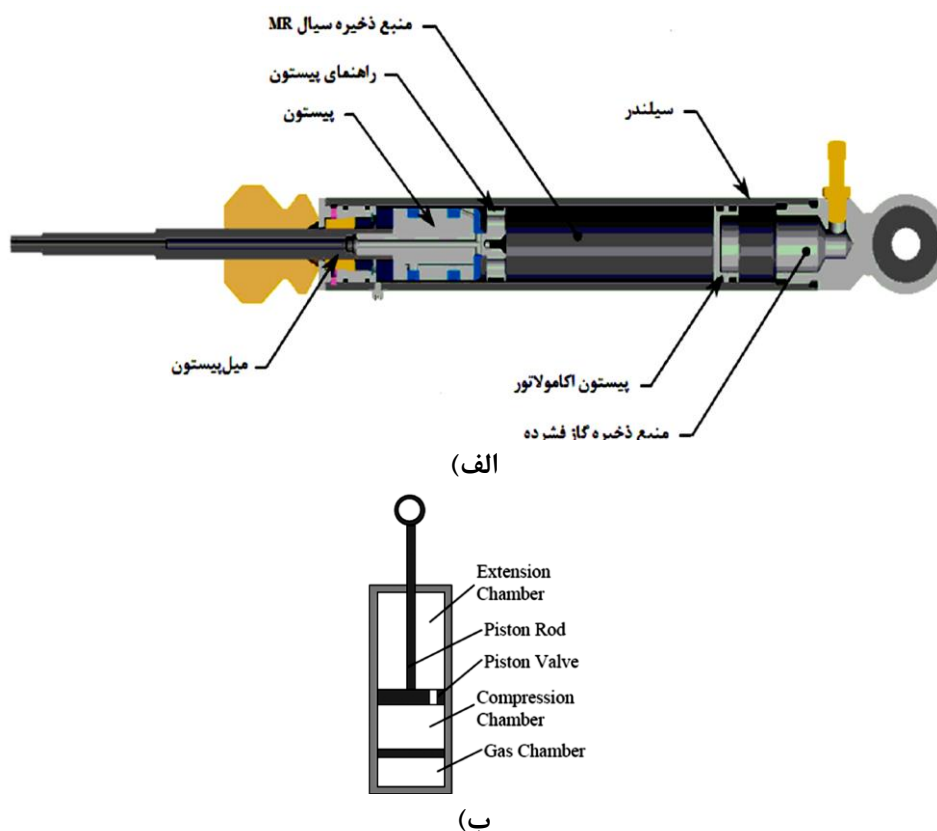
۱-۴-۲ مودهای عملکرد دمپره‌های MR

دمپره‌های مگنتورئولوژیکال همانند تمامی وسایل MR در مودهای مختلف جریانی، برشی، فشاری و ترکیبی از این سه مود کار می‌کنند.

۱-دمپره‌های MR مود جریانی:

این دمپرها در حالت کلی از یک سیلندر و یک پیستون تشکیل شده‌اند. میدان مغناطیسی برای کنترل جریان

سیال مغناطیسی بکار گرفته می‌شود. این دمپرها هم به‌صورت تک‌محوره و هم به‌صورت دوحوره می‌باشند. یکی از کاربردهای این دمپرها در سیستم کنترل ارتعاشات نیمه فعال برای سیستم تعلیق ماشین‌های سنگین می‌باشد. شکل ۱-۱۴ نمونه‌ای از دمپرهایی که در مود جریانی عمل می‌کنند را نشان می‌دهد. نیروی دمپینگ

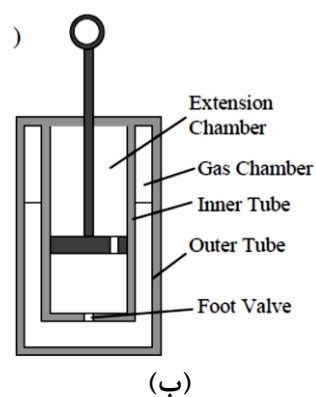
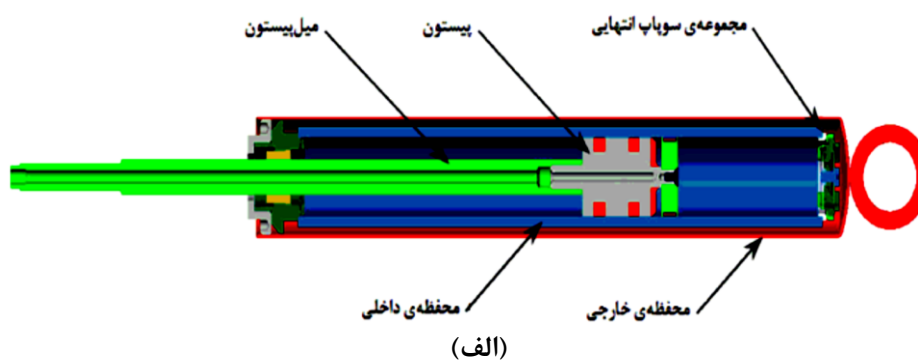


شکل ۱-۱۱: دمپر تک مخزنه MR (الف فعال ب) دمپر غیر فعال [۳۲]

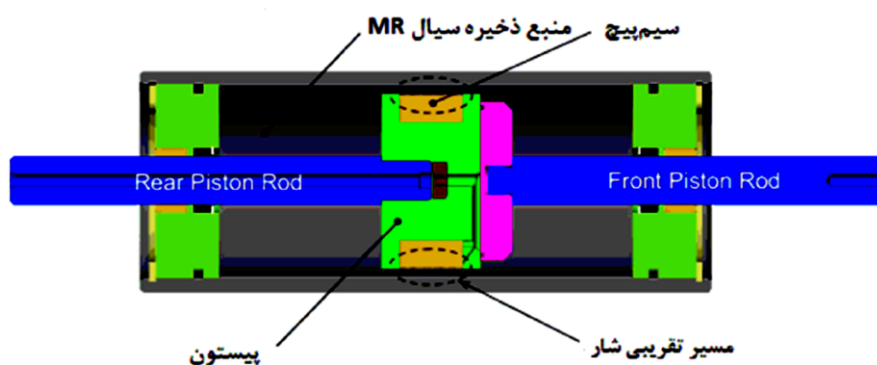
وابسته به میدان بوجود آمده در این مود ناشی از افت فشار در طول گپ، هنگامی که نیرو به شفت دمپر وارد می‌شود می‌باشد.

۲- دمپره‌های MR مود برشی:

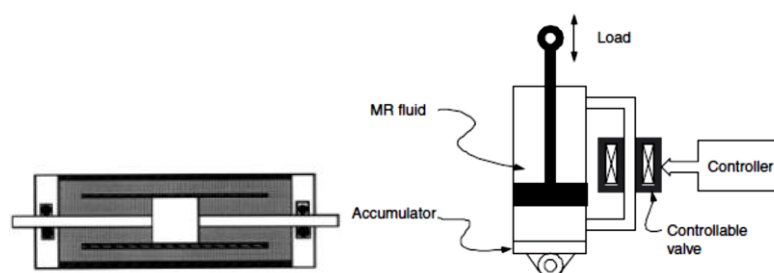
در این مود لزجت سیال بین یک صفحه ثابت و یک صفحه متحرک با تغییر میدان مغناطیسی تغییر می‌کند. محققان یک دمپر دورانی ابداع کردند که به‌عنوان سیستم تعلیق یک خودرو سواری مورد استفاده قرار گیرد. همان‌طور که در شکل ۱-۱۵ نشان داده شده است این دمپر اساساً از یک محفظه، الکترومگنت، شفت، دیسک و سیال MR و غیره تشکیل شده است. هنگامی که شفت در معرض ارتعاش پیچشی قرار می‌گیرد برش در



شکل ۱۲-۱: الف) دمپر MR دو مخزنه ب) دمپر غیرفعال دو مخزنه [۳۲]



شکل ۱۳-۱: دمپر MR دو سر متحرک



شکل ۱۴-۱: دمپرهای MR مود جریان [۳۳]

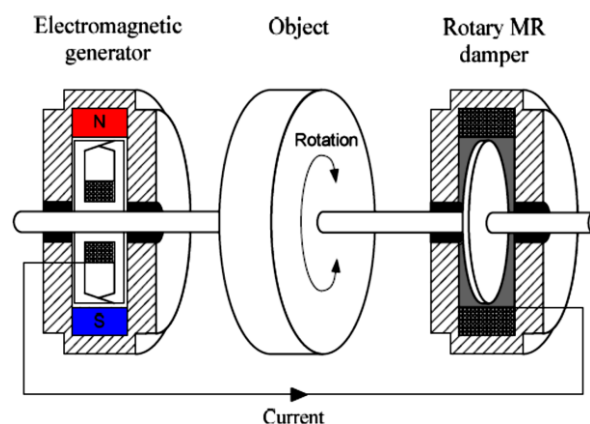
سیال MR، انرژی ارتعاشی را پخش می‌کند. نیروی دمپینگ ناشی از برش مستقیم سیال MR می‌باشد.

۳-دمپ‌های MR مود فشاری:

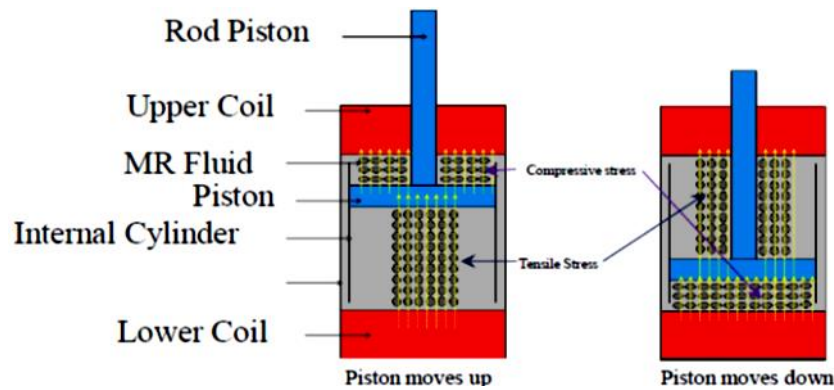
این دمپر برای کنترل فعال دمپینگ در کاربردهای صنعتی گوناگون استفاده می‌شود. این نوع دمپر با حرکت یک دیسک یا تیغه در یک محفظه از سیال MR عمل می‌کند بطوریکه حرکت اولیه محوری و سپس حرکت ثانویه جانبی می‌باشد. هنگامی که میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد یک انتقال از رفتار ویسکوز به ویسکوالاستیک مشاهده می‌شود که تأثیر بسیاری بر انرژی‌ای که توسط دمپر پراکنده می‌شود و نیروی دمپینگ می‌گذارد. مودهای برشی و جریانی هم برای دمپ‌های خطی و چرخشی استفاده می‌شود ولی مود فشاری فقط برای دمپ‌های خطی و دامنه‌های محدود بکار می‌رود. نیروهای فشاری به‌صورت دوره‌ای تغییر می‌کنند و جابجایی‌ها نسبت به مودهای دیگر کمتر است اما نیروهای مقاوم بوجود آمده به‌طور قابل توجهی بیشتر می‌باشد. این نوع دمپر در شکل ۱-۱۶ نشان داده شده است.

۴-ترکیبی از مودهای مختلف:

مود ترکیبی جریانی-برشی یکی از مودهای ترکیبی می‌باشد که در آن یک فاصله شعاعی بین دیواره سیلندر و پیستون وجود دارد. حرکت پیستون باعث می‌شود سیال جریان یابد و تنش برشی در تمام فضای شعاعی وجود دارد. کوئل مغناطیسی روی پیستون یا سطح داخلی سیلندر پیچیده می‌شود. اصول و ترکیب دمپ‌های



شکل ۱-۱۵: دمپر مود برشی دورانی [۳۴]



شکل ۱-۱۶: دمپر MR مود فشاری [۳۵]

MR خطی متداول که بر مبنای مود ترکیبی جریانی- برش مستقیم کار می کنند در شکل ۱-۱۷-الف) نشان داده شده است. همچنین شکل ۱-۱۷-ب) نمونه ای از دمپر MR که در مود فشاری- برشی- جریانی کار می کند نشان داده شده است. دمپرهایی که در مود ترکیبی عمل می کنند خصوصیات دمپینگ ویژه ای دارند و در حالت کلی نیروی دمپینگ بزرگ تری نسبت مودهای غیر ترکیبی تولید می کنند. [۳۷] در مود ترکیبی برشی- فشاری نشان داده شده در شکل ۱-۱۷-ب) سه کوئل برای مود برشی و دو کوئل برای مود فشاری مورد استفاده قرار گرفته است. نیروی دمپینگ وابسته به میدان در این مود ناشی از افت فشار و همچنین برش مستقیم سیال MR می باشد.

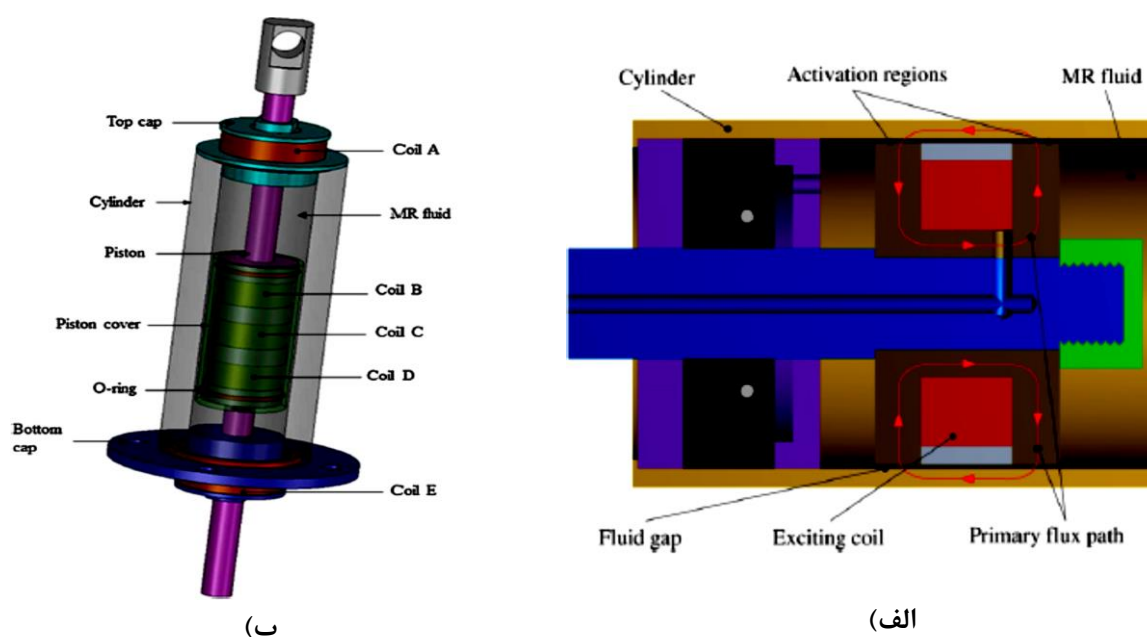
۵-۱ مدل سازی تحلیلی شبه استاتیک^۱ و محاسبه نیروی دمپینگ

دمپرهای MR ذاتاً دینامیک بسیار غیر خطی و هیستریزیس^۲ از خود نشان می دهند. چنین رفتاری مدل سازی این دمپرها را بسیار چالش برانگیز می کند. به منظور مشخص کردن عملکرد دمپرهای MR مدل های گوناگونی پیشنهاد شده است. مدل های پیشنهاد شده باید دقیق باشند، به این معنی که خروجی مدل پیشنهاد شده و داده های آزمایشگاهی باید دارای تطابق مناسب باشند. همچنین مدل ها باید ساده باشند بطوریکه پارامترها

^۱. quasi-static

^۲. hysteresis

به سادگی تعریف شده و پیچیدگی کمی داشته باشند و نهایتاً برای ورودی و خروجی‌های مختلفی قابل استفاده باشند. در حالت کلی مدل‌ها می‌توانند بر طبق خصوصیتی که ارائه می‌کنند مثل پروفیل سرعت و تنش برشی سیال MR یا بر مبنای روش‌هایی که رفتار دمپر را تشریح می‌کنند دسته‌بندی می‌شوند. انواع مدل بر مبنای خصوصیات دمپرهای MR می‌توانند به دو مدل اصلی ۱- مدل شبه استاتیک و ۲- مدل‌های دینامیکی تقسیم شوند. یک مدل ریاضی قابل اعتماد برای ارزیابی عملکرد سیستم (مانند خصوصیات دمپینگ و بهینه‌سازی پارامتری) بسیار مهم است. مدل‌های ریاضی بسیاری در مطالعات انجام شده، برای سیستم‌های دمپر MRF



شکل ۱-۱۷: دمپرهای مدل ترکیبی (الف) جریانی-برشی [۳۶] (ب) جریانی-برشی-فشاری [۳۷]

پیشنهاد شده است [۲۹]. در اینجا مدل‌های فیزیکی فقط به صورت تحلیلی به منظور طراحی سیستم بیان می‌شود.

۱-۵-۱ مدل‌های شبه استاتیک

مدل فیزیکی معمولاً بر مبنای تحلیل شبه استاتیک سیال MR که در یک مجرای حلقوی با پروفیل سرعت ثابت و جریان سیال کاملاً توسعه یافته جریان دارد استخراج می‌شود. تحلیل شبه استاتیک دمپرهای MRF برای محاسبه افت فشار و در نتیجه به دست آوردن نیروی دمپینگ استفاده می‌شود. در طی حرکت پیستون

دمپر، سیال در بین فاصله حلقوی بین پیستون و بدنه سیلندر جریان می‌یابد. نیروی دمپینگ ایجادشده بر اثرات فشار و نیز برش سیال بین گپ ناشی از حرکت پیستون، می‌باشد.

فرضیات تحلیل شبه استاتیک (Quasi-static) در حالت کلی عبارت‌اند از:

- ۱- دمپرهای MRF دارای سرعت ثابت می‌باشند
- ۲- جریان سیال کاملاً توسعه‌یافته است
- ۳- مدل ساده بینگهام پلاستیک برای توصیف رفتار سیال بکار گرفته می‌شود

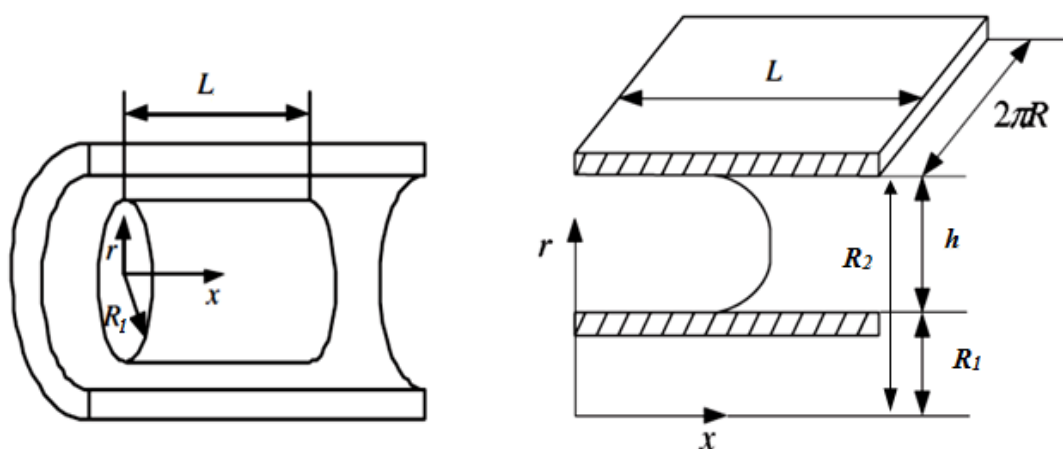
۱-۵-۱-۱ مدل‌های شبه استاتیک صفحات موازی

اگر نسبت بین اندازه گپ به شعاع قطر پیستون کوچک باشد، مدل متقارن محوری می‌تواند با جریان سیال MR بین دو مجرای موازی تقریب زده شود [۳۸، ۲۸]. در حالت کلی، یک کانال حلقوی جریان می‌تواند مطابق شکل ۱-۱۸ با یک مجرای مستطیلی با عرض $2R\pi$ که $R=(R_1+R_2)/2$ شعاع متوسط مرکز فاصله حلقوی است و L به‌عنوان طول کانال و $h=R_1-R_2$ به‌عنوان ضخامت مجرای مستطیلی معادل شود ناحیه بین گپ مطابق شکل ۱-۱۹ به سه قسمت تقسیم می‌شود [۳۳].

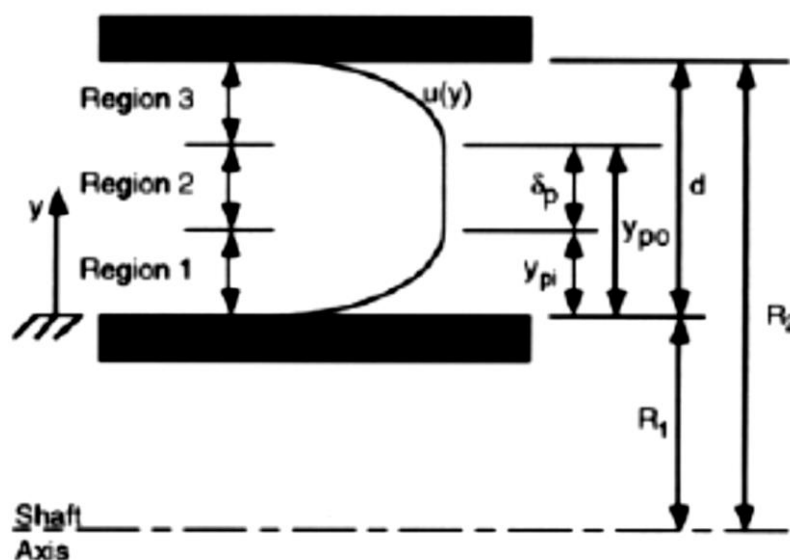
بر مبنای مدل‌های تحلیلی، فرمول‌بندی نیروی دمپینگ، تحت مودهای عملکرد مختلف و کانال‌های ویسکوز مختلف بدست آمده است [۳۹، ۴۰، ۴۱ و ۴۲]. در شکل ۱-۲۰ نمونه‌ای از دمپر در مود جریانی و مدل شیر با هر دو مسیر جریان شعاعی و حلقوی و ترکیب مودهای فشاری و برشی و جریانی نشان داده شده‌اند. همچنین افت فشارها نیز فرمولی مشابه فرمول نیروهای محاسبه شده دارند. به عبارت دیگر نیروهای محاسبه شده از حاصل ضرب افت فشار به دست آمده از تحلیل، در مساحت پیستون محاسبه شده‌اند.

۱-۵-۱-۲ مدل شبه استاتیک بی بعد

مدل شبه استاتیک بی بعد، برای ساده سازی مدل‌های تحلیلی مکانیکی و همچنین فراهم کردن دید مطلوب نسبت به اثرات پارامترهای طراحی مختلف ارائه شده است. روابط مربوط به این مدل در مطالعات گذشته ارائه شده‌اند [۳۳، ۴۳، ۴۴ و ۴۵] و مفاهیم مربوطه در ادامه توضیح داده می‌شود.



شکل ۱-۱۸: معادل سازی مجرای حلقوی با مجرای مستطیلی [۳۹]



شکل ۱-۱۹: پروفیل سرعت و نواحی جریان سیال MR بین صفحات موازی [۳۳]

پارامترهای طراحی بی بعد عبارتند از:

۱-نسبت تقویت هیدرولیکی $\bar{A}^1$:

این پارامتر برای ارتباط سرعت پیستون و سرعت متوسط سیال داخل فاصله حلقوی، از طریق پیکربندی

هندسه های مختلف استفاده می شود. این پارامتر فقط روی ظرفیت دمپینگ دمپر MRF تأثیر ندارد، بلکه

¹. hydraulic amplification ratio

به طور قابل توجهی رفتار دینامیکی دمپر را نیز مشخص می کند بطوریکه خصوصیات مود جریانی و ترکیبی دمپرهاى MRF هنگامی که مقدار $\bar{A}$ زیاد باشد، مثل هم می باشد.

۲-نسبت هندسی $r^1(\phi)$:

برای دمپرهاى یکپارچه، با ولو کنترل در پیستون در حال حرکت، از آنجایی که $(r_p \sim r_d)$ ، این پارامتر در تقابل با $\bar{A}$ می تواند صورت جایگزین استفاده شود.

۳- عدد بینگهام (Bi) :

دو عدد بینگهام برحسب سرعت های مختلف کاربردهای متفاوتی دارند. برای تحلیل عملکرد دمپر با در نظر گرفتن تحریک خارجی ناشی از سرعت پیستون قابل اندازه گیری صریح پیوسته بهتر است از $Bivp$ استفاده شود و از طرف دیگر به دلیل اشاره مستقیم آن به رفتار بینگهام پلاستیک و بررسی جامع خصوصیات جریان با متغیرهای بی بعد شناخته شده دیگر مانند عدد رینولدز^۲، برای تحلیل جریان سیال MRFs داخل گپ از $Bivd$ استفاده می شود

نکات ذیل برای عدد بینگهام قابل توجه است

الف- عدد بینگهام بزرگ بیانگر این است که دمپر در سرعت پایین یا شرایط پس از تسلیم^۳ ضعیفی قرار دارد
ب- عدد بینگهام کوچک بیانگر این است که دمپر در سرعت بالا یا شرایط پس از تسلیم شدت قوی عمل می کند.

ج- عدد بینگهام صفر، بیانگر تنش برشی تسلیم دینامیکی صفر ناشی از نبود میدان مغناطیسی است.

د- عدد بینگهام معمولاً در سرعت پیستون ثابت استفاده می شود. اگر دمپر تحت بارگذاری دینامیکی عمل کند، سرعت پیستون برای عدد بینگهام برابر با مقدار ریشه متوسط مربعات سرعت می باشد.

۳- ضخامت پلاگ بی بعد $(\bar{\delta})$:

ضخامت پلاگ بی بعد، وابسته به اعداد بینگهام است که برای ارزیابی وضعیت قدرت جریان کنترل شده با میدان

¹. geometry ratio

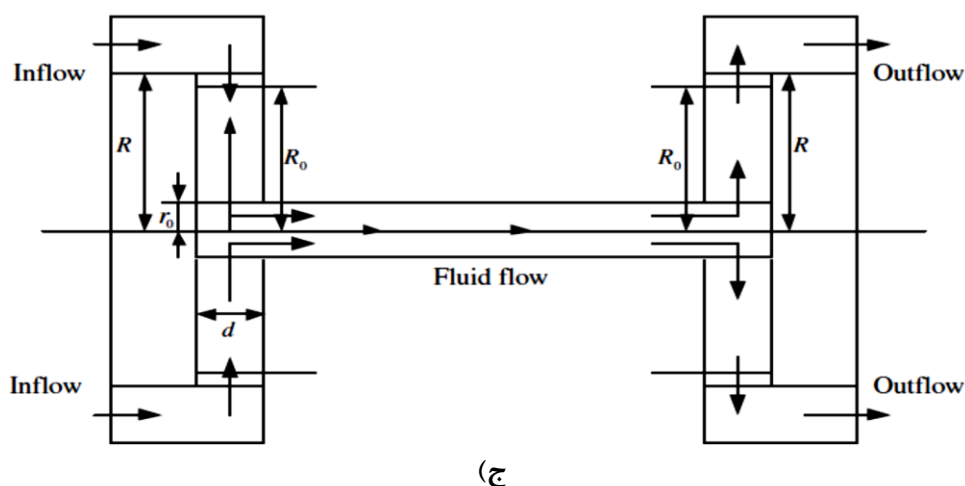
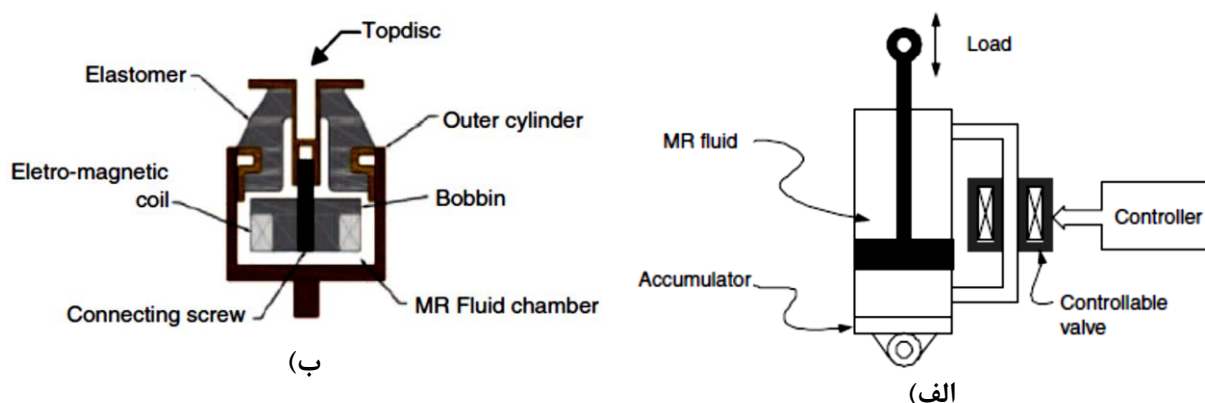
². Reynolds

³. postyield

بالرزش است. همچنین برای مشخص کردن عملکرد بی‌بعد دمپر بر مبنای فرمول‌بندی بی‌بعد از ثابت‌های ذیل استفاده می‌شود

۱- ثابت دمپینگ معادل C_{eq}^1 :

این ثابت به‌صورت نسبت نیروی دمپینگ به‌سرعت پیستون تعریف می‌شود که شمای کلی فرمول برای مود جریانی و ترکیبی مانند هم است با این تفاوت که فرمول عدد بینگهام برحسب ضخامت پلاک، متفاوت است.



شکل ۱-۲۰: نمونه‌ای از مودهای مختلف تحلیل‌شده الف) دمپر Valve mode [۳۹] ب) ترکیب مودهای فشاری-برشی-جریانی [۴۱] ج) مدل شیر با هر دو مسیر جریان شعاعی و حلقوی [۳۹]

¹. Equivalent Damping coefficient

۲- ثابت دمپینگ ویسکوز نیوتونی C_0 :

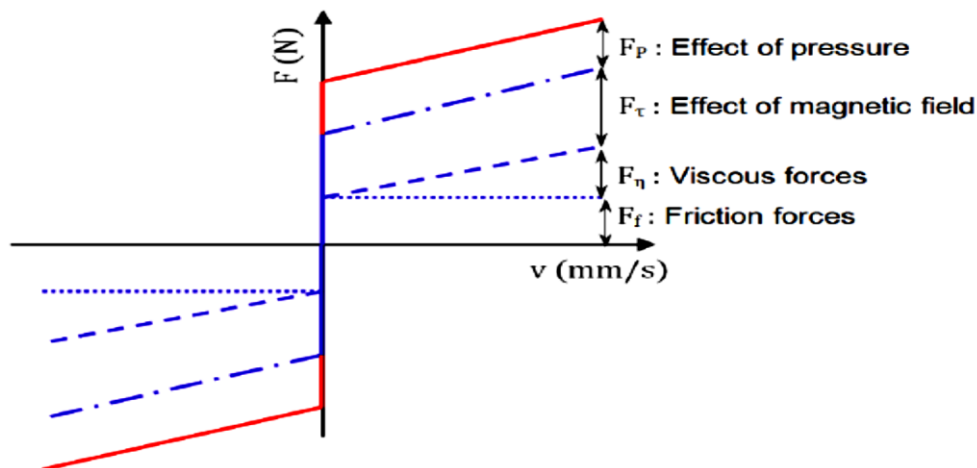
این ثابت نسبت نیروی دمپینگ به سرعت پیستون زمانی که فقط جریان سیال نیوتونی وجود داشته باشد را بیان می‌کند.

۳- ظرفیت دمپینگ C_{eq}/C_0 :

این ثابت بیانگر نسبت ثابت دمپینگ ویسکوز معادل به ثابت دمپینگ نیوتونی است.

۴- محدوده دینامیکی D^2 :

محدوده دینامیکی به صورت نسبت نیروی خروجی کل F به نیروی غیرقابل کنترل F_{uc} تعریف می‌شود. نیروی غیرقابل کنترل F_{uc} شامل نیروی ویسکوز F_η و نیروی اصطکاک F_f می‌باشد. همچنین نیروی قابل کنترل F_τ بیان‌کننده نیروی حاصل از تنش تسلیم القاشده توسط میدان است. از این پارامتر برای طراحی دمپ‌های MRF استفاده می‌شود که در قسمت بعد چگونگی این کار شرح داده می‌شود. نمودار تجزیه نیروهای دمپر MR ترکیبی در شکل ۱-۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲۱: توزیع نیرو در دمپر MRF

¹. Damping capacity
². dynamic range

۱-۶ طراحی داخلی دمپرهای MR

برای طراحی هندسه دمپرهای MR، فرض می‌کنیم پارامترهای زیر مشخص می‌باشند [۴۶]. ۱- تنش تسلیم سیال MR یعنی τ_y یا τ_0 ۲- شعاع سیلندر دمپر MR ۳- بیشینه سرعت v_p ، پیستون دمپر MR در طراحی دمپرهای MR فرض بر این است که سیال MR از لحاظ مغناطیسی اشباع شده است. تنها در این حالت است که سیال، بیشینه تنش تسلیم τ_y را از خود نشان می‌دهد.

۱-۶-۱ طراحی بر مبنای حداکثر شدن محدوده دینامیکی

جهت افزایش کارایی دمپر MR، محدوده دینامیکی نیرو باید تا حد امکان بزرگ باشد. اندازه‌ی شیار کوچک، نیروی قابل کنترل را افزایش می‌دهد؛ اما هنگامی که اندازه‌ی شیار h به اندازه معینی برسد، نیروی ویسکوز F_η سریع‌تر از نیروی قابل کنترل F_τ افزایش می‌یابد محدوده دینامیکی D کاهش می‌یابد. اگر اندازه شیار، بزرگ باشد، هم F_η و هم F_τ کاهش می‌یابند. از این رو به‌طور کلی یک اندازه شیار بهینه h می‌تواند وجود داشته باشد که محدوده دینامیکی را بیشینه نماید.

۱-۷ انتقال حرارت در دمپرهای MRF

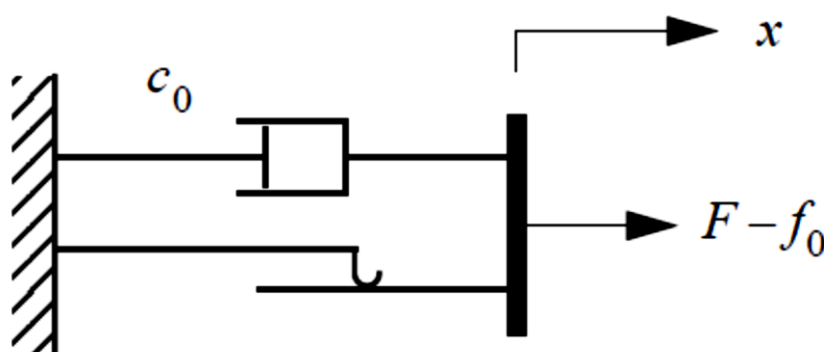
کارکرد اصلی همه دمپرها پخش انرژی با تبدیل انرژی جنبشی به حرارتی می‌باشد. انرژی ارتعاشات به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود و در دمپر ذخیره می‌شود، قسمتی از حرارت از دیوار سیلندر از طریق جابجایی، هدایت و تشعشع به هوا انتقال داده می‌شود و بقیه در داخل دمپر باقی می‌ماند که باعث افزایش دما می‌شود تا هنگامی که به تعادل دمایی برسد. این تولید حرارت منجر به افزایش دمای خودش می‌شود و بنابراین ظرفیت نیروی دمپر به دلیل کاهش لزجت کاهش می‌یابد. در مورد دمپرهای مگنتورئولوژیکال این کاهش لزجت و در نتیجه نیروی دمپینگ، ممکن است با افزایش میدان مغناطیسی از طریق افزایش جریان الکتریکی ورودی جبران شود. همچنین تنش تسلیم ناشی از میدان مغناطیسی نیز با افزایش دما کاهش می‌یابد که در رژیم‌های شار حرارتی پایین با افزایش قدرت میدان مغناطیسی این کاهش را جبران می‌کنند. ولی از آنجایی که پاسخ سیال به میدان

مغناطیسی بکار گرفته شده با اشباع مغناطیسی، محدود به رژیم شار حرارتی است بنابراین مطالعه محدودیت‌های ذاتی سیال در برابر افزایش دما نیز ضروری می‌باشد.

۸-۱ مدل دینامیکی دمپر MRF

از آنجایی که بررسی مدل‌های دینامیکی موضوع مورد بحث این پیشنهاد پژوهشی نمی‌باشد در این قسمت تنها یکی از مدل‌های مربوطه به‌طور مختصر بیان می‌شود.

بر مبنای مدل بینگهام که در ابتدای فصل مورد بررسی قرار گرفت استانوی و همکاران [۴۹ و ۵۰]، یک مدل مکانیکی ایدئال پیشنهاد کردند که بیانگر رفتار بینگهام برای دمپر قابل کنترل می‌باشد. مدل بینگهام از یک عبارت اصطکاک کلومب که به موازات یک دمپر ویسکوز قرار گرفته است تشکیل شده است که در شکل ۲۲-۱ نشان داده شده است. که C_0 ثابت دمپینگ و نیروی f_0 در نظر گرفته شده است برای نیروی غیر صفر ناچیزی که ناشی از فشار انباره مشاهده می‌شود. اگر سرعت در هر نقطه‌ای صفر شود نیروی اعمالی و جز اصطکاکی برابر شده‌اند.



شکل ۲۲-۱ مدل مکانیکی بینگهام برای یک سیال قابل کنترل [۴۹]

۹-۱ مروری بر مطالعات انجام شده

سیال‌های مگنتورئولوژیکال به عنوان مواد هوشمند با تنش تسلیم متغیر برای اولین بار در سال ۱۹۴۰ ساخته شد و سپس استفاده از آن توسط محققان در وسایل گوناگون از جمله دمپرها مورد مطالعه قرار گرفت. مطالعات

انجام شده در زمینه دمپرهای MRF را می توان به صورت های مختلفی دسته بندی کرد. یک دسته بندی بر مبنای اهمیت و ارتباط با پژوهش حاضر می تواند به صورت زیر باشد

- مطالعات مربوط به مدل سازی عددی و آزمایشگاهی، طراحی و بهینه سازی
- مطالعات مربوط به انتقال حرارت و اثرات دمایی
- مطالعات مربوط به بررسی محدوده فرکانسی
- مطالعات مربوط به سیال های MR
- مطالعات تحلیلی

۱-۹-۱ مطالعات مدل سازی عددی، آزمایشگاهی، طراحی و بهینه سازی

از آنجایی که مطالعات مربوط به سه مبحث مدل سازی عددی، طراحی و بهینه سازی معمولاً همپوشانی دارند این سه مبحث در یک قسمت مورد مرور و بررسی قرار داده شده اند.

۱-۱-۹-۱ مطالعات طراحی

ابتدا به مرور مطالعات مربوط به طراحی دمپرهای MR پرداخته می شود. گاوین^۱ و همکاران [۵۱] با در نظر گرفتن ظرفیت نیرو، اندازه و خصوصیات الکتریکی مختلف و همچنین با کوپل کردن رفتار مغناطیسی غیر خطی آلیاژ فولاد و سیال MR با مکانیک سیالات غیر نیوتونی در روش خود، انرژی و ثابت زمانی القا را کمینه کردند. بر مبنای تحقیق انجام شده اجزای الکترومغناطیس دمپر MR که با متغیرهای طراحی چندگانه مشخص می شوند اثر مستقیم بر مصرف انرژی الکتریکی دمپر MR دارند. احمدیان و همکاران [۵۲]، طرح هایی از دمپرهای MR برای لگدزدن تفنگ ارائه کردند. به طور خاص طراحی دو نوع دمپر مورد را بررسی قرار داده و نتایج تیراندازی برای نوع اول مورد بررسی ارائه و دو نوع دمپر هیبریدی تنظیم پذیر طراحی کردند. وانگ^۲ [۵۳]

^۱. Gavin

^۲. Wang

و همکاران^۱، رفتار سیال MR در یک سوراخ را مورد آزمایش قرار دادند و خصوصیات میدان مغناطیسی اطراف روزنه را با روش المان محدود مورد بررسی قرار دادند؛ و بر طبق تحقیقات آن‌ها خصوصیات مغناطیسی سیالات MR متناسب با ماده، موقعیت و ضخامت سوراخ مستطیلی تغییر می‌کند. نهایتاً با به دست آوردن رابطه‌ای بین شکل سوراخ و رفتار جریان سیال MR نتایج ارزشمندی برای طراحی وسیله MRF ارائه کردند. آیدار^۱ و همکاران [۵۴] طراحی، ساخت و آنالیز تحلیلی برای یک دمپر MR کوچک را که برای بار جلویی ماشین لباسشویی استفاده می‌شود، مورد مطالعه قرار دادند. در این دمپرها در سرعت‌های بالا و حالت رزونانس نیاز به دمپینگ نسبتاً بالا می‌باشد. دمپرها قابل کنترل MR برای کاهش صدا و لرزش در این سرعت‌ها بسیار مناسب هستند. در این تحقیق با استفاده از اصول مکانیک سیالات و تحلیل المان محدود الکترومغناطیس، هندسه طرح و ابعاد برای تأمین این نیاز به دست آمده‌اند. بر مبنای مطالعات آن‌ها حداکثر نیروی مورد نیاز در جریان الکتریکی ۲٫۱ آمپر به دست می‌آید. اولابی و گرانوالد^۲ [۵۵] دو مود برشی مستقیم (ترمز) و ولو مود (دمپر) را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند خصوصیات مانند پاسخ سریع، تبدیل سریع بین انرژی الکتریکی ورودی و مکانیکی خروجی و قابلیت کنترل MRF، این وسایل را برای بسیاری از کاربردها مفید می‌سازد. در این تحقیق اشاره شده است که سیال‌های با رژیم تنش برشی بالاتر و افزایش انرژی پخش شده و تبدیل شده به حرارت، قبل از ایجاد پدیده غلیظ شدن و تخریب سیال، مطلوب می‌باشند و یکی از اهداف طراحی می‌تواند افزایش پارامتر LED یا همان انرژی پخش شده در دمپر باشد؛ که این پارامتر، کل انرژی پخش شده بر واحد حجم سیال MR در طول عمر وسیله MRF است، قبل از اینکه سیال دچار پدیده غلیظ شدن شود و برای کنترل پذیری وسیله مناسب نباشد. بریگلی^۳ و همکاران [۴۰]، دو آرایش کنترلی مختلف MR-Valve و Orifice به صورت آزمایشگاهی ساخته و مورد آزمایش قرار داده و تحلیل پارامتری و مدل سازی مغناطیسی روی آن‌ها انجام دادند. بر طبق نتایج آن‌ها با استفاده از ولو، ظرفیت فشار بالاتری با پاسخ کنترلی سریع‌تری به دست می‌آید و کنترل MRF برای وسایل کنترلی مختلف مفید می‌باشد. القمدی و اولابی^۴ [۳۶] یک کار تئوری و

¹. Aydar

². Olabi & Grunwald

³. Brigley

⁴. Alghamdi & Olabi

آزمایشگاهی روی یک دمپر کاملاً جدید MR، در مود فشاری قابل استفاده در اتومبیل، انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هنگامی که نیروهای اغتشاش و تحریک خارجی بزرگ‌تر از نیروی زنجیره‌های MR است، زنجیره‌ها می‌شکنند و به زنجیره‌های کوچک‌تر تبدیل می‌شوند. برعکس، تعداد زنجیره‌ها در سمت فشاری افزایش می‌یابد و نیروی دمپینگ پیستون افزایش می‌یابد. درحالی که کاهش در سمت نیروی کششی پیستون نتیجه‌ای از افزایش جابجایی و طولانی شدن زنجیره‌ها است. با این وجود، زنجیره‌های جدید به سمت مرکز سیلندر حرکت می‌کنند که میدان مغناطیسی بالاتر است؛ و در نتیجه نیروی دمپینگ افزایش و تعداد زنجیره‌ها کاهش می‌یابد. عمادالدین و همکاران [۵۶]، یک مرور بر روی مبحث دمپرهای چرخشی MR از نقطه نظر پیشرفت‌های به دست آمده روی طراحی ساختاری، پیکره‌بندی مدار مغناطیسی و تکنیک‌های مدل‌سازی انجام دادند. در این تحقیق راحتی ساخت نگهداری و کنترل این دمپرها نیز مورد بررسی قرار گرفت. یزید و همکاران [۳۷] یک دمپر مگنتورئولوژیکال مود برشی-فشاری جدید طراحی کردند. مدار مغناطیسی این دمپر جدید با روش المان محدود^۱ مدل‌سازی شد و با استفاده از نتایج این مدل‌سازی طراحی و ساخته شد. نتایج آزمایشگاهی تحت بار شبه استاتیکی روی سه مود برشی و فشاری و ترکیب برشی-فشاری ارائه شده و نتایج آن‌ها نشان داد مود ترکیبی خصوصیات دمپینگ ویژه‌ای از خود نشان می‌دهد و در حالت کلی مود ترکیبی نیروی دمپینگ بالاتری نسبت به حالت تک مود ایجاد می‌کند. استرنبرگ^۲ و همکاران [۵۷] طراحی، ساخت و آزمایش یک نمونه دمپر ظرفیت بالا مورد استفاده در ساختمان‌های مرتفع را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مدل‌سازی عددی را برای درک بهتر رفتار پیوسته نیرو-سرعت به کار بردند. مدل‌های المان محدود، برای بررسی رفتار کوپل دینامیک سیالات و مغناطیس در این دمپرها و اثبات اصول آزمایش‌های انجام شده روی طرح‌های جدید بکار گرفته شدند. در این مدل‌ها رفتار دینامیکی سیالات و میدان مغناطیسی از طریق معادلات شناخته شده ماکسول و ناویراستوکس^۳ که از طریق لزجت سیال مگنتورئولوژیکال که وابسته به شدت میدان مغناطیسی است به هم کوپل شده‌اند و بجای استفاده از روش پیچیده مش متحرک و تغییر شکل‌پذیر یک پروفایل سرعت مشخص

^۱. FEMM

^۲. Sternberg

^۳. Maxwell & Navier-stokes

سینوسی در ورودی به صورت $v_{flow,x} = v_0 \sin(\omega t)$ در نظر گرفتند. لی^۱ و همکاران [۵۸] یک دمپر کوچک با نیروی دمپینگ ۵۰N برای کاربردهای فرود نرم را طراحی ساختاری کردند. آن‌ها در طراحی خود از فولاد سیلیکون بجای فولاد استفاده کردند. همچنین در طراحی خود از حداکثر شدن محدوده دینامیکی استفاده کردند. مازالان^۲ و همکاران [۵۹] با طراحی یک شیر مگنتورئولوژیکال مود جریان با مسیر جریان پیچ دار، یک دمپر نیمه فعال را مورد مطالعه قرار دادند. بر طبق نتایج بدست آمده توسط آنها افت فشار در شیار حلقوی از شیار شعاعی کمتر می باشد. این اثبات می کند که شیار شعاعی از شیار حلقوی بسیار موثرتر می باشد. کیم^۳ و همکاران [۶۰] یک کلاس جدید از دمپرهای مگنتورئولوژیکال طراحی کردند که می تواند نیروی دمپینگ مطلوب هر دو نوع سیستمهای تعلیق سرعتهای بالا و پایین را تامین کند. بر طبق نتایج بدست آمده توسط آنها، با کنترل جریانی که به روزنه اصلی و روزنه راه فرعی وارد می شود، می توان یک نیروی دمپینگ مطلوب معین در محدوده وسیعی از سرعت و دامنه نوسان بدست آورد.

۱-۹-۲ مطالعات بهینه سازی

مطالعات متعددی نیز با رویکرد بهینه سازی ابعادی انجام شده است. یو^۴ و همکاران [۶۱]، طراحی یک دمپر MR با مقیاس کوچک (شیار > 1 میلی متر) با بازدهی بالا را مورد بررسی قرار دادند. هدف از آن‌ها کوچک کردن سایز ولو و همزمان بالا نگه داشتن عملکرد MR در ولو بوده است. در این مطالعه، پارامترهای طراحی ولو MR مورد مطالعه قرار گرفته و عملکرد بهینه برای ماده فولاد در مدار مغناطیسی طراحی گردید. نهایتاً بر مبنای محدودیت قطر خارجی در یک طرح شیر^۵ بهینه شده، حداکثر چگالی شار مغناطیسی در شیار به دست آمد. سپس روزنفلد^۶ و همکاران [۶۲]، بهینه سازی دمپرها و ولوهای MR و ER را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق هندسه های ولو مختلف با محدودیت حجم معین به عنوان کاندید ارائه شده و تحلیل المان محدود برای ارزیابی عملکرد هر یک از هندسه های مدنظر و دو پارامتر ضخامت ناحیه پلاگ^۷ بی بعد و ظرفیت دمپینگ برای

¹. Li

². Mazalan

³. Kim

⁴. Yoo

⁵. Valve

⁶. Rosenfeld

⁷. Plug

مقایسه هندسه‌ها استفاده شده است. یک هندسه با ۱۲ دور سیم‌پیچ به‌عنوان هندسه بهینه انتخاب و با هندسه مشابه ER به‌صورت تحلیلی و عددی مقایسه شد. بر مبنای مطالعات آن‌ها دمپر MR ثابت دمپینگ بالاتری از دمپر ER با هندسه مشابه دارد و عملکرد ولو MR شدیداً به حجم سیال فعال و نیروی تحریک بستگی دارد. همچنین انجوين^۱ و همکاران [۶۳] یک طراحی بهینه هندسی برای یک ولو MR به‌منظور بهبود عملکرد آن ارائه کردند. هدف از بهینه‌سازی آن‌ها پیدا کردن ابعاد هندسی بهینه برای یک ولو MR مقید شده به یک حجم معین با استفاده از روش المان محدود بوده است. هدف از بهینه‌سازی در این تحقیق کمینه کردن نسبت ولو بوده است که به‌صورت نسبت افت فشار ویسکوز به افت فشار وابسته به میدان تعریف می‌شود. این پارامتر یکی از پارامترهای مؤثر در عملکرد یک ولو مطلوب می‌باشد. پس از مقایسه نتایج روش بهینه‌سازی بکار گرفته‌شده با نتایج تحلیلی، سه نوع ولو MR متفاوت، در نظر گرفتند. ولو MR حلقوی دو کوئل بهترین نسبت شیر و نوع حلقوی-شعاعی بهترین افت فشار را در پارامترهای طراحی بهینه از خود نشان دادند. آن‌ها از ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار انسیس^۲ استفاده کردند. انجوينگ^۳ و همکاران [۶۴]، یک روش بهینه‌سازی بر مبنای روش المان محدود برای پیدا کردن هندسه بهینه ولو MR مقید به حجم مشخص توسعه دادند و افت فشار موردنیاز با کمترین انرژی مصرفی را به دست آوردند. همین‌طور سفید کار دزفولی [۶۵] به‌منظور مقایسه دمپرهای MR با شوک‌های متداول در دوچرخه‌های کوهستانی خصوصیات دمپینگ دمپرهای MR را موردبررسی قرارداد. محدوده دینامیکی وسیع و وزن پایین از خصوصیات موردنظر در طراحی این دمپر در نظر گرفته و با استفاده از المان محدود و ابرازهای مدل‌سازی، دمپر موردنظر طراحی و بهینه‌سازی و نهایتاً ساخته شد. در پژوهشی دیگر انجوينگ و همکاران [۱۶] دمپر MRF یک وسیله نقلیه مسافرتی را با در نظر گرفتن نیروی دمپینگ و محدوده دینامیکی و با استفاده از تحلیل المان محدود بهینه‌سازی کرد. دمپر MR محدود به یک حجم مشخص است و مسئله بهینه‌سازی ابعاد هندسی دمپر را طوری تعیین می‌کند که تابع هدف کمینه شود. تابع هدف در این تحقیق متشکل از نیروی دمپینگ، محدوده دینامیکی و ثابت زمانی القایی در نظر گرفته شده است. پارلاک^۴

¹. Nguyen

². ANSYS

³. Nguyen

⁴. Parlak

و همکاران [۶۶] با استفاده از رویکرد طراحی آزمایشگاهی (تاگوچی)^۱ یک دمپر شوک MR را بهینه‌سازی کردند؛ و نتایج بهینه‌سازی را با معادلات تحلیلی که محدوده دینامیکی دمپر موردنظر را به دست می‌دهند ارزیابی کردند، مقادیر هندسی بهینه‌شده به دست آمده در مقایسه با ۹ مورد جایگزین دیگر مشخص شده برای بررسی به روش طراحی آزمایشگاهی (تاگوچی)، بهترین عملکرد را نشان دادند. پارامترهای هندسی که در این تحقیق بهینه شدند عبارت‌اند از اندازه شیار، ضخامت فلنج، شعاع هسته پیستون. در فرایند بهینه‌سازی در این تحقیق حداکثر مقدار محدوده دینامیکی موردنظر بوده است. همچنین تیو^۲ و همکاران [۶۷] پارامترهای ساختمان دمپر یک اتومبیل سواری و مدار مغناطیسی مربوطه را بهینه کرده و با استفاده از روش المان محدود مدار مغناطیسی مربوطه را تحلیل کرده و همچنین یک فرمول برای محاسبه نیروی دمپر ارائه کردند. دینگ^۳ و همکاران [۶۸]، یک روش طراحی ساده‌شده برای دمپر مود ولو-برشی MR با در نظر گرفتن بهینه‌سازی مدار مغناطیسی ارائه کرده و بر این مبنا یک دمپر جدید با مسیر دمپینگ بلند ساختند. حداکثر نیروی دمپینگ در دمپر ساخته‌شده جدید حداقل دو برابر دمپرهای MR متداول بوده و محدوده دینامیکی حداقل ۷۰ درصد افزایش یافته است. انجوين و همکاران سال، [۶۹] عملکرد یک دمپر مود جریان MR را مورد ارزیابی قرار دادند و یک طراحی بهینه روی آن انجام دادند. بهینه‌سازی بر این مبنا انجام شد که ثابت دمپینگ مینیمم شود درحالی‌که نیروی دمپینگ بزرگ‌تر از مقدار موردنیاز باشد. تحلیل المان محدود همراه با یک ابزار بهینه‌سازی بکار گرفته شد تا ابعاد هندسی بهینه دمپر MR به دست آیند. همچنین فردوس و همکاران [۷۰]، یک مدل دوبعدی متقارن محوری و مدل سه‌بعدی با استفاده از روش المان محدود برای بهینه‌سازی اجزا دمپر MR بکار گرفتند. شکل‌های مختلف پیستون، شیار سیال MR، شیار هوا و محفظه دمپر برای مقایسه تغییرات عملکرد دمپر و بهینه‌سازی بکار شدند. گلی نلی^۴ و همکاران [۷۱] یک دمپر ابداعی جدید با کنترل فشار داخلی طراحی کردند. از آنجایی که افزایش شدت میدان مغناطیسی با محدودیت‌هایی مثل مصرف انرژی و اشباع مغناطیسی همراه است، یک کنترل فشار فعال منجر به بهبود ساده عملکرد این سیستم‌ها می‌شود. در نتیجه آن‌ها همچنین

¹. Taguchi

². Tu

³. Ding

⁴. Golinelli.

یک مدار مغناطیسی سیستم هیدرولیکی و دستگاه کنترل فشار کردند. همچنین هیو^۱ و همکاران [۷۲] مطالعه آزمایشگاهی، تحلیلی و طراحی یک دمپر MRF با دو کوئل را مورد بررسی قرار دادند. یک مدل المان محدود برای بررسی عملکرد یک دمپر MR دو کوئل با پیکربندی پیستون‌های متفاوت، شامل تعداد و شکل نوک مخروطی آن بکار گرفته شد. با استفاده از بهینه‌سازی تابع هدف و زبان طراحی پارامتریک^۲، عملکرد دمپینگ بهینه به دست آمد. وینای^۳ و همکاران [۷۳] پس از طراحی و ساخت یک دمپر MR، خصوصیات ارتعاشی یک دمپر MR را بررسی کردند و رابطه دامنه ارتعاشات با افزایش جریان را با استفاده از مشاهدات آزمایشگاهی ارائه کردند. منگال و کومار^۴ [۷۴] نیز یک بهینه‌سازی روی پارامترهای هندسی دمپر MRF با استفاده از تکنیک‌های آزمایشگاهی و عددی (المان محدود) انجام دادند و نتایج را به صورت آزمایشگاهی اعتبار سنجی کردند. نتایج به دست آمده قابل استفاده در دمپرهای اتومبیل و بقیه کاربردها می‌باشند.

۳-۱-۹-۱ مطالعات عددی

از سال ۲۰۰۹ مطالعاتی با رویکرد عددی روی دمپرهای MRF انجام شده است. سوسان^۵ [۷۵]، مدل رئولوژیکال برای سیالات MRF، با ترکیب رفتار شبه نیوتونی در تنش برشی پایین با مدل هرشل-بالکی مدل رئولوژیکال برای سیالات MRF، با ترکیب رفتار شبه نیوتونی در تنش برشی پایین با مدل هرشل-بالکی در تنش برشی بالا که در آن محلول رفتار (غلیظ شدن) از خود نشان می‌دهند ارائه کرد. از مزایای این مدل این بود که در کدهای عددی معمول برای محاسبه جریان MRF در کاربردهای معمول، قابل استفاده است؛ و در این تحقیق حل شبه تحلیلی با نتایج عددی به دست آمده اعتبار سنجی شده است. دومپوس^۶ و همکاران [۷۶] یک مطالعه جامع روی یک یاتاقان گرد MRF، به وسیله دینامیک سیالات محاسباتی و روش المان محدود، انجام دادند و خصوصیات مانده ثوابت اصطکاک و خروج از مرکز محاسبه شدند. پارلاک^۷ و همکاران، [۷۷] یک روش بهینه‌سازی با تابع هدف نیروی کلی دمپر 1000N و ماکزیمم چگالی میدان مغناطیسی یک دمپر MR ارائه

^۱. Hu

^۲. Ansys[APDL]

^۳. Vinay .

^۴. Mangal & kumar

^۵. Susan

^۶. Bompos

^۷. Parlak

کردند. روش المان محدود برای تحلیل میدان مغناطیسی و تحلیل عددی برای تحلیل جریان MR مورد استفاده قرار گرفتند تا مقادیر بهینه پارامترهای طراحی به دست آیند. رویکرد جدید آن‌ها استفاده از میدان مغناطیسی و جریان MR و هم‌زمان تعیین مقادیر طراحی بهینه می‌باشد. دو طرح بهینه دمپر MR به دست آمده ساخته شده و با نتایج آزمایشگاهی اعتبار سنجی شده‌اند. گدیک^۱ و همکاران [۷۸]، به مدل‌سازی عددی دوبعدی جریان سیال MR غیرقابل تراکم پایا و لایه‌ای بین دو صفحه صاف موازی پرداختند. آن‌ها از کد تجاری انسیس فلوئنت^۲ و روش حجم محدود برای محاسبات عددی و همچنین مدول ام اچ دی فلوئنت برای حل معادلات القای مغناطیسی استفاده کردند؛ و بر طبق مشاهدات آن‌ها افزایش میدان مغناطیسی خارجی بکار گرفته شده باعث کاهش سرعت جریان می‌شود. در همان سال امیدبیگی و هاشم‌آبادی [۷۹] یک سیلندر چرخشی دارای خروج از مرکز در یک سیال MR را مورد مدل‌سازی عددی قرار دادند. بر مبنای مطالعات آن‌ها اثرات MR و افزایش درصد وزنی محلول و نسبت خروج از مرکز باعث افزایش لزجت، تنش تسلیم و گشتاور کلی چرخش سیلندر داخلی می‌شود. همچنین علی‌خان و همکاران [۸۰] عملکرد دمپرهای MR با شکل پیستون‌های متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آن‌ها ۶ شکل پیستون متفاوت مورد مدل‌سازی دوبعدی متقارن محوری قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که عملکرد یک کوئل با پیستون که انتهای آن فیلت یا گرد شده بهتر از بقیه اشکال پیستون می‌باشد. چن و شی^۳ [۸۱] یک دمپر چرخشی مگنتورئولوژیکال را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق در فاصله باریک‌بین دو دیسک سیال MR پر شده است. با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و نرم‌افزار فلوئنت، عملکرد دمپر MR چرخشی در دو حالت دیسک موج‌دار و دیسک صاف معمولی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده گشتاور خروجی کلی در حالت استفاده از دیسک موج‌دار از حالت دمپر چرخشی دو دیسک معمولی. اسپین اسکی^۴ و همکاران [۸۲]، یک مدل عددی برای سیال MR که تحت مود فشاری قرار دارد ارائه کردند. در این مدل سیال MR بین دو صفحه موازی قرار دارد که یکی از آن‌ها تحت جابجایی تعیین شده یا نیروی ورودی قرار می‌گیرد. بر مبنای این تحقیق با در نظر گرفتن این نکته

¹. Gedik

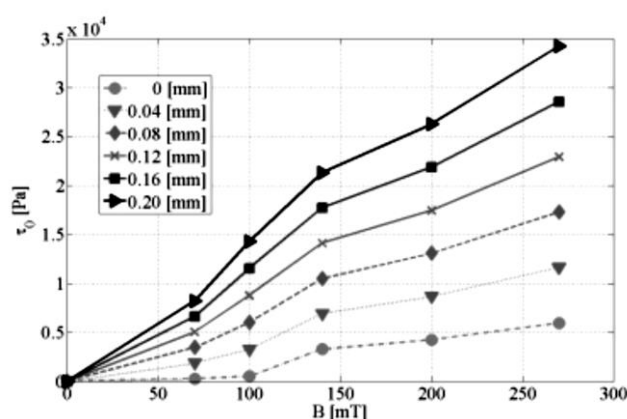
². ANSYS Fluent

³. Chen & Shi

⁴. Sapiński

که تنش تسلیم در مود فشاری علاوه بر چگالی میدان مغناطیسی تابعی از میزان جابجایی نیز هست همخوانی دقیق تری بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی به دست آوردند. نمونه‌ای از نتایج به دست آمده شکل ۱-۲۳ نشان داده شده‌اند.

گلداسز^۱ و همکاران [۸۳] یک دمپر مود فشاری را و با استفاده از رویکرد لزجت ظاهری، مورد مطالعه عددی قراردادند. در این مدل سیال MR بین دو صفحه موازی تحت فشار قرار می‌گیرد. بر مبنای نتایج به دست آمده تنش تسلیم و در نتیجه نیروی دمپینگ در دمپرهای مود فشاری علاوه بر میدان مغناطیسی متناسب با ارتفاع و جابجایی هم تغییر می‌کند.



شکل ۱-۲۳: تابعیت تنش تسلیم از جابجایی و میدان مغناطیسی در مود فشاری [۸۱]

۱-۹-۲ مطالعات انتقال حرارت و اثرات دمایی

مطالعات در زمینه انتقال حرارت و اثرات دمایی روی دمپرهای MRF به نسبت زمینه‌های دیگر کمتر بوده است؛ و در پروسه‌های طراحی و بهینه‌سازی معمولاً لزجت سیال را ثابت و بدون تابعیت دمایی در نظر می‌گیرند در حالی که لزجت در عمل تابع خطی یا غیرخطی از دما می‌باشد و در نتیجه دما روی نیروی دمپینگ مؤثر می‌باشد. مطالعات در این زمینه دارای سه محور تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی می‌باشد.

برس^۲ و گردانی نژاد [۸۴]، یک فرم بی‌بعد از معادلات حاکم را توسعه دادند تا اثر پارامترهای کلیدی را امتحان کنند و ترم‌های بی‌بعد اثر پارامترهای درونی و بیرونی روی روند تولید و پخش حرارت داخل دمپر

^۱. Goldasz .

^۲. Breese

MRF نشان می‌دهند. پارامترهای بی‌بعد به‌دست‌آمده از تحلیل آن‌ها و مفاهیم مربوطه تحلیل شد. آن‌ها در ادامه پژوهش قبلی در همان سال [۴۸]، نتایج آزمایشگاهی درباره افزایش دما یک دمپر سیال MR تحت نیروی مرتعش‌کننده را بررسی کردند. بر طبق نتایج به‌دست‌آمده افزایش دما به دلیل کاهش لزجت باعث کاهش نیرو می‌شود و در حالت غیرفعال کاهش نیرو با افزایش دما کمتر است اما مقدار کلی نیرو از حالت فعال و دارای جریان بیشتر از غیرفعال است. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش جریان انرژی الکتریکی بیشتر شده و در نتیجه دما افزایش میابد و اگر اثر کاهشی افزایش دما روی نیرو از حالت غیرفعال بیشتر شود جریان قطع می‌گردد. برس و همکاران [۸۵] یک مدل تحلیلی برای تولید و پخش انرژی بر مبنای مدل بینگهام پلاستیک در دمپرهای MR ارائه کردند تا توزیع زمانی دما را بیابند. در این تحقیق لزجت به‌صورت تابعی از دما در نظر گرفته شده است که تابعیت آن به‌صورت غیرخطی می‌باشد. با استفاده از این رویکرد این تغییرات نیروی دمپینگ با لزجت در هر دما محاسبه شد. یو^۱ و همکاران [۸۶] یک مدل تئوری برای تغییرات دمایی یک نوع دمپر MR، بر مبنای بقای انرژی و معادلات مقیدکننده پارامترهای طراحی ساختاری توسعه دادند. بر مبنای مطالعات آن‌ها بیشترین عواملی که روی تغییرات دمایی تأثیر می‌گذارند نوع تحریک و جریان ورودی می‌باشند. تابعیت لزجت از دما در نظر گرفته شد و انتقال حرارت تشعشعی نیز در معادلات بقای انرژی محسوب گردید. در این مطالعه افزایش دمای ۴ نوع متفاوت بر مبنای جریان ورودی و دامنه و فرکانس تحریک مورد مقایسه قرار گرفتند.

دگروز^۲ و همکاران [۴۷] با استفاده از پره‌های حرارتی توانستند انتقال حرارت از سطح خارجی دمپر را افزایش داده و در نتیجه افزایش دمای پره را به میزان قابل‌توجهی کنترل کنند سال آلونسو^۳ و همکاران [۸۷] اجزای تشکیل‌دهنده و سیال یک دمپر معمولی دو مخزنه^۴ (غیر MR) را مورد بررسی دمایی قرار دادند. در همان سال باتربی و سیمز^۵ [۸۸] نشان دادند اثرات تغییر دما روی دمپر MR می‌تواند قابل‌توجه باشد. بر مبنای مطالعات آن‌ها تغییرات دما بین ۱۷-۷۵ درجه سانتی‌گراد می‌تواند باعث افت ۳۴٪ لزجت و کاهش ۲۲٪ تنش

^۱. Yu

^۲. Dogruoz

^۳. Alonso

^۴. twin-tube

^۵. Batterbee & Sims

تسلیم و افزایش ۳۰۰ درصدی سختی دمپر گردد. آن‌ها مدل خود را با نتایج آزمایشگاهی اعتبار سنجی کردند. ویلسون^۱ و همکاران [۸۹]، رفتار یک دمپر مگنتورئولوژیکال MR با حرکت خطی را تحت محدوده دمایی ۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد بررسی کردند بر طبق نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق آن‌ها برای دمپر MR، در این محدوده دمایی، دمپینگ پس از تسلیم ۶۰٪-۷۰٪ و نیروی تسلیم ۱۰٪-۲۰٪ کاسته شد. یو^۲ و همکاران [۹۰]، با استفاده از تحلیل المان محدود دمایی اثرات دما روی مقاومت الکتریکی، نفوذپذیری نسبی مغناطیسی، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمای ویژه در دمپرهای MRF را موردبررسی قرار دادند. بر طبق نتایج به‌دست‌آمده توسط آن‌ها با افزایش دما ضریب هدایت حرارتی کاهش و ظرفیت گرمای ویژه افزایش می‌یابد. همچنین اثرات تغییرات دمای سیال روی لزجت و در نتیجه نیروی پس از تسلیم و همچنین اثر گاز گرم شده در انباره روی افزایش سختی دمپر برای یک دمپر با نیروی کم و کورس پایین ساخته‌شده، توسط ساهین^۳ و همکاران [۹۱] بررسی شد. بر مبنای مطالعات آن‌ها در اختلاف دماهای بالا دما پارامتر بسیار مؤثرتری از سرعت دمپر می‌باشد و باید در طراحی و مدل دینامیکی دمپر MR در نظر گرفته شود. اوکالان و مکینلی^۴ [۹۲]، ضمن طراحی و افزایش دامنه عملکرد یک فیکسچر مگنتورئولوژیکال با در نظر گرفتن محدودیت‌های مکانیکی مغناطیسی و دمایی، اثرات افزایش دما بر روی تنش تسلیم ایجادشده ناشی از میدان مغناطیسی را بررسی و مقایسه کردند. سروانکومار^۵ و همکاران [۹۳]، تأثیرات دمایی روی خصوصیات دمپینگ و سختی دمپر را مورد مطالعه تحلیلی قرار دادند؛ و بر مبنای مطالعات آن‌ها افزایش دما اثرات کاهشی روی این خصوصیات دارند. بر مبنای مطالعات آن‌ها لزجت سیال بشدت به نرخ برش و شدت میدان مغناطیسی وابسته است و همچنین خصوصیات دینامیکی مثل ثابت دمپینگ و ثابت سختی که با افزایش دما کاهش پیدا می‌کنند می‌توانند با افزایش شدت میدان مغناطیسی و همچنین کاهش لقی و افزایش نسبت L/D افزایش یابند. همچنین ویلسون^۶ و همکاران [۹۴]، یک دمپر MR با کورس خطی ساختند و خصوصیات آن را تحت محدوده حرارتی ۰ تا ۱۰۰

1. Wilson

2. Yu

3. Şahin

4. Ocalan & McKinley

5. Saravanakumar

6. Wilson

درجه سانتی‌گراد بررسی کردند. بر طبق مطالعات آن‌ها برای میدان مغناطیسی ثابت ۲,۵ آمپر با افزایش دمای ۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد حداکثر نیروی دمپر ۳۷٪ کاهش از خود نشان داد. همچنین ثابت دمپینگ در محدوده دمایی ۰-۱۰۰ درجه به دلیل وابستگی به لزجت ۸۵٪ کاهش داشته است. همچنین نیروی تسلیم ۳۰٪ کاهش از خود نشان داده است. بر مبنای مطالعات آن‌ها افزایش دمای داخلی دمپر بر لزجت و همچنین فشار گاز انبار و در نتیجه سختی دمپر تأثیر می‌گذارد.

۹-۱-۳ مطالعات مربوط به بررسی محدوده فرکانسی دمپرهای MR

ان جویین^۱ و همکاران [۹۵]، یک مدل دینامیکی برای دمپرهای ER ارائه کردند. در این مدل برخلاف مدل شبه استاتیک، اثرات اینرسی سیال و تراکم‌پذیری و همچنین اثر مکانیزم انبار در نظر گرفته شد. بر طبق نتایج به‌دست‌آمده از این مدل در فرکانس‌های پایین و همچنین در نواحی که سرعت پیستون از سرعت صفر بسیار فاصله دارد تطابق خوبی با مدل شبه استاتیک دارد؛ اما در فرکانس‌های بالا مدل دینامیکی ارائه‌شده به دلیل در نظر گرفتن اثر اینرسی سیال، برخلاف مدل شبه استاتیک در نواحی مربوط به دو انتهای کورس، منحنی نیرو-سرعت و نیرو-جابجایی را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند، بر طبق این مدل خاصیت هیستریزیس نمودار نیرو-سرعت ناشی از تراکم ناپذیری سیال می‌باشد که مدل شبه استاتیک قادر به پیش‌بینی این خاصیت نیست. همچنین بر طبق نتایج آن‌ها اثر فشار مکانیزم انبار به‌صورت انتقال منحنی نیرو به سمت بالا و پایین می‌باشد و در خاصیت هیستریزیس تأثیری ندارد.

گلداز^۲ [۹۶] با انجام مقایسه بین نتایج عددی و نتایج حاصل از مدل دینامیکی ارائه‌شده که اثرات اینرسی و تراکم‌پذیری برای یک دمپر MR در نظر می‌گرفت، به این نتیجه رسید که مدل‌های دینامیکی ارائه‌شده نیز در نواحی تشدید و فرکانس‌های بالای ۱۰۰-۱۵۰ هرتز نمی‌تواند به‌خوبی رفتار دمپر را پیش‌بینی کند.

۹-۱-۴ مطالعات مدل‌سازی تحلیلی

تقریباً تمامی مطالعات و تحقیقات مربوط به مدل‌سازی تحلیلی سیالاتی با فرض شبه استاتیک و در حالت پایا

^۱. Nguyen

^۲. Goldasz

انجام شده است که در بخش ۱-۵ به تفصیل مورد مرور و بررسی انجام گرفت.

تنها مطالعه تحلیلی سیالاتی انجام شده با فرض ناپایا، توسط ام یو^۱ و دیگران [۹۷] و برای حالت مود جریانی انجام شده است. در این پژوهش یک دمپر مود جریانی MR که تحت بارگذاری سینوسی قرار دارد مورد مطالعه قرار گرفت و محفظه حلقوی متقارن محوری جریان برای ساده سازی به صورت مستطیلی در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده برای نیروی دمپینگ از این تحلیل نسبت به تحلیل شبه استاتیک مخصوصاً برای حرکت ناپایا و سرعت بالای دمپرهای MR بسیار دقیق تر می باشد؛ و می توان از آن برای طراحی دمپر مود جریانی تحت این شرایط استفاده کرد.

۱-۹-۵ مطالعات مربوط به سیال MR

جولی^۲ و همکاران [۹۸] خواص مغناطیسی و رئولوژیکی چندین نوع سیال مگنتورئولوژیکال تجاری را مورد بحث و بررسی قرار دادند. این سیالات به کمک نمودارهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده اند. بعضی از کاربردهای کنونی این سیالات بررسی شده است. این کاربردها نشان می دهند چگونه باید خواص مواد گوناگون تنظیم شوند تا عملکرد بهینه برای یک کاربرد خاص حاصل گردد. به طور مثال، برای دمپرهای با دامنه نوسان کم استفاده از روغن های با سیال پایه آب مناسب می باشد، در حالیکه در دمپرهای با دامنه نوسان بالا امکان تبخیر آب وجود دارد. بوسیس^۳ و همکاران [۹۹] خواص سیالات مگنتورئولوژیکال و ساختار آنها را مورد بررسی قرار دادند. بر طبق نتایج بدست آمده توسط آنها، با افزایش اندازه ذرات در محدوده ۰٫۱ تا ۱ میکرومتر، پایداری سیالات نسبت به تنش تسلیم افزایش بیشتری از خود نشان می دهد. پایداری سیال به معنی رسوب کمتر سیال با گذشت زمان می باشد. ویوتا^۴ و همکاران [۱۰۰] در مورد ساخت سوسپانسیون های مگنتورئولوژیکال و پایداری آنها تحقیق و بررسی کردند. نتایج آنها نشان می دهد، میزان کافی از محلول پلیمری که ویسکوزیته سیال پایه را بهبود می بخشد، باعث پایداری سیالهای مغناطیسی آبی می شود. که ورلی^۵ و همکاران [۱۰۱] چند

^۱. Yu

^۲. Jolly

^۳. Bossis

^۴. Viota

^۵. Wereley

نمونه سیال مگنتورئولوژیکال دوبرخشی با استفاده از ذرات آهن در مقیاس نانومتر و میکرون تهیه کردند. سیالات مگنتورئولوژیکال متداول از ذرات آهن در مقیاس میکرون تشکیل می‌شوند. در این پژوهش در ساخت سیال MR مخلوطی از ذرات در مقیاس میکرون آهن و ذرات آهن در مقیاس نانو استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، جایگزینی ۲۰ درصد وزنی از ذرات در مقیاس میکرون با نانو ذرات باعث کاهش قابل توجه نرخ ته نشینی و افزایش ۱۵ درصدی تنش تسلیم در میدان مغناطیسی بالا می‌شود. همچنین روزکوفسکی^۱ و همکاران [۱۰۲] لزجت سیال MR را تحت میدان مغناطیسی اندازه‌گیری کردند. هدف این پژوهش تعیین لزجت سیال MR در مقادیر میدان مختلف و تعیین پارامترهای مؤثر در توقف جریان سیال در یک لوله موئین بوده است. نتایج آنها نشان می‌دهد، در جریان الکتریکی ۱/۵ تا ۳ آمپر جریان سیال متوقف می‌شود. جیان^۲ و همکاران [۱۰۳] چند نمونه سیال مگنتورئولوژیکال با سیالات حامل گوناگون تهیه کرده و خواص آنها را مورد بررسی قرار دادند. بر طبق نتایج بدست آمده توسط آنها، ویسکوزیته و تنش تسلیم ارتباط مستقیم با قطر ذرات آهن کربونیل دارند و اسید استئاریک می‌تواند باعث افزایش ویسکوزیته و پایداری سیال بشود. کیم^۳ و همکاران [۱۰۴] سیال مگنتورئولوژیکال را به کمک ذرات آهن کربونیل پخش شده در محلول پلیمری تهیه کردند و مشخصات رئولوژیکی آن را تحت میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار دادند. در تهیه این سیال از محلول پلیمری پایه آبی ساخته شده از اکسید پلی اتیلن به عنوان سیال حامل و آهن کربونیل (CI) استفاده شده است. مطابق نتایج بدست آمده، نسبت رسوب در محلول ساخته شده از اکسید پلی اتیلن نسبت به محلول پایه آبی کندتر کاهش می‌یابد. این بدلیل ممانعت زنجیره های پلی اتیلن در طی فرایند ته نشینی ذرات پودر آهن می‌باشد. همچنین پرمالاسا و همکاران [۱۰۵] نیز خواص مغناطیسی مکانیکی سیالات MR پایه آهنی را مورد پژوهش قرار دادند. ایشان برای ساخت سیال MR از روغن سیلیکون و پودر آهن استفاده کردند. برای جلوگیری از ته نشینی ذرات آهن از گریس استفاده شده است. از لان^۴ [۱۰۶] رفتار سیالات مگنتورئولوژیکال در مد فشاری را مورد بررسی قرار داد. وی در این پژوهش رفتار سه نوع سیال مگنتورئولوژیکال را آزمایش کرد که

¹. Zhang

². Roszkowski

³. Kim

⁴. Azlan

یکی از آن‌ها پایه-آبی و دو سیال دیگر پایه-هیدروکربنی بودند. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که رفتار سیالات MR به حرکت نسبی بین ذرات جامد مغناطیسی و سیال حامل بستگی دارد. گنکالوز^۱ [۱۰۷] رفتار سیالات مگنتورئولوژیکال را در سرعت‌های بالا و نرخ‌های برش بالا مورد بررسی قرار داد در این پژوهش رفتار سیال در سرعت‌های بالا و نرخ‌های برش بالا برای حالت غیرفعال و فعال وسیله‌ی رئومتر بررسی شده است. کایده^۲ و همکاران [۱۰۸] در این پژوهش سه نوع پایدار کننده که از ته نشینی ذرات در سیال مگنتورئولوژیکال جلوگیری می‌کند مورد ارزیابی قرار گرفت. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که رابطه بین نمای غیریوتونی و غلظت پایدار کننده‌ها در روغن مشابه سیالهای مگنتورئولوژیکال می‌باشد. وحید^۳ و همکاران [۱۰۹]، جهت بدست آوردن تنش تسلیم مطلوب، ترکیبهای مختلف از کسر حجمی پودر آهن، سیال پایه و ماده نگهدارنده را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بدست آمده توسط آن‌ها نشان می‌دهد، کسر حجمی پودر آهن بیشترین تاثیر را بر تنش تسلیم و مدول سیال مگنتورئولوژیکال دارد.

بر طبق مرور انجام‌شده روی مطالعات مربوط به دمپرهای MRF در این فصل، باوجود پژوهش‌های انجام‌شده در این مبحث، همچنان خلأ و کمبودهایی در این مطالعات وجود دارد که به‌صورت زیر بیان می‌شود.

۱-۹-۶ نتیجه‌گیری

- طیف زیادی از مطالعات انجام‌شده بر روی مباحث تحلیلی و طراحی و بهینه‌سازی این دمپر‌ها بوده است. تعداد زیادی از مطالعات انجام‌شده با فرض شبه استاتیک می‌باشد. درحالی‌که در عمل برای بسیاری از دمپر‌ها بخصوص در فرکانس‌ها و سرعت‌های بالا، فرض مذکور مطلوب نمی‌باشد. بااین‌حال مطالعات روی دمپرهای MR، با در نظر گرفتن اثرات ناپایا بودن جریان بسیار کم و در مواردی نایاب می‌باشد؛ و مطالعات بسیار اندک انجام‌شده با در نظر گرفتن ترم اینرسی با استفاده از مدل‌سازی‌های دینامیکی انجام‌شده است.
- مطالعات عددی بر روی دمپرهای MRF نسبت به کل مطالعات انجام‌شده درصد کمی را به خود اختصاص می‌دهند.

¹ . Goncalves

² . Kaide

³ .Wahid

- یکی از مشکلات مربوط به دمپرها در حالت کلی گرمای ناشی از انرژی حرارتی ویسکوز و انرژی حاصل از میدان مغناطیسی می‌باشد که موجب بالا رفتن دمای سیال و در نتیجه دمپر می‌شود. از طرفی بسیاری از مطالعات و طراحی‌ها انجام شده بدون در نظر گرفتن اثرات دمایی انجام می‌شود که با توجه به مشکلات مربوط به افزایش دما در این نوع دمپرها فرض صحیحی نمی‌باشد و خلأ مطالعات عددی در این زمینه همچنان وجود دارد. بخصوص با افزایش سرعت، اثرات دمایی می‌تواند قابل توجه باشد. همچنین اثر دما و میدان مغناطیسی بر رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم مورد توجه قرار نگرفته است.

- بررسی رفتار رئولوژیکی سیال‌های MR و ارائه مدل مناسب، یکی از رایج‌ترین موضوعات مورد بحث در مطالعات انجام شده در این زمینه می‌باشد. از دیگر موضوعات مورد بحث در تحقیقات انجام شده در مورد سیال MR، بررسی پایداری سیال و همچنین ترکیبات گوناگون سیال از لحاظ جنس سیال پایه و ذرات جامد، جهت رسیدن به عملکرد بهینه بوده است. تحقیقات جهت تولید سیال MR برای رسیدن به بهترین عملکرد دمپره‌های مگنترئولوژیکال همچنان یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد بررسی در این زمینه می‌باشد.

۱-۱۰ تحقیق حاضر

در این بخش، پژوهش اخیر معرفی شده و مشخصات کلی، اهداف، کاربردها و موارد نوآوری آن مورد بحث قرار می‌گیرد. در پایان مروری اجمالی بر ساختار کلی تحقیق حاضر صورت می‌گیرد.

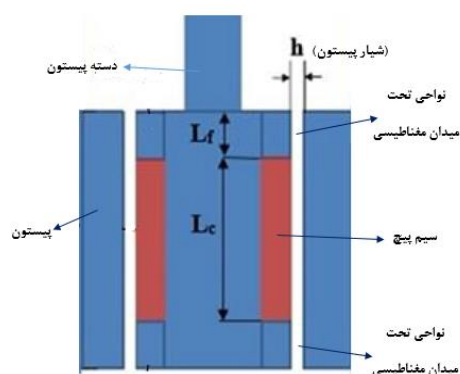
۱-۱۰-۱ مشخصات کلی

هدف از این پژوهش، مدل‌سازی و بررسی پارامتریک یک نمونه دمپر مگنترئولوژیکال دو مخزنه و طراحی و ساخت آن می‌باشد. مدسازی‌های انجام شده در این پژوهش، با در نظر گرفتن اثرات ناپایا بودن جریان، بالا رفتن دمای سیال، اثر میدان مغناطیسی بر رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم و تنش برشی روی دیواره می‌باشند که مبتنی بر مدل غیرنیوتونی اصلاح شده جدید ارائه شده در این پژوهش است.

به این منظور ابتدا سیال بهینه با پایداری مناسب ساخته شد و با استفاده از نتایج به دست آمده از تست‌های رئومتری انجام شده برای سیال ساخته شده، در دما و میدان‌های مغناطیسی مختلف، یک مدل غیرنیوتونی اصلاح شده جدید، به صورت تابعی از دما و میدان مغناطیسی، جهت بررسی رفتار رئولوژیکی سیال و استفاده از

آن در مدل سازی دمپر ارائه شد. همچنین آزمایش های خصوصیت حرارتی، جهت به دست آوردن تابعیت دمایی ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه سیال که در مدل سازی عددی مورد نیاز است انجام شد.

مدل سازی دمپر به روش های تحلیلی شبه استاتیک و ناپایای ارائه شده در این پژوهش و همچنین روش عددی انجام شد. نمایی از پیستون دمپر مورد مطالعه که حل های تحلیلی انجام شده در هر دو ناحیه تحت میدان مغناطیسی و موازی سیم پیچ آن انجام شد، در شکل ۱-۲۴ نشان داده شده است. در حل های تحلیلی، میدان جریان به صورت آرام و توسعه یافته بین دو صفحه موازی و سیال غیرنیوتونی به صورت تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است. حل تحلیلی ناپایا مبتنی بر توسعه مسئله دوم استوکس و با در نظر گرفتن اثر ترم اینرسی، برای جریان سیال غیرنیوتونی مگنتورئولوژیکال در شیار حلقوی دارای حرکت نوسانی و تحت اختلاف فشار پررودیک انجام شد. از مزایای روش عددی، امکان استفاده از لزجت ظاهری به دست آمده از مدل غیرنیوتونی ارائه شده در این پژوهش و در نتیجه در نظر گرفتن اثرات حرارتی و همچنین رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم می باشد. با استفاده از روش های مذکور، میدان جریان، اختلاف فشار بین دو سر پیستون و تنش برشی روی دیواره شیار پیستون، جهت محاسبه نیروی دمپینگ، انرژی دمپینگ، ضریب میرایی و بررسی پارامتریک عملکرد به دست آمد. جزئیات مدل سازی های انجام شده به طور مفصل در فصل سوم توضیح داده می شود. همچنین، با استفاده از مدل سازی عددی و روش مونت کارلو، عرض شیار مناسب جهت رسیدن به حداکثر محدوده دینامیکی ممکن نیز به دست آمده و دمپر مورد نظر ساخته شد.



شکل ۱-۲۴: نمای شماتیک از پیستون دمپر مورد مطالعه

۱-۱۰-۲ اهمیت، کاربرد و ضرورت تحقیق

اهمیت، کاربرد و ضرورت تحقیق حاضر عبارت‌اند از:

۱- کاربردهای گسترده‌ای در صنایع گوناگون مانند، خودروسازی، ساختمان، پل‌ها، پزشکی، هوافضا و غیره

۲- قابلیت‌های ممتاز مانند نیروی دمپینگ بالا و قابل کنترل بودن نسبت به دمپ‌های معمولی، در حال

جایگزینی و گسترش

۳- استفاده از این دمپ‌ها در آینده موردعلاقه صنایع داخلی، به‌خصوص خودروسازی

۴- کمبود مطالعات و تحقیقات انجام‌شده در این حوزه در داخل کشور

۵- نبود مطالعات عددی و تحلیلی و پارامتریک روی دمپ‌های دو مخزنه در مطالعات قبلی

۶- عدم در نظر گرفتن اثرات کاهشی افزایش دما بر دمپینگ در بسیاری از مطالعات قبلی

۷- لزوم ساخت سیال با پایداری مناسب و قابل رقابت با مشابه خارجی

۸- ارائه مدل مناسب جهت پیش‌بینی رفتار رئولوژیکی سیال ساخته‌شده و مدل‌سازی دمپ

۱-۱۰-۳ جنبه‌های نوآوری

از جنبه‌های نوآوری این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- تحلیل عددی جریان و انتقال حرارت ناپایا در دو محیط سیال و جامد برای یک دمپ مگنتورئولوژیکال

دومخزنه و بررسی اثر میدان مغناطیسی، دامنه، فرکانس و تغییرات دمای ناشی از آن‌ها، بر میدان جریان،

ضخامت ناحیه پلاگ، تنش تسلیم، تنش برشی روی دیواره، شار حرارتی روی دیواره شیار، نیروی دمپینگ،

انرژی دمپ شده و ضریب میرایی معادل دمپ

۲- ارائه یک حل تحلیلی شبه استاتیک و ناپایا برای تحلیل جریان سیال مگنتورئولوژیکال در مود جریانی و

بررسی اثر ترم اینرسی بر ضخامت ناحیه پلاگ و اختلاف فاز سرعت و فشار و اثرات عرض شیار و دامنه نوسان

بر خطای حل شبه استاتیک.

۳- مقایسه میزان مطابقت و همگرایی نتایج به‌دست‌آمده از حل‌های عددی ناپایا، تحلیلی ناپایا و شبه

استاتیک

۴- ساخت روغن مگنتورئولوژیکال با رفتار رئولیژیکی مشابه با روغن لرد و مقایسه عملکرد دو روغن

۵- ارائه مدل غیرنیوتونی اصلاح شده جدید و بررسی تابعیت دمایی و میدانی پارامترهای آن

۶- بررسی اثر میدان مغناطیسی و دما بر رفتار سیال مگنتورئولوژیکال در ناحیه پس از تسلیم

۷- بررسی اثر جنس سیال و ماده نگهدارنده بر رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم سیال ساخته شده و عملکرد

دمپر

۱-۱۰-۴ ساختار کلی

به طور کلی ساختار تحقیق حاضر از قرار زیر است

- در فصل دوم، ابتدا مراحل ساخت پنج نمونه سیال مگنتورئولوژیکال با درصد پودر و ماده نگهدارنده متفاوت جهت به دست آوردن سیال بهینه با پایداری مناسب و همزن مکانیکی مورد نیاز توضیح داده شده است. جهت ساخت سیال، آزمایش های اس ای ام^۱ و ای دی ایکس^۲ روی سه نمونه پودر آهن کربونیل انجام شده و پودر با خلوص و اندازه مناسب انتخاب شده است. همچنین چگونگی انجام آزمایش های رئومتری و خصوصیات حرارتی بر روی نمونه سیال بهینه ساخته شده توضیح داده شده و مشخصات دستگاه های رئومتر و اندازه گیری خصوصیات حرارتی بیان شده است.
- در فصل سوم، مدل سازی های انجام شده به هر سه روش تحلیلی شبه استاتیک، تحلیلی ناپایا و عددی به طور کامل تشریح شده است. حل تحلیلی ناپایا، با توسعه حل مسئله دوم استوکس، برای جریان سیال غیر نیوتونی در شیار حلقوی پیستون دارای حرکت نوسانی و با گرادیان فشار پریودیک، ارائه شده است. میدان جریان بر حسب مجهولات اختلاف فشار و مختصات ناحیه پلاگ به دست آمد که با حل یک دستگاه سه معادله سه مجهول غیر خطی، مختصات ناحیه پلاگ و اختلاف فشار در نواحی تحت میدان مغناطیسی و موازی سیم پیچ در عرض شیار پیستون به دست آمده اند. با استفاده از میدان جریان و اختلاف فشار به دست آمده نیروی دمپینگ به دست آمده و بررسی پارامتریک مورد نظر انجام شد. همچنین چگونگی مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار کامسول تشریح شده است.

^۱ SEM

^۲ EDX

- در فصل چهارم نتایج آزمایش‌های رئومتری و خصوصیات حرارتی انجام‌شده ارائه می‌شود و ضمن ارائه یک مدل غیر نیوتونی اصلاح‌شده جدید با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده، اثرات میدان مغناطیسی و دما بر پارامترهای مدل، مورد مطالعه قرار گرفته است. از مزایای دیگر مدل اصلاح‌شده جدید امکان استفاده از آن در مدل‌سازی عددی می‌باشد، بطوریکه نامحدود شدن در حل اتفاق نمی‌افتد و با وجود رفتار دوگانه سیال در ناحیه پس از تسلیم، این مدل، رفتار سیال را به‌صورت تک ضابطه‌ای پیش‌بینی می‌کند. همچنین اثر تغییر پارامترهای مدل ارائه‌شده و اثر جنس سیال و درصد ماده نگهدارنده بر رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم بررسی می‌شود. تشابه رفتار رئولوژیکی سیال ساخته‌شده با روغن لرد، با توجه به قیمت قابل توجه این روغن، از دیگر نتایج ارزشمند به‌دست‌آمده می‌باشد.
- در فصل پنجم، نتایج بدست آمده از مدل‌سازی به روش‌های تحلیلی شبه استاتیک، تحلیلی ناپایا و عددی ارائه و مقایسه شد. اثر ترم اینرسی بر میدان جریان، ضخامت ناحیه پلاگ بی‌بعد، اختلاف فاز سرعت و فشار، عملکرد دمپر و خطای روش شبه استاتیک بررسی شد. سپس با استفاده از لزجت ظاهری به‌دست‌آمده از مدل غیر نیوتونی اصلاح‌شده جدید به‌صورت تابعی از دما و میدان، اثرات افزایش میدان مغناطیسی، دما، دامنه و فرکانس نوسان بر تنش تسلیم، تنش برشی و شار حرارتی روی دیواره شیار، نیروی دمپینگ، انرژی دمپ شده و ضریب میرایی معادل دمپر، در دو حالت بدون میدان مغناطیسی و تحت میدان مغناطیسی اشباع، مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین عدد رینولدز در شیار پیستون، نیز محاسبه شد که طبق نتایج به‌دست‌آمده امکان مغشوش شدن جریان در محدوده سرعت موردنظر وجود ندارد.
- در فصل ششم، با استفاده از مدل‌سازی عددی و روش مونت کارلو، عرض شیار مناسب جهت رسیدن به حداکثر محدوده دینامیکی ممکن نیز به دست آمده و قطعات پیستون دمپر موردنظر ساخته، سیم‌پیچی و مونتاژ شد. همچنین تست‌های نیرویی برای دمپر ساخته‌شده انجام و نتایج حاصل تحلیل شده است.
- در انتهای پژوهش، نتیجه‌گیری از تحقیق انجام‌شده و پیشنهادات جهت ادامه کار ارائه شده است.
- در بخش ضمایم کد حل تحلیلی شبه استاتیک و ناپایای انجام‌شده در نرم افزار متلب و نتایج تست‌های ای دی ایکس انجام‌شده روی سیال ارائه شده است.

- فلوجارت مربوط به کارهای انجام شده در این پژوهش بصورت زیر می باشد



فصل دوم

**ساخت و آزمایش‌های پایداری، رئومتری و خصوصیات
حرارتی سیال مگنتورئولوژیکال**

۱-۲ ساخت همزن مکانیکی و سیال مگنتورئولوژیکال:

سیالات مگنتورئولوژیکال، سوسپانسیون‌های مغناطیسی قابل کنترلی هستند که از فاز پراکنده فعال مغناطیسی، سیال حامل غیر مغناطیسی و عامل پایدارکننده تشکیل شده‌اند. در این پژوهش از پودر آهن کربونیل (بانام تجاری بآسف^۱ آلمان، با چگالی 7.86 gr/cm^3) به عنوان فاز پراکنده مغناطیسی و روغن هیدرولیک کاسپین وی جی^۲ ۴۶ (با لزجت 41.4 cSt) به عنوان سیال پایه استفاده شده و همچنین عامل پایدارکننده این دو فاز، اسید استئاریک می‌باشد که به عنوان افزودنی به ترکیب اضافه می‌شود.

ساختار و اندازه ذرات پودر آهن کربونیل مورد استفاده در این پژوهش توسط تصویر اس ای ام که در شکل ۱-۲ نشان داده شده، به دست آمده و درصد خلوص پودرهای موجود نیز توسط آزمایش ای دی ایکس اندازه گیری شده است. همانطور که نشان داده شده است، قطر ذرات پودر آهن در هر سه نمونه، کمتر از ۱۰ میکرومتر می‌باشد. از بین سه نمونه پودر آهن مورد آزمایش نشان داده شده در شکل ۱-۲، نمونه ۱ دارای درجه خلوص بالاتری (۹۱٪/۵۵) بوده و در نتیجه جهت ساخت سیال مگنتورئولوژیکال مورد استفاده قرار می‌گیرد. وادارندگی مغناطیسی^۳ و قابلیت نفوذپذیری آهن، به شدت وابسته به خلوص آن می‌باشد. از طرف دیگر، بیشترین تنش تسلیم ممکن، متناظر با کمترین میزان وادارندگی مغناطیسی ذرات پودر آهن پراکنده شده می‌باشد [۱۱۰].

۱۱۱]. ترکیب‌های بکار گرفته شده برای ساخت ۵ نمونه سیال مگنتورئولوژیکال مطابق جدول ۱-۲ می‌باشند

جهت ساخت هر یک از نمونه سیال‌های مگنتورئولوژیکال ابتدا سیال پایه و ماده پایدارکننده، به مدت ۱۵ دقیقه توسط همزن مغناطیسی در دمای حدود ۳۵ درجه مطابق شکل ۲-۲-الف مخلوط می‌شوند تا محلول شفاف حاصل شود. سپس پودر آهن به محلول حاصل اضافه شده و به وسیله همزن مکانیکی به مدت ۳۰ دقیقه با دور 3000 rpm مطابق شکل ۲-۲-ب هم زده می‌شود. جهت ساخت همزن مکانیکی، ابتدا یک میله آهنی به قطر ۷ اینچ مطابق شکل ۲-۲-ج فرزکاری شده و سپس با استفاده از مطابق شکل ۲-۴-د حدیده کاری می‌شود. پس از آن پره‌های پلاستیکی مطابق شکل ۲-۲-ه روی قسمت رزوه شده محکم می‌شود. همچنین از

^۱. BASF

^۲. VG

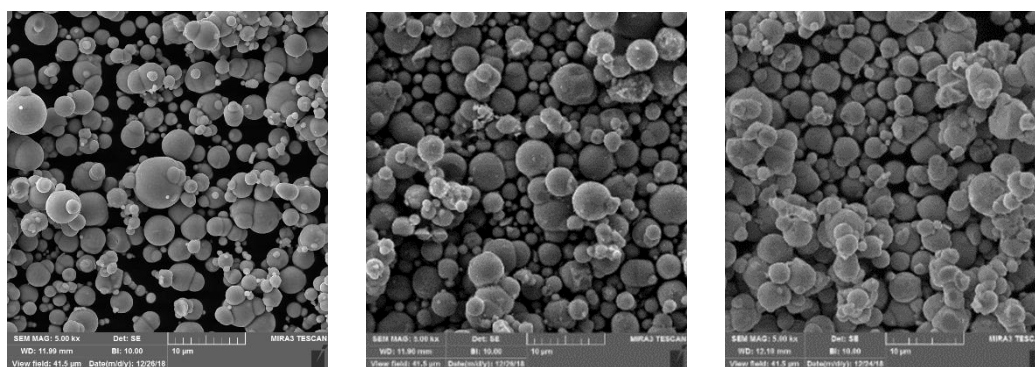
^۳. Coercivity

یک استوانه مدرج پلاستیکی به قطر ۳۰ میلی متر مطابق شکل ۲-۲ و به عنوان محفظه همزن مکانیکی استفاده می شود.

۲-۲ آزمایش پایداری سیال مگنتورئولوژیکال و انتخاب سیال بهینه

با توجه به نمونه های ساخته شده، می توان اثر درصد فاز پراکنده و همین طور عامل پایدارکننده (اسید استئاریک) را بر پایداری سیال مگنتورئولوژیکال بررسی کرد. به این منظور هر یک از نمونه ها حدود یک هفته در یک محل ثابت درون لوله مدرج، مطابق شکل ۲-۳ قرار داده شد. به دلیل تقریباً صفر شدن نرخ ته نشینی اکثر نمونه ها در مدت ۷ روز، این بازه ی زمانی برای بررسی پایداری در نظر گرفته شده است.

درصد ته نشینی عبارت است از نسبت حجم قسمت شفاف سوسپانسیون به حجم کل آن، که توسط رابطه



ج) نمونه ۳

ب) نمونه ۲

الف) نمونه ۱

شکل ۲-۱: تصویر اس ای ام از ساختار و اندازه ذرات سه نمونه پودر آهن کربونیل

جدول ۲-۱: ترکیب های بکار گرفته شده برای ساخت ۵ نمونه سیال مگنتورئولوژیکال

نمونه	درصد وزنی پودر آهن کربونیل	درصد وزنی سیال پایه	درصد وزنی پایدارکننده (اسید استئاریک) ^۱
MRF1	۶۵	۲۲	۳
MRF2	۷۵	۳۲	۳
MRF3	۸۵	۱۲	۳
MRF4	۸۵	۱۳	۲
MRF5	۸۵	۱۴	۱

(۲-۱) به دست می آید. در این رابطه، a ارتفاع سیال شفاف و b ارتفاع قسمت کدر سوسپانسیون می باشد.

^۱. Stearic acid

$$s = \frac{a}{(a+b)} \times 100 \quad (1-2)$$

با توجه به نتایج آزمایش ته‌نشینی، اثر ماده نگه‌دارنده و غلظت فاز پراکنده بر پایداری بررسی شده و سپس سیال بهینه از نظر پایداری و غلظت مناسب، جهت انجام تست‌های رئومتری و مدل‌سازی رفتار سیال و دمپر مگنتورئولوژیکال، انتخاب می‌شود.

۳-۲ آزمایش رئومتری سیال مگنتورئولوژیکال

تست‌های رئومتری در این پژوهش برای سیال بهینه انتخاب‌شده، در مد برشی انجام شده است. این تست‌ها، جهت بررسی اثر میدان مغناطیسی و دما بر خصوصیات رئولوژی سیال مگنتورئولوژیکال ساخته شده و در نتیجه نیروی دمپینگ دمپر انجام می‌شود. در مد برشی با تغییر نرخ برش، لزجت و تنش برشی سیال مگنتورئولوژیکال، تحت میدان‌ها و دماهای مختلف، در نرخ برش‌های $1/S-0,001$ تا $1000/S$ توسط رئومتر (آنتون پار مدل ۳۰۲ ام سی اراتریش) با شیار ۱ میلی‌متر بین صفحات موازی آن اندازه‌گیری شده‌اند.

به این منظور برای هر آزمایش حدود ۵ میلی‌لیتر سیال مگنتورئولوژیکال استفاده شده است. دقت این دستگاه در اندازه‌گیری لزجت دینامیکی برای نمونه‌ی مورد استفاده $\pm 100\text{cp}$ ، در محدوده‌ی نرخ برش مورد نظر است. رئومتر مورد استفاده در آزمایش در شکل ۲-۴ الف نشان داده شده است.

۴-۲ آزمایش خصوصیات حرارتی سیال مگنتورئولوژیکال

اندازه‌گیری ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی سیال در آزمایشگاه موسسه تحقیقاتی پرتاووس مشهد و با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری خصوصیات حرارتی با قابلیت اندازه‌گیری در محدوده دمایی ۵۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و دقت اندازه‌گیری $\pm 0.5\%$ ، مطابق شکل ۲-ب انجام می‌شود. این دستگاه متشکل از سنسورهای تک سوزنه، ظرف شیشه‌ای دوجداره و حمام آب با قابلیت تنظیم دما می‌باشد. به این منظور مطابق شکل ۲-۴ ب سیال در ظرف شیشه‌ای دوجداره قرار گرفته و سنسور مربوطه درون آن قرار می‌گیرد. دمای سیال توسط آبی که بین دوجداره جریان دارد و از حمام آب با قابلیت تنظیم دما که در شکل ۲-۴ ب نشان

¹ MCR

داده شده است تنظیم می گردد.



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

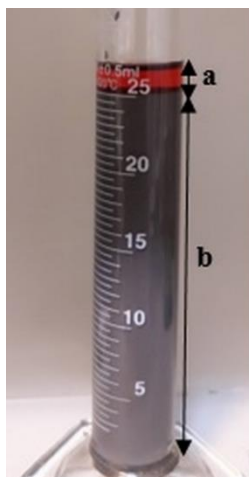


(و)

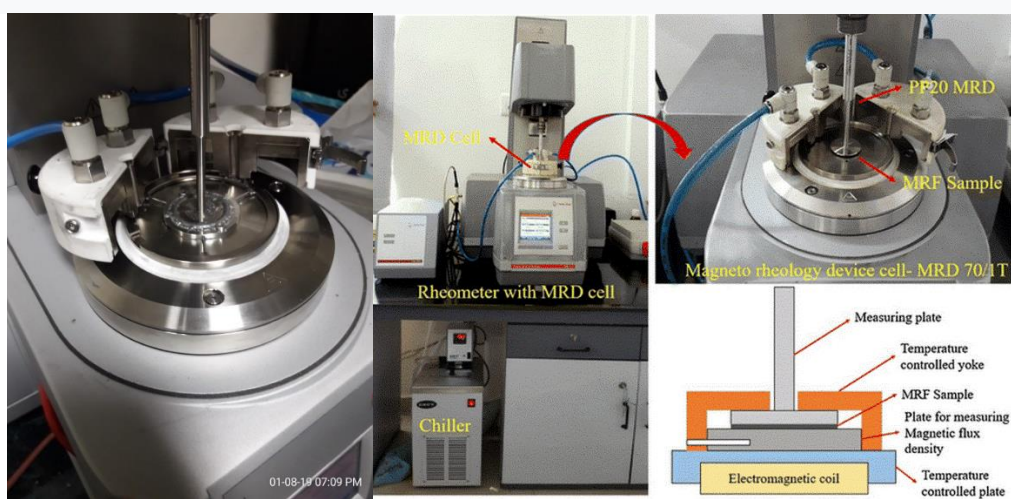


(ه)

شکل ۲-۲: فرزکاری میله همزن مکانیکی (ب) حدیده کاری (ج) میله و پره های پلاستیکی (د) محفظه همزن مکانیکی (ه) همزن مغناطیسی (و) همزن مکانیکی



شکل ۲-۳: تست ته‌نشینی سیال مگنتورئولوژیکال



(الف)



(ب)

شکل ۲-۴: (الف) رئومتر مغناطیسی مدل ام سی آر ۳۰۲ مورد استفاده در آزمایش
(ب) دستگاه اندازه‌گیری خصوصیات حرارتی سیال

¹ MCR302

فصل سوم

**مدل سازی شبه استاتیک، ناپایا و عددی دمپر
مگنتورئولوژیکال دو مخزنه**

۱-۳ مدل سازی میدان جریان و فشار در دمپر مگنتورئولوژیکال دو مخزنه

۱-۱-۳ تعریف مسئله

یک نمای شماتیک از دمپر دو مخزنه مگنتورئولوژیکال مود جریانی و پروفیل سرعت جریان در شیار پیستون در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. قسمت سفید رنگ در این شکل حاوی سیال می باشند. مطابق این شکل، این نوع دمپر از دو سیلندر داخلی و بیرونی تشکیل شده است که با حرکت نوسانی پیستون، روغن به طور متناوب از طریق شیرهای یک طرفه پایینی به فضای بین دو سیلندر وارد و از آن خارج می شود و در نتیجه هوای بین دو سیلندر دائماً فشرده و منبسط می شود. همچنین در اثر حرکت پیستون، روغن در شیار حلقوی داخل پیستون جریان می یابد. در شکل ۱-۳ نواحی داخل شیار که به موازات سیم پیچ هستند تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار نمی گیرند، در حالیکه آن قسمت از نواحی داخل شیار که موازی فلنج هستند مغناطیسی می شوند. در نواحی تحت میدان مغناطیسی، تنش تسلیم و لزجت سیال مگنتورئولوژیکال با افزایش میدان مغناطیسی افزایش می یابد. یک نمای شماتیک از پروفیل سرعت و شرایط مرزی نواحی تحت میدان مغناطیسی در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. در این شکل، در جریان سیال مگنتورئولوژیکال داخل شیار، بخش های ۱ و ۳، ناحیه پس از تسلیم هستند که در آنها تنش برشی بیش از تنش تسلیم است و سیال جریان می یابد و ناحیه ۲، ناحیه جریان پلاگ است که سرعت در عرض این ناحیه ثابت است. در نواحی بدون میدان مغناطیسی به دلیل تنش تسلیم ناچیز، پروفیل سرعت تقریباً به شکل سهمی می باشد. در مدل سازی های انجام شده، توزیع میدان مغناطیسی، در نواحی تحت میدان، به صورت یکنواخت فرض شده است.

۲-۱-۳ معادلات حاکم و معادلات ساختاری

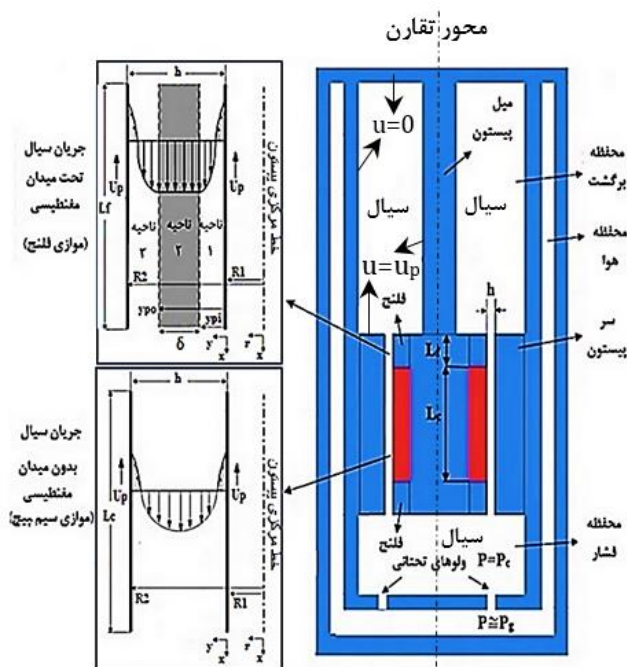
معادلات حاکم عبارت اند از معادلات پیوستگی، ناویراستوکس و انرژی که در حالت کلی به ترتیب به صورت معادلات (۱-۳) بیان می شوند.

$$\nabla \cdot (u) = 0$$

(۱-۳)

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2-3)$$

$$\rho C_p \frac{\partial u}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = \tau : \nabla u + Q \quad (3-3)$$



شکل ۳-۱: نمای شماتیک از دمپر دو مخزنه مگنتورئولوژیکال مود جریانی و پروفیل سرعت جریان در شیار

پیستون

در این معادلات t زمان، U بردار سرعت، ρ چگالی، ∇P گرادیان فشار، T دما و τ تنش برشی می‌باشند.

این معادلات در مدل‌سازی عددی به صورت کامل و در همه نواحی حل می‌شوند و در مدل‌سازی تحلیلی شبه استاتیک و ناپایا، برای جریان سیال داخل شیار پیستون در نواحی تحت میدان مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی، همراه با ساده‌سازی‌هایی که در قسمت بعد بیان می‌شود، حل شده و پروفیل سرعت و گرادیان فشار در شیار جهت محاسبه نیروی دمپینگ به دست می‌آیند.

در این تحقیق، در روش‌های تحلیلی از مدل بینگهام پلاستیک برای تشریح رفتار غیر نیوتونی سیال مگنتورئولوژیکال، استفاده شده است که در این مدل، تنش برشی مطابق معادلات (۳-۴ و ۳-۵) به دست می‌آید [۱۱۲].

$$\tau = \tau_y(H) \text{sign}(\dot{\gamma}) + \mu_p(H) \dot{\gamma} \quad |\tau| > \tau_y \quad (4-3)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad |\tau| \leq \tau_y \quad (5-3)$$

در این معادلات τ تنش برشی، τ_y تنش تسلیم ناشی از میدان مغناطیسی، H شدت میدان مغناطیسی بکار برده شده، μ لزجت پلاستیک سیال و $\dot{\gamma}$ نرخ کرنش برشی می‌باشند. در این پژوهش، در بخش بحث روی نتایج، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده، تابعیت لزجت پلاستیک از میدان مغناطیسی نیز، در مدل سازی در نظر گرفته شده است که در فرمول‌های متداول از آن صرف نظر شده است.

همچنین در مدل سازی عددی، جهت بررسی اثر رقیق شوندگی سیال و مدل سازی دقیق تر، علاوه بر مدل بینگهام پلاستیک، از مدل هرشل بالکلی اصلاح شده جدید ارائه شده در این پژوهش (معادلات (۶-۳) و (۷-۳)) که با استفاده از برازش داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده استفاده می‌شود.

$$\tau = \left(\frac{\tau_y(T, H)}{\sqrt{\dot{\gamma}^2 + \varepsilon^2}} + \tanh\left(2.5 \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c(T, H)}\right) K(T, H) \dot{\gamma}^{n(T, H)-1} \right) \dot{\gamma} \quad |\tau| > \tau_y \quad (6-3)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad |\tau| \leq \tau_y \quad (7-3)$$

در این معادله ثابت n و K مربوط به رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم می‌باشند. همچنین پارامتر ε و $\dot{\gamma}_c$ به ترتیب جهت جلوگیری از نامحدود شدن حل و مدل سازی بهتر رفتار سیال در نواحی دارای نرخ برش پایین به کار گرفته شده‌اند که در بخش مربوط به مدل سازی رفتار سیال مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱-۳ مدل سازی عددی^۱

تحلیل عددی ناپایای تراکم ناپذیر جریان سیال مگنتورئولوژیکال در دمپر مگنتورئولوژیکال دوماخزنه مود جریانی، به صورت دو بعدی و متقارن محوری انجام می‌شود. به این منظور، معادلات پیوستگی، ناویر استوکس و انرژی معادلات (۱-۳)، (۲-۳) و (۳-۳)، به طور کامل برای جریان تراکم ناپذیر سیال مگنتورئولوژیکال در تمام فضای داخل دمپر (شکل ۱-۳) با استفاده از روش اجزای محدود، در نرم افزار کامسول^۲ 5.3a حل شده و میدان جریان، فشار و حرارت به دست آمده جهت بررسی عملکرد دمپر مورد بحث و بررسی قرار گرفته و نیروی دمپینگ، انرژی دمپ شده و ضریب میرایی دمپر محاسبه می‌شوند. گسسته زمانی مکانی به روش اجزای محدود انجام می‌شود. برای حل مسئله ناپایا از حلگر وابسته به زمان و روشهای گسسته سازی زمانی ضمنی BDE

^۱ CFD

^۲ Comsol

استفاده می شود. در این روشها از فرمولهای گسسته سازی پس رو با مرتبه دقت متغیر از ۱ (پس رو اولر) تا ۵ استفاده می شود. روشهای BDE به پایداری معروف می باشند. جهت بررسی استقلال از گام زمانی، گامهای زمانی بر حسب فرکانس نوسان به صورت $0.005/f$, $0.01/f$, $0.02/f$ و $0.05/f$ در نظر گرفته شده است.

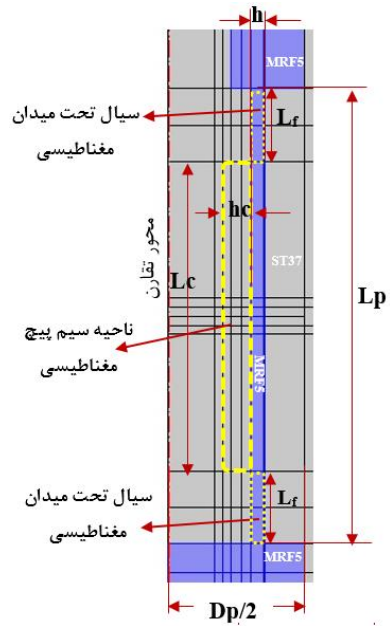
هنگام حل یک مدل چندفیزیکی، دو رویکرد وجود دارد که می تواند به عنوان توصیفی از راه حل برای حل دستگاه معادلات غیرخطی مورد استفاده قرار گیرد. رویکرد Fully Coupled، سیستم بزرگ واحدی از معادلات را تشکیل می دهد که برای همه مجهولات (میدانها) حل می شود و شامل همه کوپلینگ های بین مجهولات (اثرات مولتی فیزیک) به صورت یکجا و در یک تکرار واحد می باشد. از سوی دیگر در بیان تفاوت رویکرد حل Fully Coupled با Segregated میتوان به این اشاره کرد که رویکرد Segregated برای همه مجهولات در یک زمان حل نمی شود و مسئله را به دو یا چند مرحله Segregated Steps تقسیم می کند. رویکرد Segregated به حافظه کمتری نیاز دارد و در کل می تواند سریعتر باشد. در این پژوهش از این رویکرد برای حل معادلات استفاده شده است.

برای مدل سازی لزجت دینامیکی سیال غیر نیوتونی مگنتورئولوژیکال درروش عددی، جهت جلوگیری از نامحدود شدن در حل عددی وابسته به زمان و همچنین مدل سازی دقیق تر رفتار سیال، از یک مدل هرشل بالکلی اصلاح شده جدید (روابط (۳-۶) و (۳-۷)) که از برازش داده های آزمایشگاهی به دست آمده و برای اولین بار در این پژوهش ارائه می شود استفاده شده است. همچنین مدل سازی حرکت پیستون دمپر با استفاده از روش مش متحرک انجام شده است. استقلال حل از شبکه مورد بررسی قرار گرفته و تعداد مش مورد استفاده جهت مدل سازی، ۳۷۴۵۰ مش کوآد^۱ می باشد. توزیع میدان مغناطیسی در ناحیه تحت میدان یکنواخت فرض می شود. نمایی از پیستون و نواحی تحت میدان مغناطیسی در شیار پیستون در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. ابعاد مربوط به پیستون و مدار هیدرولیکی و مغناطیسی در جدول ۳-۱ ارائه شده است. ابعاد کامل هندسه دمپر در پیوست ۳ نشان داده شده است. شرایط مرزی مورد استفاده روی دیواره های ثابت، متحرک و شیرهای یک طرفه خروجی در جدول ۳-۲، آورده شده است.

^۱. Quad

جدول ۳-۱: ابعاد هندسی

اندازه	پارامتر هندسی
۱/۵ میلیمتر	h (عرض شیار)
۸ و ۴ میلیمتر	L _f (طول فلنج)
۵۰ میلیمتر	L _p (طول پیستون)
۳۰ میلیمتر	D _p (قطر پیستون)
۴۲ و ۳۴ میلیمتر	(L _c) طول ناحیه سیم پیچ
۳ میلیمتر	h _c (عرض ناحیه سیم پیچ)



شکل ۳-۲: هندسه مربوط به پیستون و مدار هیدرولیکی و

مغناطیسی

جدول ۳-۲: شرایط مرزی حل عددی

$u = u_p = A\omega \cos(\omega t)$	دیواره پیستون
$u = u_p = A\omega \cos(\omega t)$	دیواره میل پیستون
If $\text{sgn}(u_p) > 0$ then $p_c(\text{rebound}) = p_g - \Delta p_{\text{valve}}$ Else $p_c(\text{compersion}) = p_g + \Delta p_{\text{valve}}$	ولو پایینی
$-n \cdot (-k \nabla T) = U \cdot (T_{\text{ext}} - T)$	شرط مرزی دما در دیواره سیلندر
$T = T_0$	دما در انتهای دمپر
$Q = R I^2$	منبع حرارتی کویل

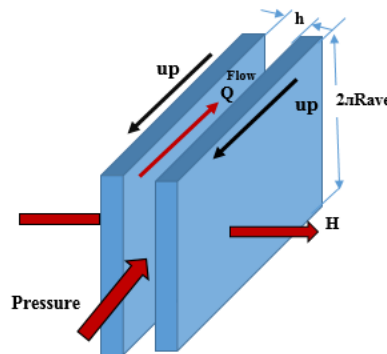
۳-۱-۴ مدل سازی تحلیلی

۳-۱-۴-۱ فرضیات و معادلات حاکم

فرمول متداول برای به دست آوردن نیروی دمپینگ در دمپرهای مگنتورئولوژیکال مود جریانی مطابق رابطه (۸-۳) می باشد [۱۱۲]. در این رابطه، μ_0 لزجت در حالت بدون میدان، L طول پیستون، Q دبی عبوری از داخل شیار، h عرض شیار، L_f طول ناحیه تحت میدان مغناطیسی و A_p مساحت سطح مقطع پیستون می باشند. همچنین w در شکل ۳-۲ که نشان دهنده فرض مدل صفحات موازی می باشد، نشان داده شده است.

$$F_d = F_\eta + F_\tau = \frac{12\mu_0 L Q}{wh^3} A_p + \frac{c L_f \tau_y \text{sgn}(u_p)}{h} A_p + p_c (A_r) + \text{sign}(\text{Real}(u_p)) F_s \quad (۸-۳)$$

این رابطه با فرض شبه استاتیک و برای یک ولو با دیواره های ثابت به دست آمده است که در آن اثر میدان مغناطیسی بر لزجت پلاستیک و تنش برشی روی دیواره در محاسبه نیروی دمپینگ اعمال نشده است. همچنین جریان سیال در نواحی بدون میدان کاملاً نیوتونی فرض شده و از اثر حرکت دیواره و ترم اینرسی صرف نظر شده است. اثرات فشار محفظه فشار (p_c) و اصطکاک کلمب (F_s) در رابطه (۸-۳) اضافه شده است.



شکل ۳-۲: جریان داخل شیار به صورت جریان دوبعدی بین دو صفحه موازی

در این پژوهش، جهت بررسی اثر میدان مغناطیسی بر لزجت پلاستیک و رفتار جریان سیال و دمپر مگنتورئولوژیکال در ناحیه پس از تسلیم، اثر تنش برشی سیال روی دیواره شیار دمپر مود جریانی بر نیروی دمپینگ و اثر میدان مغناطیسی بر آن و همچنین تأثیر ترم اینرسی و حرکت دیواره پیستون بر عملکرد دمپر، علاوه بر مدل سازی عددی، از دو روش تحلیلی شبه استاتیک و ناپایا استفاده می شود که در این پژوهش ارائه شده اند. ابتدا یک حل شبه استاتیک برای جریان سیال مگنتورئولوژیکال داخل شیار حلقوی، با در نظر گرفتن حرکت دیواره های شیار و با استفاده از مدل صفحات موازی ارائه می شود. سپس ضمن ارائه یک حل

ناپایا بر مبنای توسعه مسئله دوم استوکس [۱۱۳] برای جریان سیال غیرنیوتونی مگنتورئولوژیکال در شیار حلقوی دارای حرکت نوسانی و تحت اختلاف فشار پریودیک، پروفیل سرعت و اختلاف فشار بین دو سر شیار، جهت محاسبه نیروی دمپینگ، با استفاده از هر دو روش به دست می‌آید.

در حلهای تحلیلی شبه استاتیک و ناپایا، فرضیات مشترکی در نظر گرفته شده است که در ادامه بیان می‌شود. در هر دو روش تحلیلی، از مدل بینگهام پلاستیک برای مدل کردن رفتار غیر نیوتونی جریان سیال مگنتورئولوژیکال استفاده شده است. از آنجایی که نسبت عرض شیار (h) به شعاع متوسط (R_{ave}) شیار کوچک است، $h/R_{ave} \ll 1$ ، در نتیجه جریان داخل شیار به صورت جریان دوبعدی بین دو صفحه موازی که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است در نظر گرفته می‌شود. این فرض به طور متداول برای تقریب رفتار سیال مگنتورئولوژیکال در هندسه‌های حلقوی، مورد استفاده قرار می‌گیرد و در طراحی‌های عملی با خطایی کمتر از ۵٪، مناسب به نظر می‌رسد [۱۱۴، ۱۱۵، ۱۱۶]. با توجه به این فرض، توزیع میدان مغناطیسی و در نتیجه تنش تسلیم در عرض شیار ثابت خواهد بود و در معادلات ظاهر نمی‌شود، ولی از طریق شرایط مرزی ناحیه پلاگ بر حل معادله مومنتوم و میدان سرعت و فشار به دست آمده تأثیر گزار می‌باشد. برای جریان دو بعدی، معادلات پیوستگی و مومنتوم در حالت کلی بصورت معادلات (۳-۹-الف) می‌باشند.

$$\left(\frac{\partial u_{abs}}{\partial x} + \frac{\partial v_{abs}}{\partial y}\right) = 0 \quad (۳-۹-الف)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_{abs}}{\partial t} + \left(u_{abs} \frac{\partial u_{abs}}{\partial x} + v_{abs} \frac{\partial u_{abs}}{\partial y} \right) \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_p \left(\frac{\partial^2 u_{abs}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{abs}}{\partial y^2} \right) \quad (۳-۹-ب)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_{abs}}{\partial t} + \left(u_{abs} \frac{\partial v_{abs}}{\partial x} + v_{abs} \frac{\partial v_{abs}}{\partial y} \right) \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_p \left(\frac{\partial^2 v_{abs}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_{abs}}{\partial y^2} \right) \quad (۳-۹-ج)$$

این معادلات، با استفاده از تحلیل ابعادی یا آنالیز مرتبه بزرگی می‌توانند ساده شوند. برای استفاده از این آنالیز در هر نقطه $x \sim L_p$ ، $y \sim h$ و $u_{abs} \sim U_w$ در نظر گرفته می‌شود. بیشترین سرعت سیال روی دیواره پیستون می‌باشد. در این صورت با استفاده از معادله پیوستگی و آنالیز ابعادی سرعت در راستای y بصورت $v_{abs} \sim \frac{U_w h}{L_p}$ تقریب زده می‌شود. با توجه به اینکه نسبت عرض به طول شیار کوچک می‌باشد ($h/L_p \ll 1$)، بعد سرعت عمودی در این معادله قابل چشمپوشی بوده ($v_{abs} = 0$) و معادله پیوستگی بصورت $\frac{\partial u_{abs}}{\partial x} = 0$

ساده می شود. در نتیجه، جریان سیال مگنتورئولوژیکال در شیار داخل پیستون به صورت کاملاً توسعه یافته در نظر گرفته می شود. با فرضیات مذکور برای حل تحلیلی جریان سیال مگنتورئولوژیکال، در حالت کلی معادله مومنوم، برای مدل های تحلیلی ناپایا به صورت معادله (۳-۹-۵) ساده می شود.

$$\frac{dp}{dx} = +\mu_p \frac{\partial^2}{\partial y^2}(u_{abs}) - \rho \left(\frac{\partial u_{abs}}{\partial t} \right) \quad (۳-۹-۵)$$

ویسکوزیته پلاستیک در حالت اشباع مغناطیسی از مرتبه 10^{-2} و چگالی از مرتبه 10^3 است. از طرفی در سرعت های پایین (بطور مثال $A=0.025, \omega=0.5\text{Hz}$)، سرعت از مرتبه 10^{-2} می باشد. با در نظر گرفتن زمان به صورت $t \sim Lp/Uw$ ، زمان از مرتبه 10^{-4} خواهد بود. در نتیجه ترم اینرسی از مرتبه 10^{-4} و ترم ویسکوز از مرتبه 10^{-4} بدست می آیند. بنابراین در سرعت های پایین، از ترم اینرسی در معادله (۳-۹-۵) صرف نظر شده و با در نظر گرفتن $u_{abs} = -u_p + u_{rel}$ ، معادله مومنوم، به شکل معادله (۳-۹-۵) ساده می شود که مربوط به حل شبه استاتیک می باشد.

$$\frac{dp}{dx} = +\mu_p \frac{\partial^2}{\partial y^2}(u_{rel}) \quad (۳-۹-۵)$$

به دلیل حرکت جریان سیال داخل پیستون متحرک، یک دستگاه مختصات غیر اینرسی که با سیستم در حال شتاب گرفتن حرکت می کند می تواند استفاده شود [۱۱۳]. در اینجا فرض شده است که دستگاه مختصات غیر اینرسی به پیستون متصل است؛ بنابراین شتاب مطلق a_{abs} ، سرعت مطلق U_{abs} یک ذره، بر حسب مقادیر نسبی آن به صورت زیر می تواند بیان شود.

$$u_{abs} = -u_p + u_{rel} \quad (۳-۱۰)$$

$$a_{abs} = -a_p + a_{rel} \quad (۳-۱۱)$$

در این مسئله، پیستون دارای جابجایی نوسانی پریودیک سینوسی ($u_p = A\omega \cos(\omega t)$) می باشد.

با توجه به شکل ۳-۱، شرایط مرزی جریان سیال مگنتورئولوژیکال در شیار حلقوی داخل پیستون، در جدول ۳-۳ داده شده است. همچنین گرادیان سرعت روی مرزهای ناحیه پلاگ برابر صفر می باشد.

۳-۱-۴ حل تحلیلی شبه استاتیک

در حل شبه استاتیک با صرف نظر کردن از ترم اینرسی در معادله مومنتوم، انتگرال گیری مستقیم از معادله (۳-۹) و اعمال شرایط مرزی، معادلات سرعت در نواحی پلاگ و پس از تسلیم ۱، ۲ و ۳ به ترتیب به صورت معادلات (۳-۱۲-۱۴) به دست می آید.

$$u_{rel1}(y) = -\frac{\Delta p_{MR}}{2\mu L_f} \left((y^2) - 2y_{pi}y \right) \quad (۳-۱۲)$$

$$u_{rel2}(y) = \frac{\Delta p_{MR}}{2\mu L_f} (y_{pi}^2) \quad (۳-۱۳)$$

$$u_{rel3}(y) = -\frac{\Delta p_{MR}}{2\mu L_f} (y^2 - 2y_{po}y + h(2y_{po} - h)) \quad (۳-۱۴)$$

در این حل، برخلاف فرمول متداول برای دمپرهای مود جریانی (رابطه (۳-۸)) [۱۱۲] اثر حرکت دیواره ها و همچنین اثر میدان مغناطیسی بر لزجت پلاستیک در محاسبه میدان جریان و گرادین فشار در شیار لحاظ شده است. همچنین، با استفاده از میدان جریان به دست آمده، دبی حاصل از عبور جریان سیال مگنتورئولوژیکال غیرنیوتونی از داخل شیار پیستون، از رابطه (۳-۱۵) به دست می آید.

افت فشار و مختصات مربوط به ناحیه پلاگ، در نواحی تحت میدان مغناطیسی داخل شیار پیستون با استفاده از سه معادله، برابری دبی حجمی سیال جابجا شده توسط پیستون با دبی جریان داخل شیار، معادله (۳-۱۵)، معادله حاصل از تعادل نیرویی در ناحیه پلاگ، رابطه (۳-۱۶) و ثابت بودن سرعت در عرض ناحیه پلاگ، مطابق رابطه (۳-۱۷) به دست می آیند. کد متلب مربوط به این حل در پیوست ضمیمه شده است.

همچنین می توان با استفاده از روابط (۳-۱۲-۲۰) به رابطه ۳-۲۱ رسید؛ که در این رابطه $\bar{\delta}$ ، ضخامت ناحیه پلاگ بی بعد می باشد. این رابطه برای جریان سیال مگنتورئولوژیکال داخل شیار پیستون با حرکت نوسانی بر حسب ضخامت بی بعد ناحیه پلاگ و با در نظر گرفتن حرکت نوسانی دیواره های شیار برای اولین بار در این پژوهش ارائه شده است. افت فشار در نواحی بدون میدان مغناطیسی، Δp_{off} نیز به روش مشابه به دست

می‌آید. با قرار دادن رابطه (۳-۱۶) و (۳-۲۰) در رابطه (۳-۲۱) و بازآرایی آن به رابطه (۳-۲۲) می‌رسیم که از این رابطه نیز می‌توان برای محاسبه افت فشار استفاده کرد

جدول ۳-۳: شرایط مرزی حل تحلیلی:

مختصات	شرایط مرزی
$y=0$	$u_{abs} = -u_p$
$y=y_{pi}$	$\frac{\partial(u_{abs})}{\partial y} = 0$
$y=y_{po}$	$\frac{\partial(u_{abs})}{\partial y} = 0$
$y=h$	$u_{abs} = -u_p$

$$Q_p = 2\pi R_{ave} \left(\int_0^{y_{pi}} u_{abs1}(y,t) dy + \int_{y_{pi}}^{y_{po}} u_{abs2}(y,t) dy + \int_{y_{po}}^h u_{abs3}(y,t) dy \right) \quad (3-15)$$

$$\delta = y_{po} - y_{pi} = 2\tau_y L_f \text{sign}(U_p) \Delta P_{on}^{-1} \quad (3-16)$$

$$u_{abs1}(y_{pi}) = u_{abs3}(y_{po}) \quad (3-17)$$

$$h = y_{po} + y_{pi} \quad (3-18)$$

$$\delta = y_{po} - y_{pi} \quad (3-19)$$

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{h} \quad (3-20)$$

$$\Delta P_{MR} = \frac{12\mu L_f (A\omega(A_p - A_r + 2\pi R_{ave}h)\cos(\alpha t))}{\pi R_{ave}h^3(2 + (\bar{\delta})^3 - 3(\bar{\delta}))} \quad (21-3)$$

$$\Delta P_{MR}^3 - (C' + 3B')\Delta P_{MR}^2 + 4B'^3 = 0 \quad (22-3)$$

$$C' = \frac{12\mu L_f}{bh^3} (Q_p + bhu_p) \quad (23-3)$$

$$B' = \frac{L_f \tau_y \text{sign}(u_p)}{h} \quad (24-3)$$

۳-۴-۱-۳ مدل سازی تحلیلی ناپایا

حل تحلیلی معادلات حاکم برای جریان های ناپایا پیچیده است. با استفاده از روش بکار گرفته شده در این پژوهش، معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی، به معادلات دیفرانسیل معمولی ساده می شود. با توجه به اینکه مسئله حاضر، شامل مرزهای دارای حرکت نوسانی و توام با گرادیان فشار پریودیک می باشد، در این مطالعه یک حل تحلیلی ناپایا، با توسعه حل مسئله دوم استوکس [۱۱۷]. برای حل جریان سیال غیر نیوتونی در شیار حلقوی پیستون دارای حرکت نوسانی و با گرادیان فشار پریودیک، ارائه شده است. در این نوع مسائل با نوسان بلندمدت، از جریان گذرای اولیه صرف نظر شده [۱۱۳] و حل نوسانی میدان جریان به فرم رابطه (۲۵-۳)، می تواند بیان شود. همچنین گرادیان فشار در این مسئله به فرم کلی معادله (۲۶-۳) تعریف می شود. در این رابطه سرعت و شتاب پیستون به فرم معادلات (۲۷-۳) و (۲۸-۳) در نظر گرفته شده اند.

$$u_{rel}(y, t) = \bar{u}_{rel}(y) \exp(i\alpha t) \quad (25-3)$$

$$\frac{dp}{dx} = -\rho K \exp(i\alpha t) \quad (26-3)$$

$$u_p = A\omega \exp(i\alpha t) \quad (27-3)$$

$$a_p = Ai\omega^2 \exp(i\alpha t) \quad (28-3)$$

$$u_{\text{abs}}(y, t) = -A\omega \exp(i\omega t) + \bar{u}_{\text{rel}}(y) \exp(i\omega t) \quad (29-3)$$

$$\frac{dp}{dx} = -\rho |K| e^{\phi} \exp(i\omega t) \quad (30-3)$$

با توجه به روابط (۲۵-۳) و (۳۰-۳)، آرگومان مقدار مختلط K ، مربوط به اختلاف فاز بین میدان جریان و گرادیان فشار می‌باشد؛ بنابراین با استفاده از این روش، اختلاف فاز سرعت و گرادیان فشار به راحتی قابل محاسبه خواهد بود. در این روش ابتدا میدان جریان برحسب متغیر مجهول K که مربوط به اختلاف فشار می‌باشد و مختصات ناحیه پلاگ به دست می‌آید. به این منظور با جایگذاری روابط (۲۵-۳) و (۲۶-۳) در رابطه (۹-۳)، معادله (۳۱-۳) به دست می‌آید. با حل این معادله و با استفاده از شرایط مرزی جدول ۲-۳، پروفیل سرعت نسبی برحسب متغیر مجهول K و مختصات مجهول ناحیه پلاگ، y_{pi} و y_{po} مطابق به دست می‌آید. پروفیل سرعت نسبی در نواحی تحت میدان مغناطیسی داخل شیار، مطابق روابط (۳۲-۳) به دست می‌آید. رابطه (۳۲-۳) و (۳۳-۳) به ترتیب سرعت نسبی در نواحی پس از تسلیم ۱ و ۳ و رابطه (۳۴-۳) سرعت در ناحیه پلاگ، ناحیه ۲ را نشان می‌دهد. سرعت مطلق در هر سه ناحیه با استفاده از رابطه (۲۹-۳) قابل محاسبه است. برای به دست آوردن افت فشار در نواحی داخل شیار، دستگاه سه معادله مجهول غیرخطی شامل معادلات ۱- برابری دبی جریان عبوری گذرنده از شیار داخل پیستون با حجم سیال جابجا شده با پیستون در واحد زمان، معادله (۳۵-۳)، ۲- معادله حاصل از تعادل نیرویی در ناحیه پلاگ معادله (۳۶-۳) و ۳- معادله حاصل از برابری سرعت در مرزهای ناحیه پلاگ، معادله (۳۷-۳) باید حل شود. مجهولات این دستگاه سه معادله سه

$$\nu_p \bar{u}_{\text{rel}}(y)'' - i\omega \bar{u}_{\text{rel}}(y) = -(K + Ai\omega^2) \quad (31-3)$$

$$u_{\text{rel1}}(y, t) = \left\{ \begin{array}{l} -\frac{\exp\left(-2\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{pi}\right) \left(\frac{K}{i\omega} + A\omega\right)}{\exp\left(-2\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{pi}\right) + 1} \exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y\right) \\ -\frac{\frac{K}{i\omega} + A\omega}{\exp\left(-2\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{pi}\right) + 1} \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y\right) + \frac{K}{i\omega} + A\omega \end{array} \right\} \exp(i\omega t) \quad (32-3)$$

(۳۳-۳)

$$u_{rel3}(y, t) = \left\{ \begin{array}{l} -\frac{\exp\left(-2\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot y_{po}\right) \left(\frac{K}{i\omega} + A\omega\right)}{\exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot h - 2\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot y_{po}\right) + \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot y_{pi}\right)} \exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot y\right) \\ -\frac{\frac{K}{i\omega} + A\omega}{\exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot h - 2\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot y_{po}\right) + \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot y_{pi}\right)} \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot y\right) + \frac{K}{i\omega} + A\omega \end{array} \right\} \exp(i\omega t)$$

(۳۴-۳)

$$u_{rel2}(y, t) = \left\{ \begin{array}{l} -\frac{\exp\left(-2\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot y_{po}\right) \left(\frac{K}{i\omega} + A\omega\right)}{\exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot h - 2\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot y_{po}\right) + \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot y_{pi}\right)} \exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot y_{po}\right) \\ -\frac{\frac{K}{i\omega} + A\omega}{\exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot h - 2\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot y_{po}\right) + \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot y_{pi}\right)} \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{v}} \cdot y_{po}\right) + \frac{K}{i\omega} + A\omega \end{array} \right\} \exp(i\omega t)$$

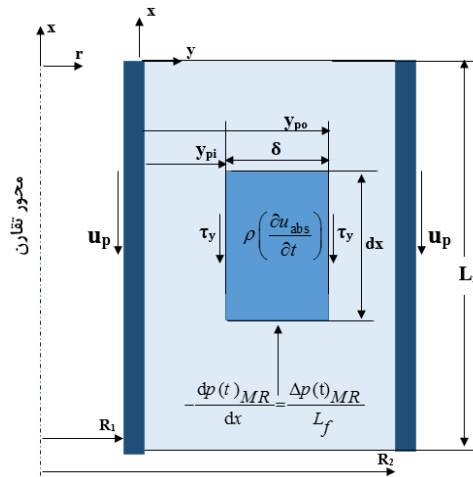
مجهول غیرخطی، شامل K ، y_{pi} و y_{po} می‌باشند؛ که این دستگاه با استفاده از روش‌های تکرار در نرم‌افزار متلب حل می‌شود و کد مربوطه در پیوست ضمیمه شده است.

$$2\pi R_{ave} \left(\int_0^{y_{pi}} u_{abs1}(y, t) dy + \int_{y_{pi}}^{y_{po}} u_{abs2}(y, t) dy + \int_{y_{po}}^h u_{abs3}(y, t) dy \right) = A\omega \exp(i\omega t) (A_p - A_r) \quad (۳۵-۳)$$

$$\delta(t) = y_{po} - y_{pi} = 2\tau_y \cdot \text{sign}(\text{Real}(u_p)) \left(\frac{\Delta P(t)_{MR}}{L_f} - \rho \frac{\partial u_{abs2}(y, t)}{\partial t} \right)^{-1} \quad (۳۶-۳)$$

$$u_{abs1}(y_{pi}, t) = u_{abs3}(y_{po}, t) \quad (۳۷-۳)$$

رابطه (۳۶-۳)، مربوط به تعادل نیرویی در ناحیه پلاگ با توجه به شکل ۳-۳ به دست می‌آید.



شکل ۳-۳: تعادل نیرویی در ناحیه پلاگ

با حل این دستگاه علاوه بر افت فشار، مختصات ناحیه پلاگ در هر لحظه و در نتیجه تغییرات ضخامت ناحیه پلاگ بازمان از رابطه (۳-۳۶)، قابل محاسبه خواهد بود. با جایگذاری مقدار K به دست آمده در رابطه (۳-۳۸-الف)، افت فشار در هر لحظه به دست می آید. همچنین اختلاف فاز جریان سیال غیر نیوتونی با گرادیان فشار، در نواحی تحت میدان مغناطیسی، با استفاده از آرگومان مقدار مختلط K به دست آمده قابل محاسبه می باشد. افت فشار در نواحی بدون میدان مغناطیسی نیز به روش مشابه به دست می آید.

$$\Delta P(t)_{MR} = \rho L_f |K_{MR}| e^{\phi_{MR}} \exp(i\alpha t) \quad (۳-۳۸-الف)$$

۳-۲ محاسبه نیروی دمپینگ

با استفاده از مجموع اختلاف فشارهای به دست آمده در نواحی تحت میدان مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی، اختلاف فشار بین دو سر پیستون به دست می آید و سپس با در نظر گرفتن فرایند فشردگی و انبساط گاز بین دو سیلندر به صورت فرایند پلی تروپیک [۱۱۸] و استفاده از فرمول های جبری متداول برای ولو [۱۱۹]، نیروی دمپینگ مطابق رابطه (۳-۳۸-ب) به دست می آید.

$$F_d(t) = -((\Delta p(t)_{On} \times 2L_f + \Delta p(t)_{off} \times L_c)(A_p - A_r) + p_c(A_r) + \text{sign}(\text{Real}(u_p))F_s + \tau_{won}A_{won} + \tau_{woff}A_{woff}) \quad (۳-۳۸-ب)$$

که در این رابطه p_c ، فشار در محفظه پایین پیستون، مطابق شکل ۳-۱، از رابطه (۳-۳۹) به دست می آید

$$p_c = p_g \pm \Delta p_{valve} \quad (۳-۳۹)$$

p_g ، فشار گاز در محفظه بین دو سیلندر (با فرض فرایند پلی ترپیک) و افت فشار شیر [۱۱۹] به ترتیب از روابط (۴۰-۳) و (۴۱-۳) به دست می آیند.

$$p_g = p_0 \left(\frac{V_0}{V_0 + A_r X_p(t)} \right)^n \quad (40-3)$$

$$\Delta p_{\text{valve}} = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Q_{\text{valve}}}{C_d A_{\text{valve}}} \right)^2 \quad (41-3)$$

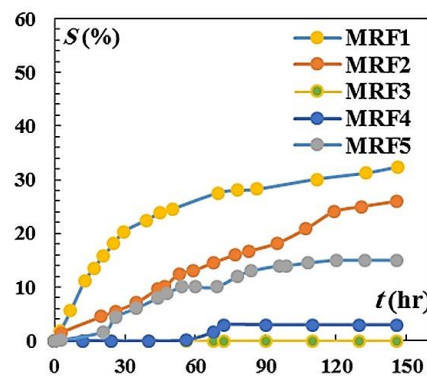
که در این روابط دبی عبوری از شیر و جابجایی پیستون به ترتیب برابر Q_{valve} و $X_p(t)$ می باشند. همچنین τ_{woff} ، τ_{won} و A_{won} به ترتیب تنش برشی سیال روی دیواره و مساحت دیواره شیار در نواحی تحت میدان و بدون میدان مغناطیسی می باشد.

فصل چهارم

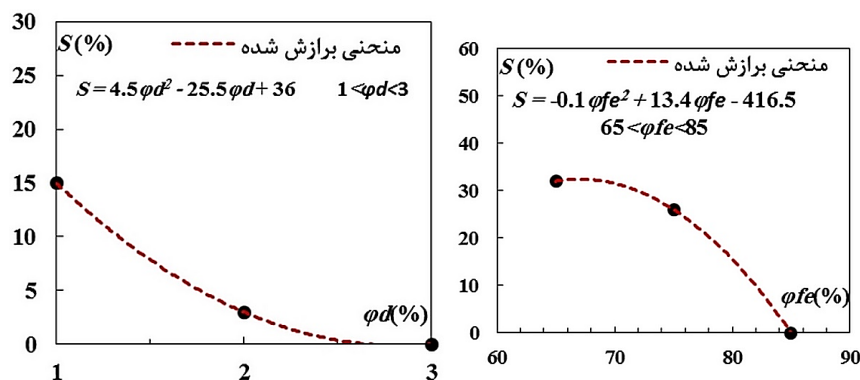
**نتایج آزمایش‌های پایداری، رئومتری، حرارتی و مدل‌سازی
رفتار سیال مگنتورئولوژیکال ساخته‌شده**

۴-۱ نتایج آزمایش‌های پایداری (تست ته‌نشینی) و ساخت سیال مگنتورئولوژیکال بهینه

شکل ۴-۱ الف نتایج به‌دست‌آمده از تست‌های ته‌نشینی مربوط به سیال‌های ساخته‌شده MRF1، MRF2، MRF3، MRF4 و MRF5 که چگونگی ساخت، آزمایش و همچنین ترکیبات آن در فصل ۲ تشریح شد را، در مدت ۷ روز، نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، افزایش درصد وزنی ماده نگه‌دارنده (ϕ_d) و پودر آهن کربونیل ϕ_{fe} باعث کاهش ته‌نشینی و افزایش پایداری سیال مگنتورئولوژیکال می‌شود. چگونگی تغییر میزان ته‌نشینی و در نتیجه پایداری سیال مگنتورئولوژیکال با درصد وزنی پودر آهن کربونیل و ماده نگه‌دارنده و توابع به‌دست‌آمده در شکل‌های ۴-۱ ب و ۴-۱ ج نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۱ ب با



(الف)



(ج)

(ب)

شکل ۴-۱: نتایج تست‌های ته‌نشینی (پایداری) سیال‌های ساخته‌شده الف) مقایسه درصد ته‌نشینی سیال‌ها با زمان ب) تأثیر درصد پودر آهن کربونیل ϕ_{fe} بر میزان ته‌نشینی و پایداری سیال مگنتورئولوژیکال ج) تأثیر درصد ماده نگه‌دارنده ϕ_d بر میزان ته‌نشینی و پایداری سیال مگنتورئولوژیکال
افزایش درصد وزنی پودر آهن کربونیل از ۶۵٪ به ۸۵٪ برای روغن با درصد ماده نگه‌دارنده ثابت (۳٪)، میزان ته‌نشینی نهایی سیال، ۵۰ درصد کاهش‌یافته و سیال به میزان قابل‌توجهی پایدارتر می‌شود. از طرف دیگر افزایش درصد پودر باعث می‌شود، سیال در زمان کمتری به پایداری نسبی برسد. همچنین مطابق شکل ۴-۱

۱- ج با افزایش درصد وزنی ماده نگه‌دارنده از ۱٪ به ۳٪ برای سیال با درصد وزنی پودر آهن ثابت (۰.۸۵٪)، میزان ته‌نشینی از ۱۵ درصد به ۰ درصد کاهش می‌یابد و پایداری سیال به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد. باوجود پایداری بسیار خوب سیال‌های MRF3 و MRF4 (با ۰.۸۵٪ وزنی پودر آهن کربونیل و به ترتیب ۳٪ و ۲٪ وزنی ماده نگه‌دارنده)، اما با توجه به غلظت ظاهری بالای این دو سیال، استفاده از این سیال‌ها در دمپر مناسب نمی‌باشد. از طرف دیگر سیال MRF5 (با ۰.۸۵٪ وزنی پودر آهن و ۱ درصد وزنی ماده نگه‌دارنده)، باوجود درصد ماده نگه‌دارنده کمتر نسبت به سیال‌های MRF1 و MRF2 با ۳ درصد وزنی ماده نگه‌دارنده و به ترتیب ۶۵٪ و ۷۵٪ وزنی پودر آهن کربونیل، ته‌نشینی کمتری داشته و پایدارتر می‌باشد. همچنین، دارای غلظت ظاهری مناسب‌تری نیز نسبت به سیال‌های MRF3 و MRF4 می‌باشد. در نتیجه سیال MRF5 به‌عنوان سیال بهینه از لحاظ غلظت و پایداری برای انجام تست‌های رئومتری و سپس تست‌های نیرویی و مدل‌سازی دمپر مگنتورئولوژیکال انتخاب می‌شود. این سیال پس از گذشت تقریباً ۹۰ ساعت به پایداری می‌رسد.

۴-۲ نتایج آزمایش‌های رئومتری

رفتار رئولوژیکی چنین سیالاتی را می‌توان به دو رژیم مجزا پیش از تسلیم و پس از تسلیم طبقه‌بندی کرد. ذرات معلق به‌صورت دوقطبی‌هایی در راستای میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرند که باعث می‌شود ذرات، زنجیره‌ای موازی با میدان مغناطیسی شکل دهند. این پدیده باعث می‌شود سوسپانسیون به حالت شبه جامد تبدیل و حرکت سیال محدود شود؛ به عبارت دیگر سیال دارای تنش تسلیم می‌شود و در نتیجه لزجت ظاهری آن افزایش می‌یابد. با بکار بردن میدان مغناطیسی، سیال‌های MR در برابر جریان مقاومت می‌کنند و بنابراین تنش تسلیم و لزجت ظاهری با افزایش شدت میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد.

نتایج تست‌های رئومتری برای سیال بهینه مگنتورئولوژیکال MRF5 که چگونگی انجام آن در فصل ۲ تشریح شد، در میدان‌های مغناطیسی و دماهای مختلف (۲۵-۷۰ درجه سانتی‌گراد) در شکل ۴-۲ آورده شده است. مطابق منحنی‌های تنش-نرخ برش و لزجت-نرخ برش که در این شکل نشان داده شده است، با افزایش میدان مغناطیسی، مقادیر لزجت و تنش در همه دماها، به دلیل شکل‌گیری زنجیره‌های موازی با میدان مغناطیسی و مقاومت سیال MR در برابر جریان، به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد که این افزایش با نزدیک

شدن به جریان ۲ آمپر، به تدریج به حالت اشباع مغناطیسی می‌رسد. به عبارت دیگر با افزایش بیشتر جریان الکتریکی و در نتیجه میدان مغناطیسی، مقادیر تنش و لزجت افزایش چشمگیری پیدا نمی‌کند.

همچنین مطابق نتایج نشان داده شده در این شکل، مقادیر لزجت تابع نرخ برش بوده و با افزایش نرخ برش، کاهش می‌یابد که این پدیده به دلیل ماهیت غیر نیوتونی سیال‌های مگنتورئولوژیکال می‌باشد. از طرف دیگر، شیب نمودارهای تنش-نرخ برش در تمام میدان‌ها و دماها با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر سیال از خود رفتار رقیق شوندگی نشان می‌دهد.

همان‌طور که در منحنی‌های تنش-نرخ برش مشخص است، پس از تسلیم، رفتار سیال پس از رسیدن به نرخ برش مشخصی تغییر می‌کند و در نتیجه ناحیه پس از تسلیم به دو قسمت تقسیم می‌شود بررسی این منحنی‌ها نشان می‌دهد، با افزایش میدان مغناطیسی و همچنین دما، ناحیه اول به تدریج رشد می‌کند.

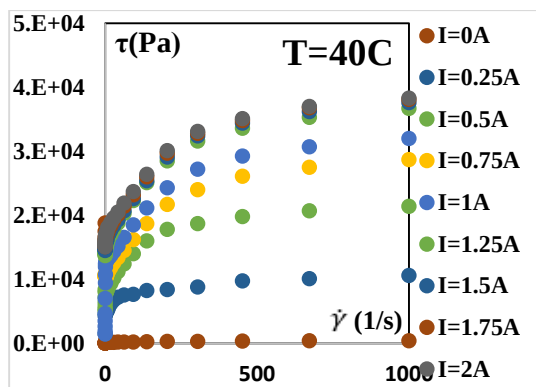
همچنین مطابق شکل‌های ۴-۲، با افزایش دما، مقادیر تنش و لزجت سیال به دلیل کاهش نیروهای بین‌مولکولی کاهش می‌یابد که چگونگی آن در قسمت مربوط به مدل‌سازی رفتار سیال مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۳ مدل‌سازی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال

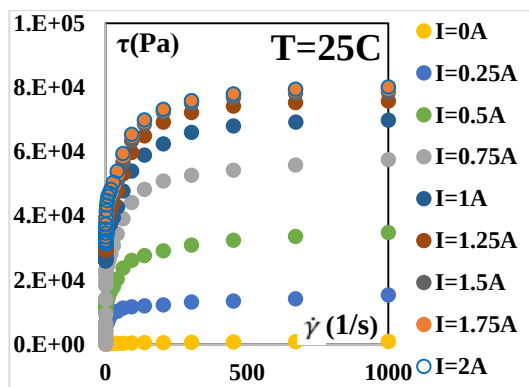
۴-۳-۱ مدل‌سازی ویسکوزیته

یکی از اهداف اصلی مطالعه سیالات MR مدل رئولوژیکال مناسب برای محاسبه تنش برشی ایجاد شده در سیال MR می‌باشد. برای استخراج مدل رئولوژیکال و ثابت‌های مربوط به آن در دماها و میدان‌های مغناطیسی مختلف، مطالعات آزمایشگاهی زیادی مورد نیاز است.

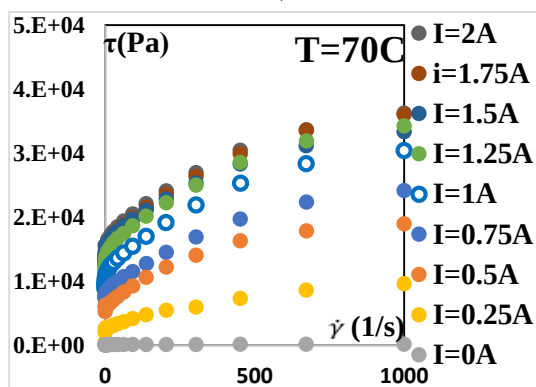
جهت مدل‌سازی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال و استخراج فرمول‌های مربوط به نیروی دمپینگ به‌طور متداول از مدل بینگهام پلاستیک [۲۵] استفاده می‌شود. برازش داده‌های به دست آمده از تست‌های رئومتری در این پژوهش با مدل بینگهام پلاستیک در شکل ۴-۳، نشان می‌دهد این مدل در بعضی از نواحی از دقت کافی برای پیش‌بینی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال برخوردار نیست. همچنین این مدل رفتار رقیق شوندگی این سیال را پیش‌بینی نمی‌کند. از طرفی، با توجه به اینکه مطابق منحنی‌های تنش-نرخ برش به دست آمده، ناحیه پس از



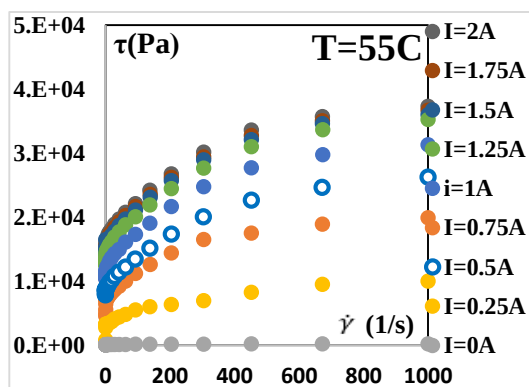
(ب)



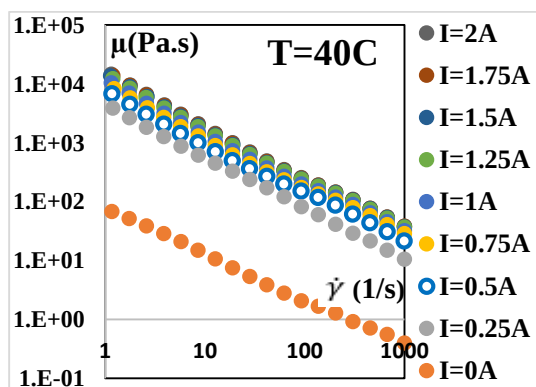
(الف)



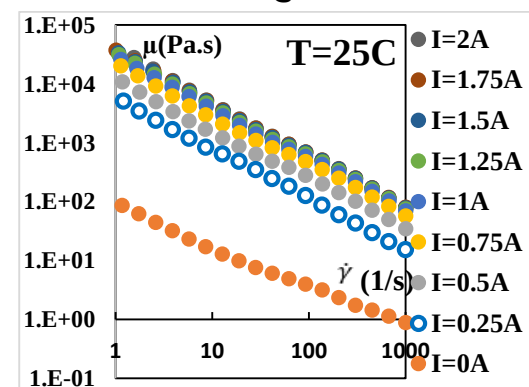
(د)



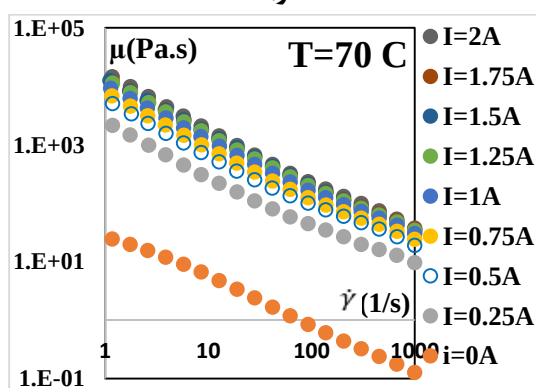
(ج)



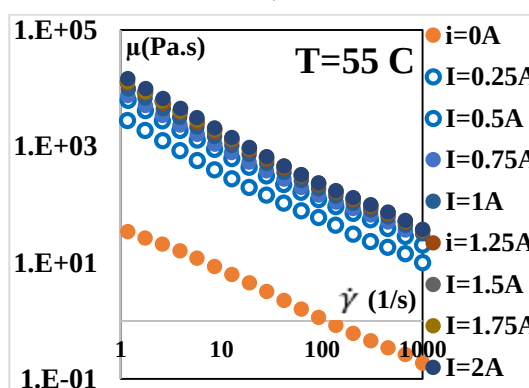
(و)



(ه)



(ح)



(ز)

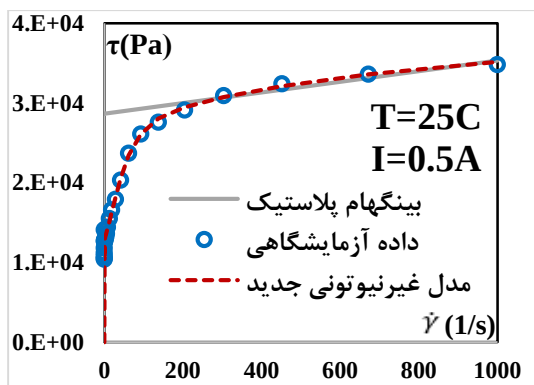
شکل ۴-۲: منحنی های تنش-نرخ برش (الف) 25C (ب) 40C (ج) 55C (د) 70C لزجت نرخ برش (ه) 25C (و) 40C (ز) 55C (ح) 70C

تسلیم سیال ساخته شده به دو قسمت تقسیم شده، استفاده از یک مدل تک ضابطه ای بجای مدل دو ضابطه ای جهت استفاده در حل های عددی حائز اهمیت است. از طرفی مدل های بینگهام پلاستیک و هرشل بالکلی به دلیل نامحدود شدن حل در نرخ برش های نزدیک به صفر، قابل استفاده در مدل سازی عددی نمی باشند. به دلایل ذکر شده، در این پژوهش، با استفاده از برازش داده های به دست آمده از آزمایش های رئومتری در جریان های الکتریکی و در نتیجه میدان های مغناطیسی و دماهای مختلف، یک مدل غیر نیوتونی اصلاح شده جدید ارائه شده است که رفتار سیال مگنتورئولوژیکال را به صورت تک ضابطه ای در تمامی دماها و میدان های مغناطیسی مطابق شکل ۳-۴ به خوبی پیش بینی می کند. به گونه ای که ضمن استفاده از رابطه تک ضابطه ای بجای رابطه دو ضابطه ای، رفتار سیال در هر دو ناحیه پس از تسلیم و رقیق شوندگی سیال، پیش بینی شده و به دلیل استفاده از پارامتر $\mathcal{E}$ ، مشکل نامحدود شدن حل در نرخ برش های بسیار پایین، به وجود نمی آید.

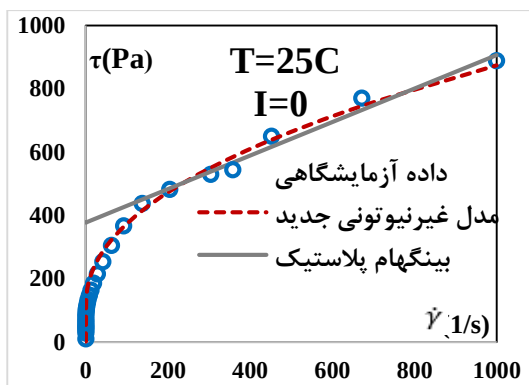
معادلات تنش مربوط به این مدل در روابط (۳-۴-۷) و به عنوان معادلات ساختاری مورد استفاده در مدل سازی عددی بیان شده اند. همچنین لزجت ظاهری در این مدل و مدل بینگهام پلاستیک مطابق روابط (۴-۱) و (۴-۲) به دست می آیند که از این روابط در حل معادلات حاکم و مدل سازی بجای لزجت سیال استفاده می شود. با استفاده از برازش منحنی های تنش-نرخ برش در دما و میدان های مختلف با مدل غیر نیوتونی اصلاح شده ارائه شده در این پژوهش، مطابق شکل های ۴-۵-۱۳، پارامترهای مربوط به این مدل، به صورت تابعی از دما و میدان مغناطیسی به دست می آیند. این شکل ها، به خوبی چگونگی مطابقت مدل پیشنهادی با داده های آزمایشگاهی در همه دماها ($25C < T < 70C$) میدان هایی ($0kA/m < H < 361kA/m$) که تست های رئومتری در آنها انجام شده است نشان می دهد.

$$\mu_{app} = \frac{\tau_y(H) \text{sign}(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} + \mu_p(H) \quad (۱-۴)$$

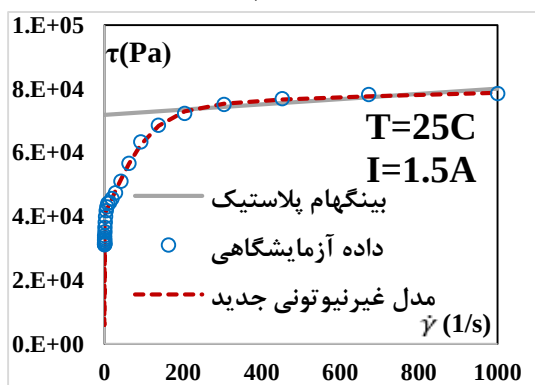
$$\mu_{app} = \frac{\tau_y(T, H)}{\sqrt{\dot{\gamma}^2 + \varepsilon^2}} + \tanh(2.5 \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c(T, H)}) K(T, H) \dot{\gamma}^{n(T, H)-1} \quad (۲-۴)$$



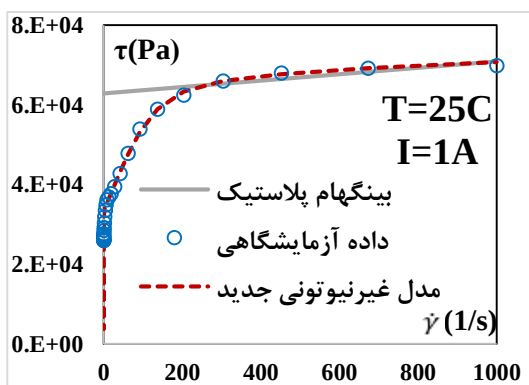
(ب)



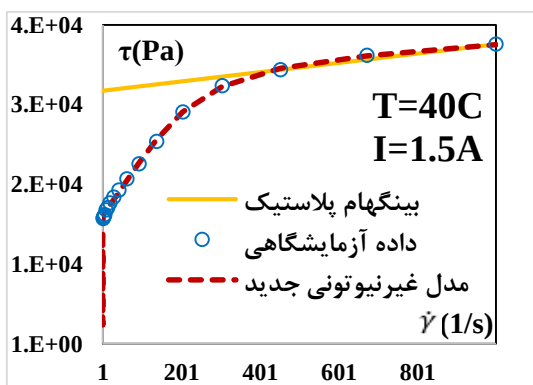
(الف)



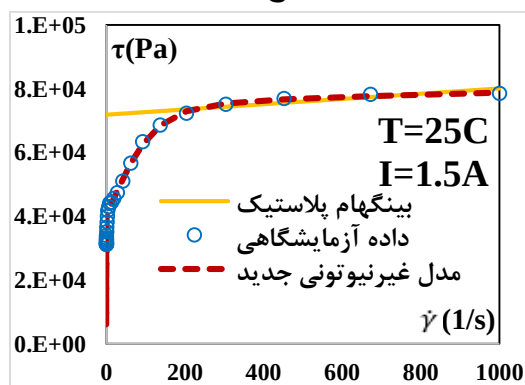
(د)



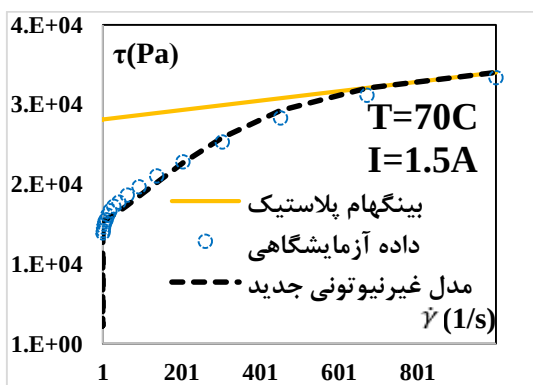
(ج)



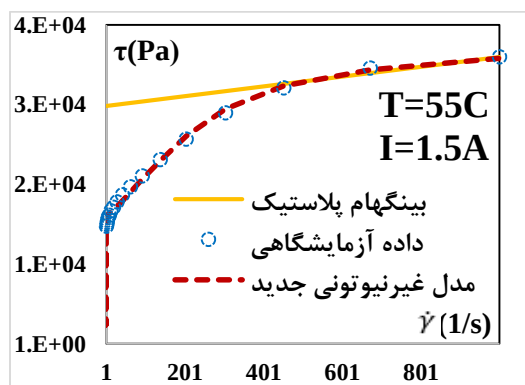
(و)



(ه)



(ح)



(ز)

شکل ۴-۳: مقایسه مدل بینگهام پلاستیک و مدل غیر نیوتونی جدید در جریان‌های (الف) $I=0A$ (ب) $I=0.5A$ (ج) $I=1A$ (د) $I=1.5A$ و در دماهای (ه) $T=25C$ (و) $T=40C$ (ز) $T=55C$ (ح) $T=70C$

۴-۳-۲ بررسی تابعیت دمایی ثوابت مدل

روابط پیشنهادشده برای تابعیت دمایی این پارامترها مطابق معادلات (۴-۴-۷) می باشند که چگونگی برازش این منحنی ها در شکل های ۴-۵-۱۳ نشان داده شده است. همچنین چگونگی تغییر ثوابت این توابع دمایی با میدان مغناطیسی، به طور نمونه در شکل های ۴-۱۴-۱۸ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل ها دیده می شود با افزایش میدان مغناطیسی، تغییرات این ثوابت نیز به تدریج اشباع می شود.

$$\tau_y(T, H) = a_{\tau_y}(H) * \exp\left(\frac{b_{\tau_y}(H)}{T - T_{0\tau_y}(H)}\right) \quad (۴-۴)$$

$$k(T, H) = a_k(H) * \exp\left(\frac{b_k(H)}{T - T_{0k}(H)}\right) \quad (۵-۴)$$

$$\dot{\gamma}_c(T, H) = a_{\dot{\gamma}_c}(H)T + b_{\dot{\gamma}_c} \quad (۶-۴)$$

$$n(T, H) = a_n(H) * \exp\left(\frac{-b_n(H)}{T - T_n(H)}\right) \quad (۷-۴)$$

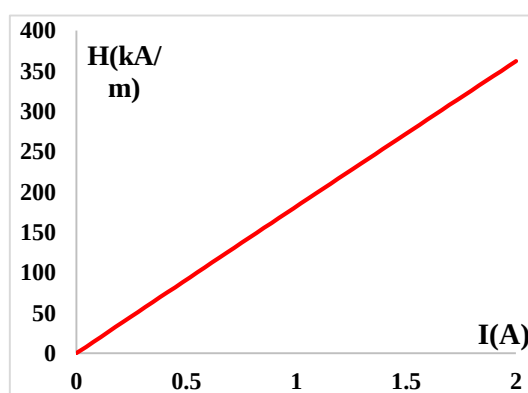
عبارت $\tanh(2.5 \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c(T, H)})$ جهت مدل سازی رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم اول استفاده شده است؛ و در ناحیه دوم، این مقدار برابر یک می باشد. از آنجایی که $\tanh(2.5) \sim 1$ می باشد، در نتیجه $\dot{\gamma}_c(T, H)$ بیانگر نرخ برش مربوط به تغییر رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم می باشد.

مطابق شکل های ۴-۱۳-۱۷ با افزایش جریان الکتریکی و در نتیجه میدان مغناطیسی، به تدریج تأثیر دما بر تنش تسلیم و K که مربوط به رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم می باشد، در دماهای بالاتر کاهش میابد. در حالیکه پارامتر $\dot{\gamma}_c$ که نرخ برش مربوط به تغییر رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم می باشد، در همه میدان ها به صورت خطی با افزایش دما افزایش می یابد. به عبارت دیگر با افزایش دما در همه میدان های مغناطیسی، ناحیه پس از تسلیم اول رشد پیدا می کند. همچنین پارامتر n ، که در مدل هرشل بالکلی مربوط به میزان رقیق شوندگی سیال می باشد، در حالت بدون میدان با افزایش دما کاهش میابد. در حالیکه با قرار گرفتن تحت میدان مغناطیسی با افزایش دما افزایش می یابد؛ در میدان های نزدیک اشباع، میزان این افزایش کاهش می یابد. برازش داده ها در ۳۰ نقطه و میدان های مغناطیسی مختلف تا رسیدن به شرایط اشباع، $(0 \text{ kA/m} < H < 343 \text{ kA/m})$ ، به روش حداقل مربعات انجام شده است. ضریب تعیین برازش در میدان های

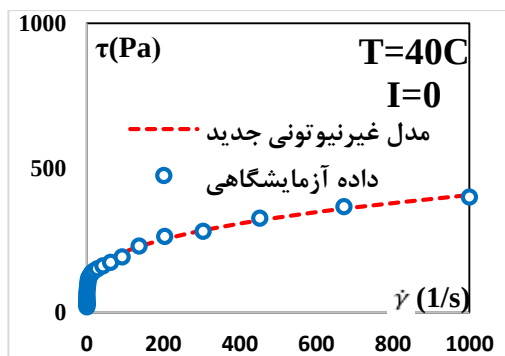
مختلف، به‌طور نمونه در جدول ۴-۱ و محدوده پارامترها در هر میدان در شکل‌های ۴-۱۴ تا ۴-۱۸ نشان داده شده است که بیشترین و کمترین مقدار آن به ترتیب ۰٫۹۸۹۴ و ۰٫۸۱۲ می باشد. همچنین، شکل ۴-۴ منحنی تغییرات میدان مغناطیسی برحسب جریان الکتریکی را نشان می دهد.

جدول ۴-۱: ضریب تعیین برازش در میدان‌های مختلف

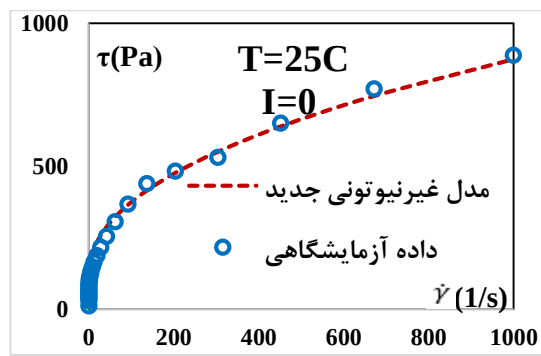
میدان مغناطیسی (kA/m)	R^2
۰	۰٫۹۸۹۴
۴۵٫۴۶۸	۰٫۹۸۶۸
۹۱٫۰۱۲	۰٫۸۱۲
۱۳۶٫۴۴۷	۰٫۸۶۴۹
۱۸۱٫۷۷۳۹	۰٫۸۵۳۳
۲۲۶٫۹۹	۰٫۸۳۷۶
۲۷۲٫۰۹۹	۰٫۸۳۱۴
۳۱۷٫۰۹۸۱	۰٫۸۵۵۹
۳۶۱٫۹۸۸۲	۰٫۸۸۱۳



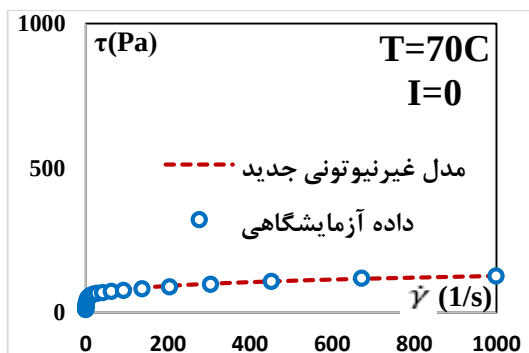
شکل ۴-۴: تغییرات میدان برحسب جریان



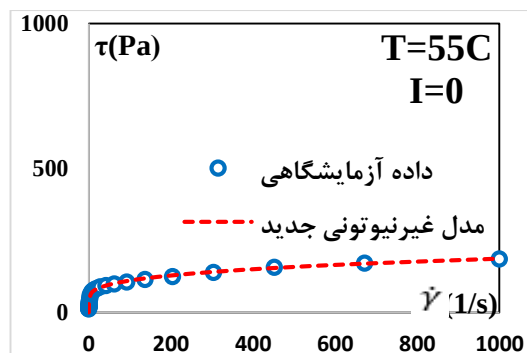
ب



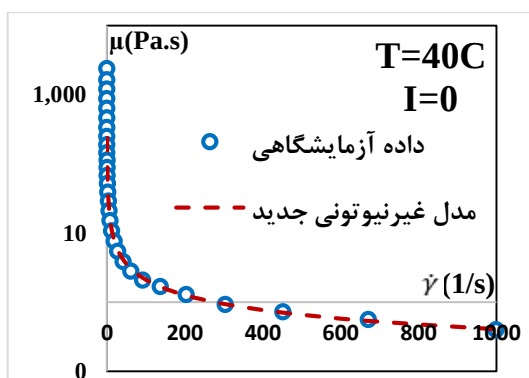
الف



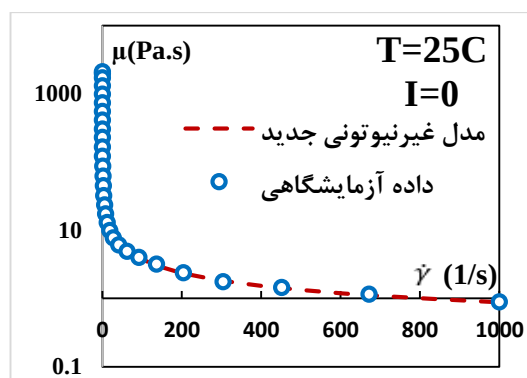
د



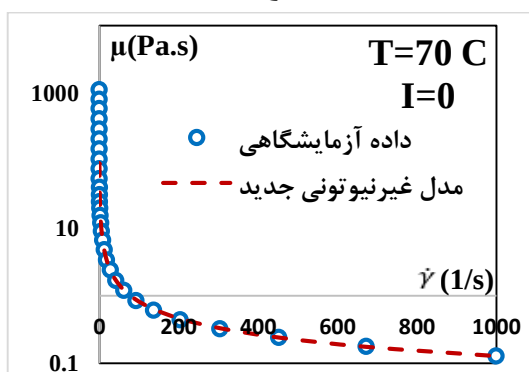
ج



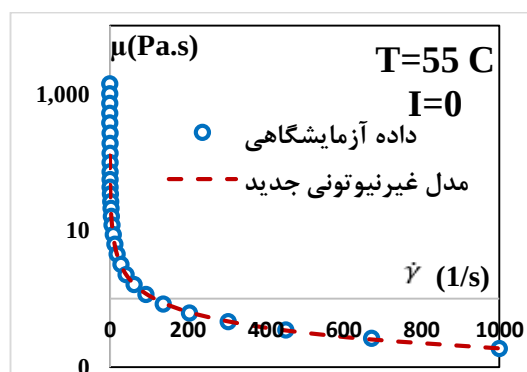
و



ه

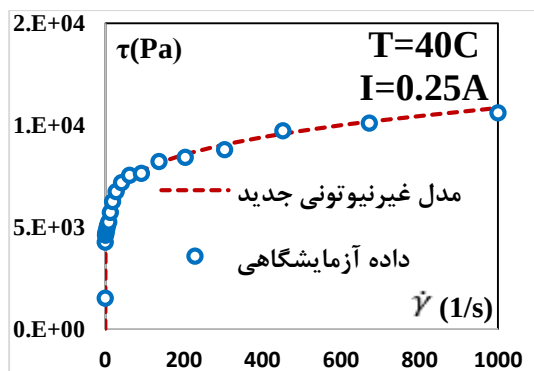


ح

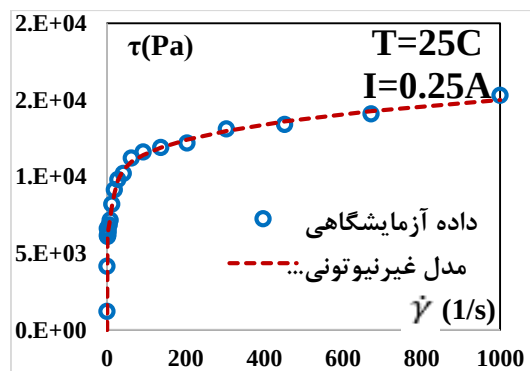


ز

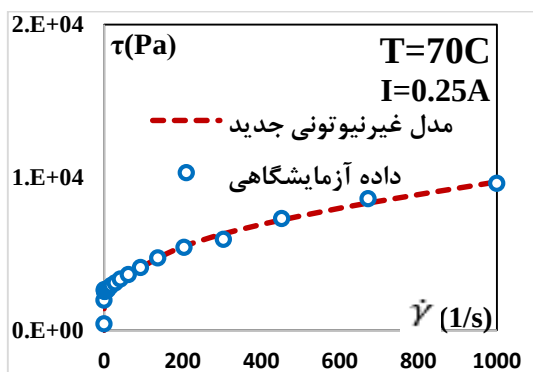
شکل ۴-۵: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده‌های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در دماهای $T=70^\circ\text{C}$ $T=40^\circ\text{C}$ $T=55^\circ\text{C}$ $T=25^\circ\text{C}$ در $I=0\text{A}$



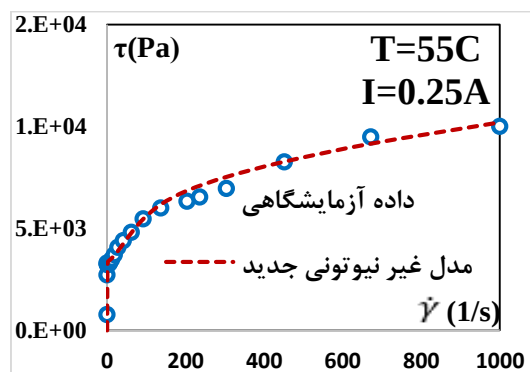
(ب)



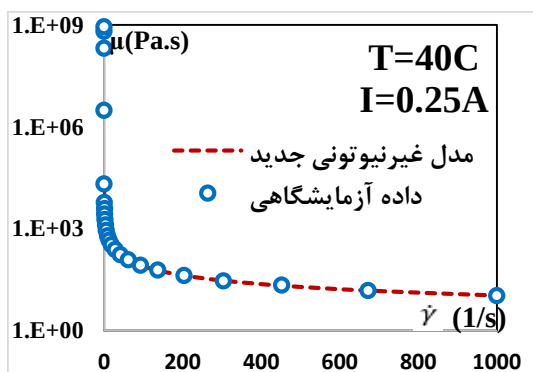
(الف)



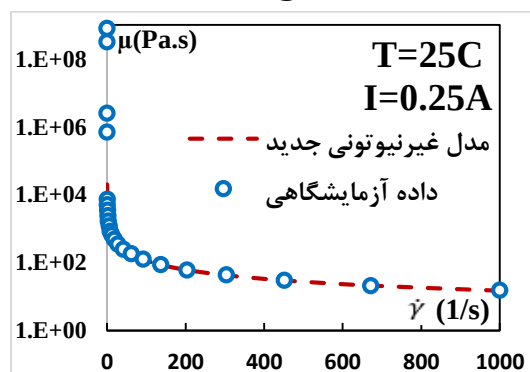
(د)



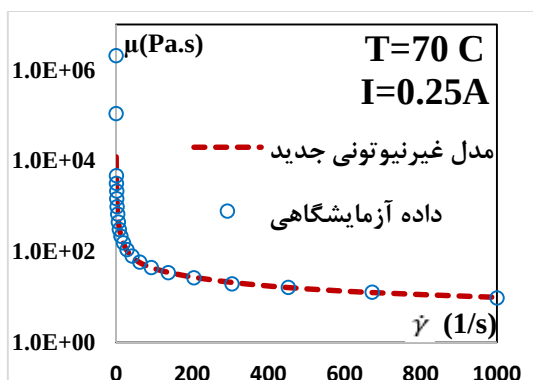
(ج)



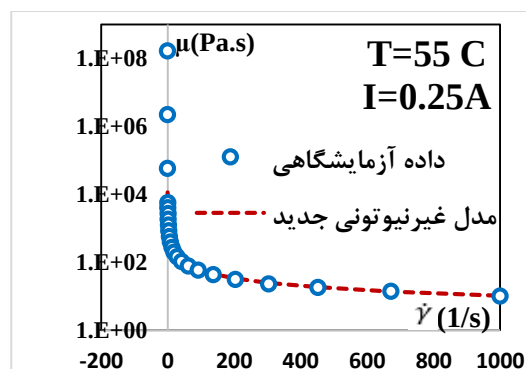
(و)



(ه)

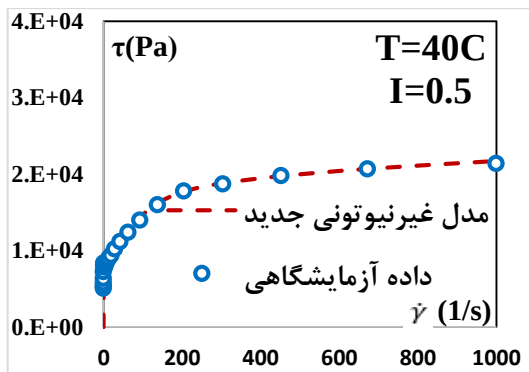


(ح)

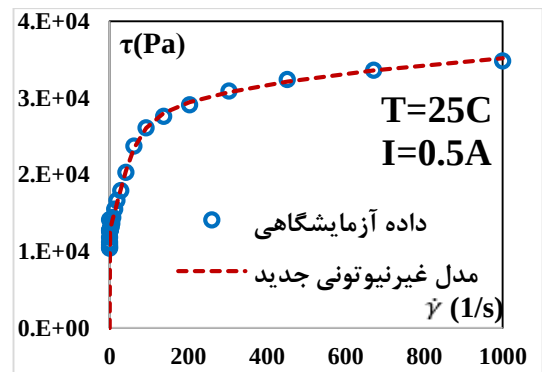


(ز)

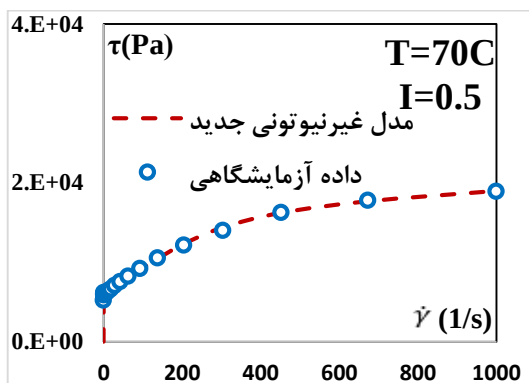
شکل ۴-۶: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $T=70C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=25C$ در $I=0.25A$



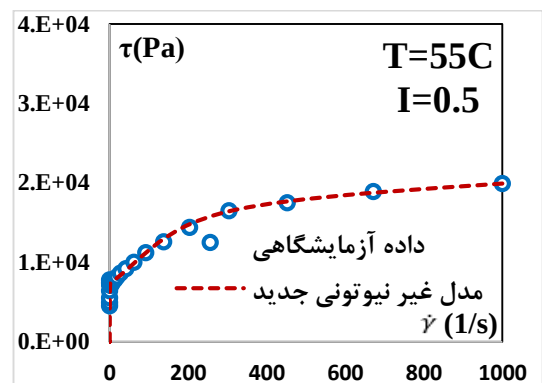
(ب)



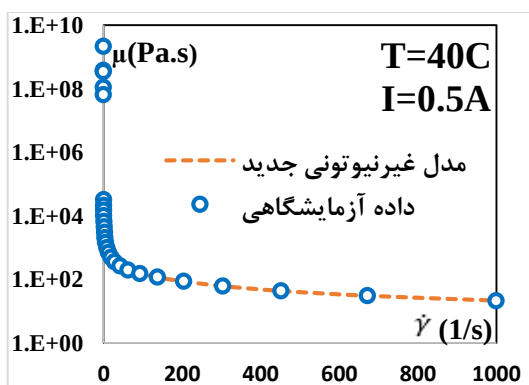
(الف)



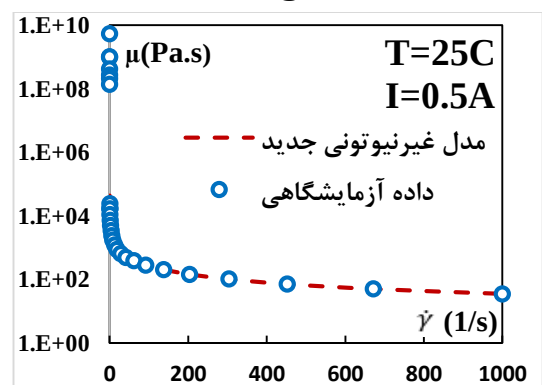
(د)



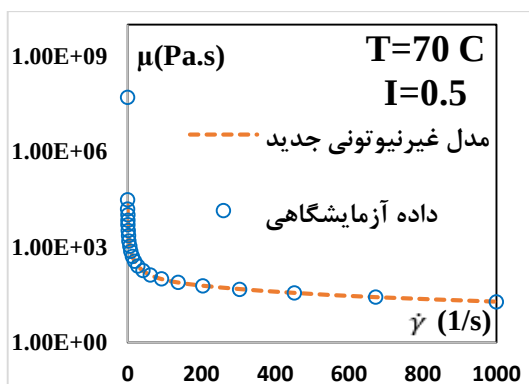
(ج)



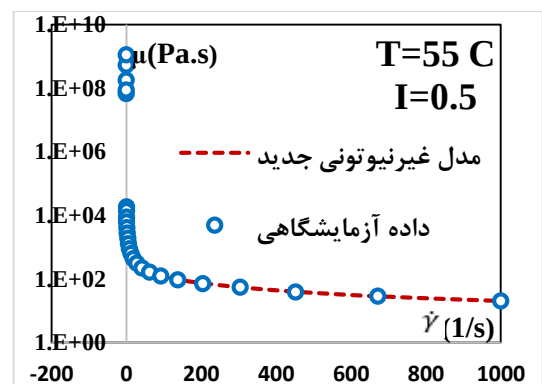
(و)



(ه)

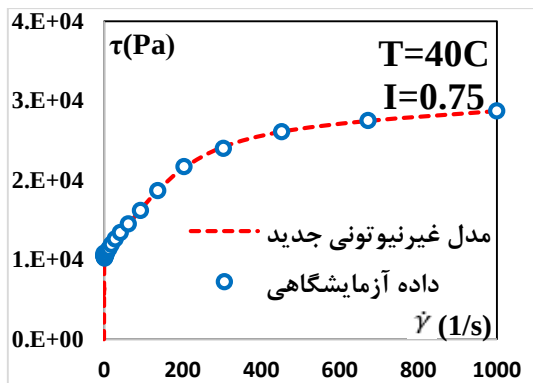


(ح)

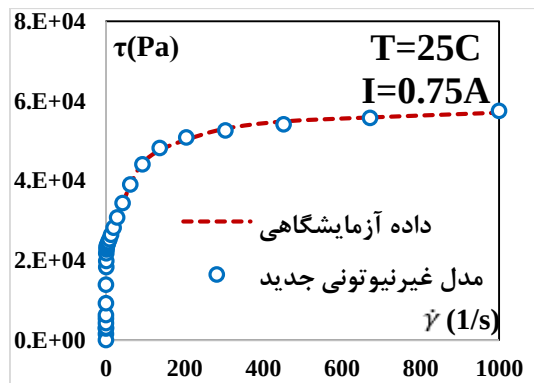


(ز)

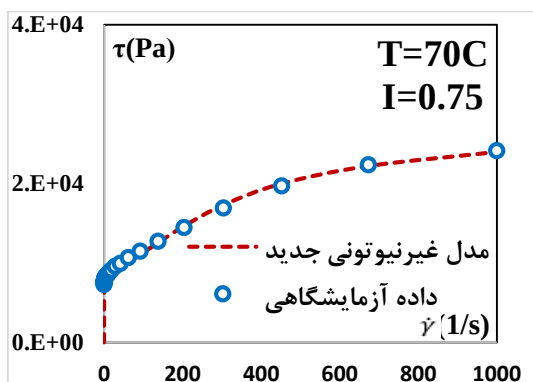
شکل ۴-۷: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $I=0.5A$ در دماهای $T=70C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=25C$



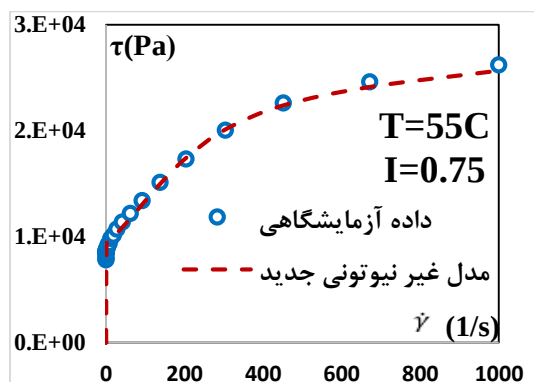
(ب)



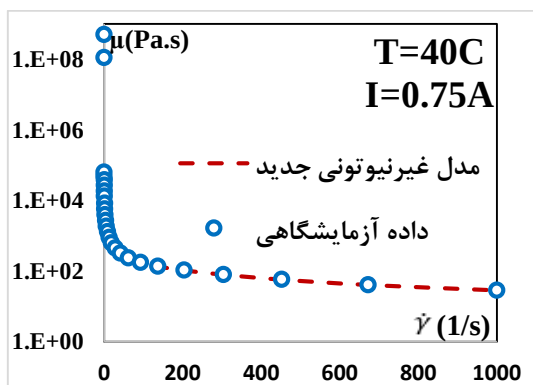
(الف)



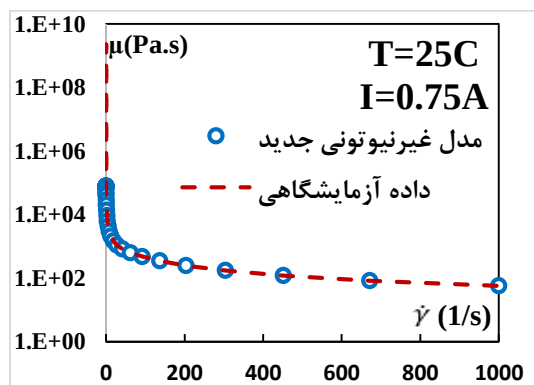
(د)



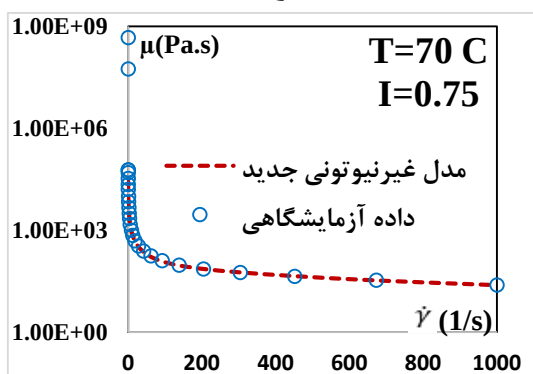
(ج)



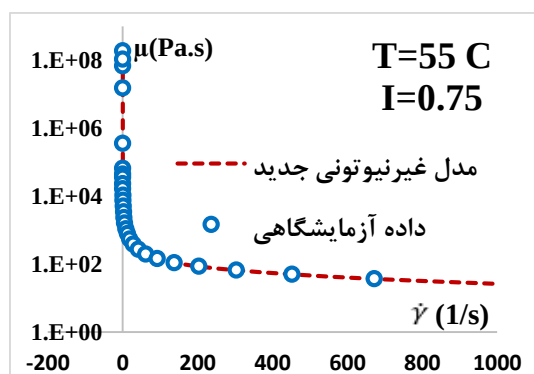
(و)



(ه)

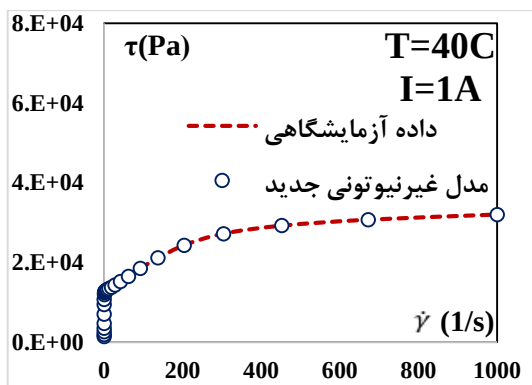


(ح)

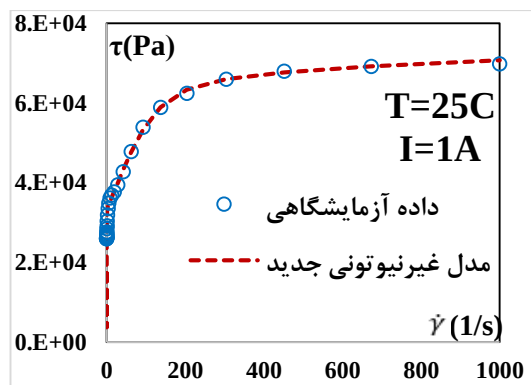


(ز)

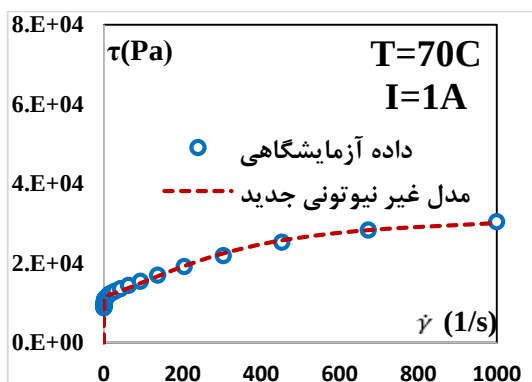
شکل ۴-۸: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $I=0.75\text{A}$ در دماهای $T=70^\circ\text{C}$ $T=40^\circ\text{C}$ $T=55^\circ\text{C}$ $T=25^\circ\text{C}$



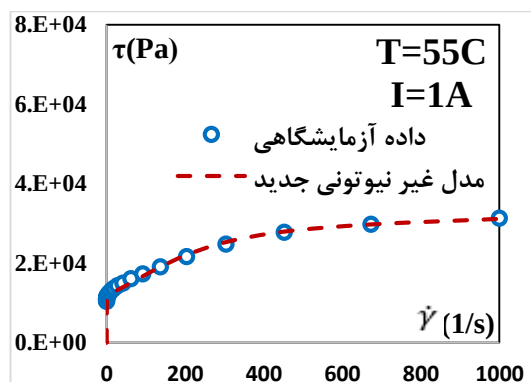
(ب)



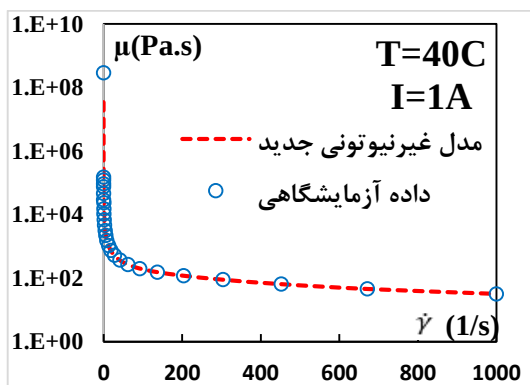
(الف)



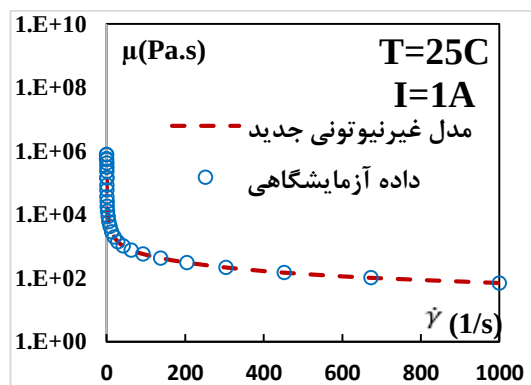
(د)



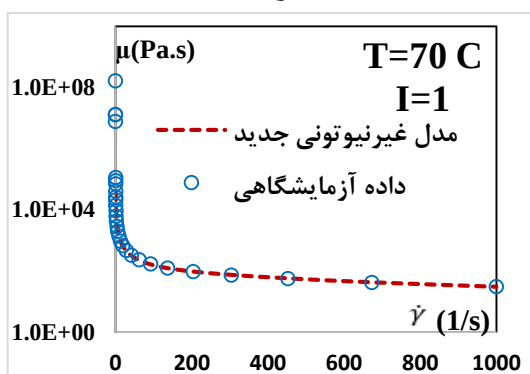
(ج)



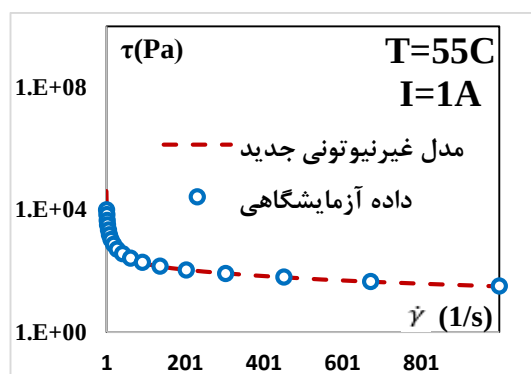
(و)



(ه)

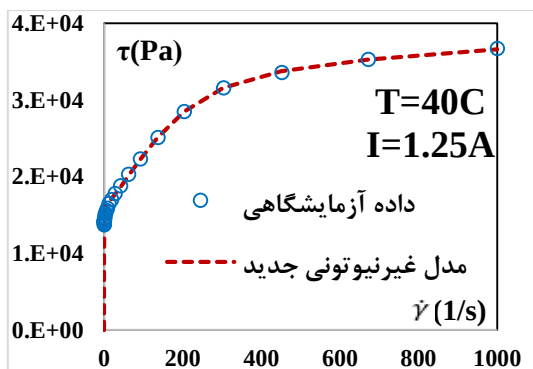


(ح)

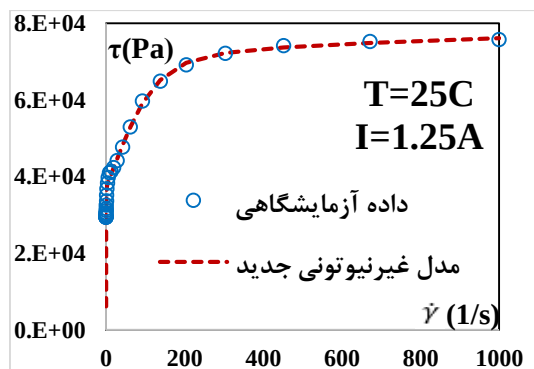


(ز)

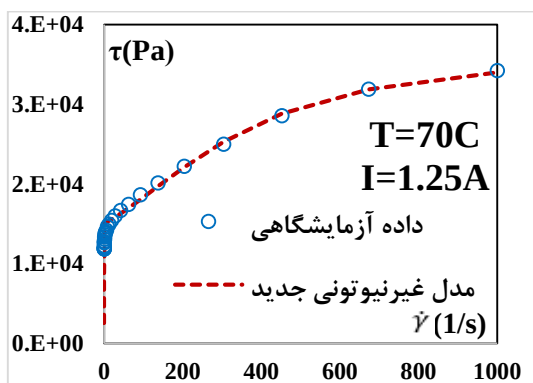
شکل ۴-۹: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $I=1A$ در دماهای $T=25C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=70C$



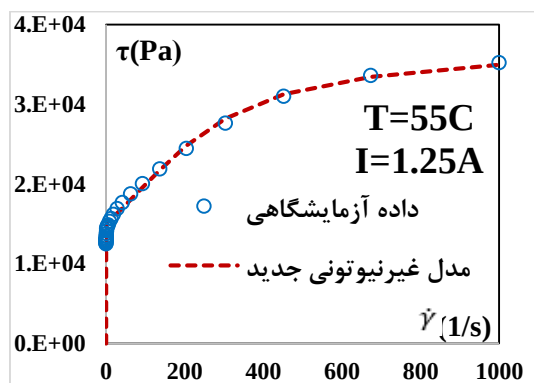
(ب)



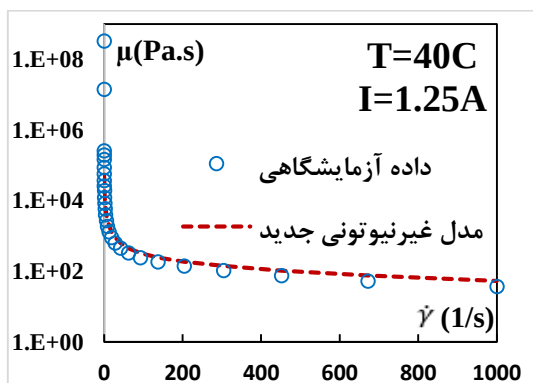
(الف)



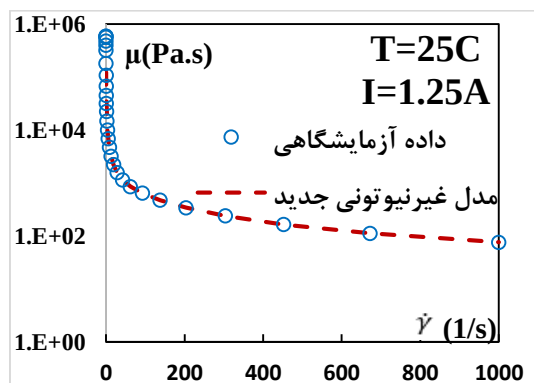
(د)



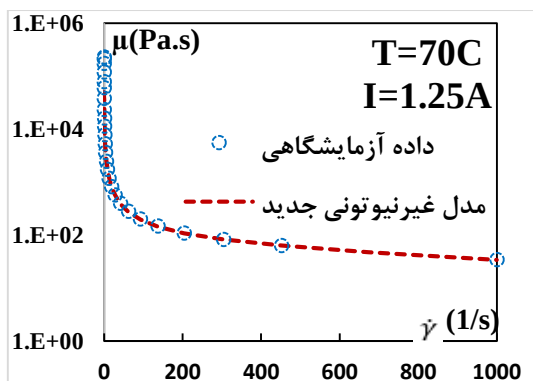
(ج)



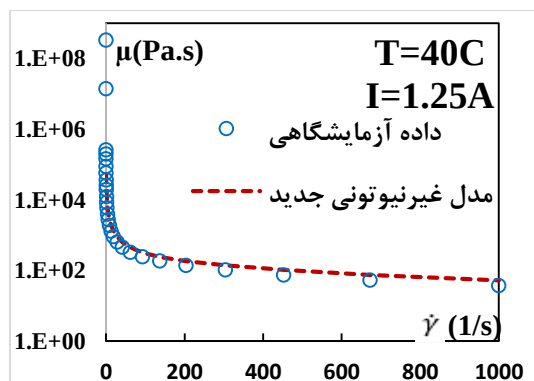
(و)



(ه)

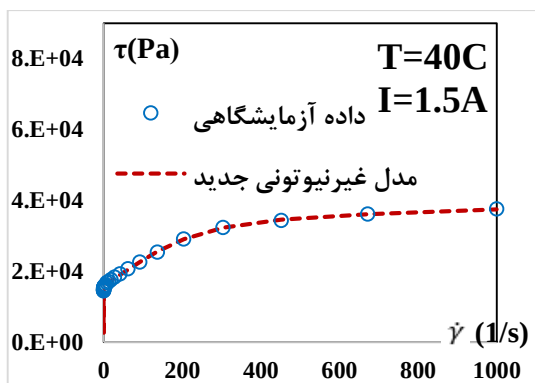


(ح)

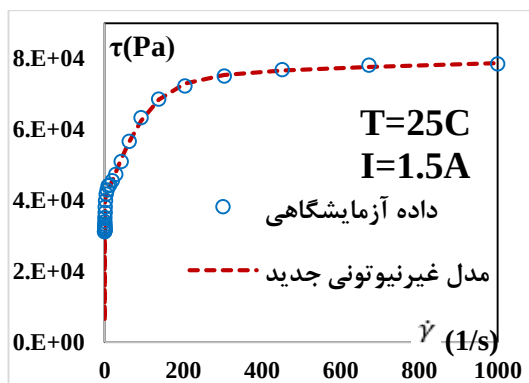


(ز)

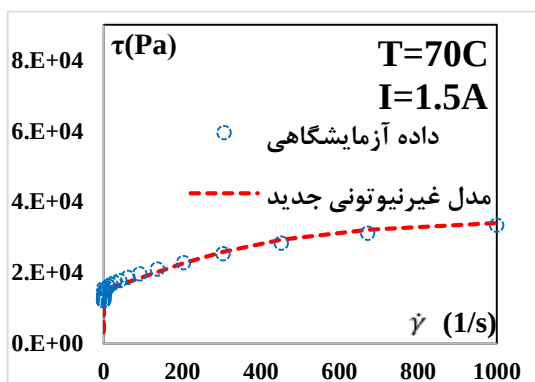
شکل ۴-۱۰: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $I=1.25\text{A}$ در دماهای $T=25^\circ\text{C}$ $T=40^\circ\text{C}$ $T=55^\circ\text{C}$ $T=70^\circ\text{C}$



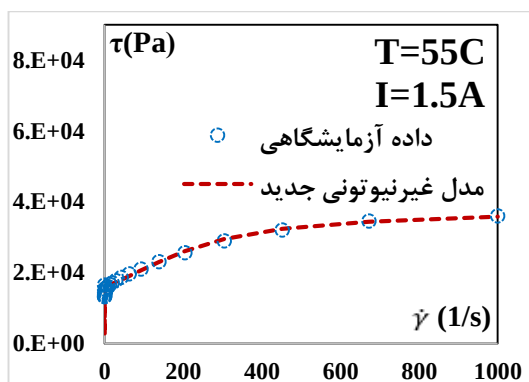
(ب)



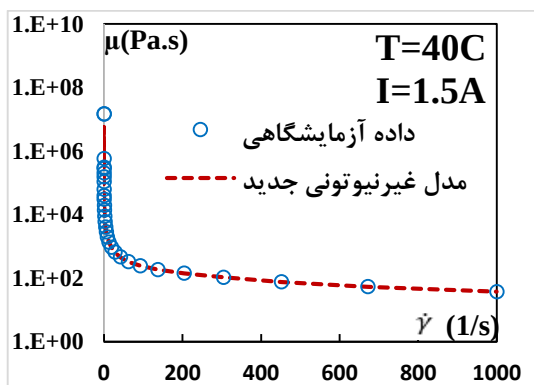
(الف)



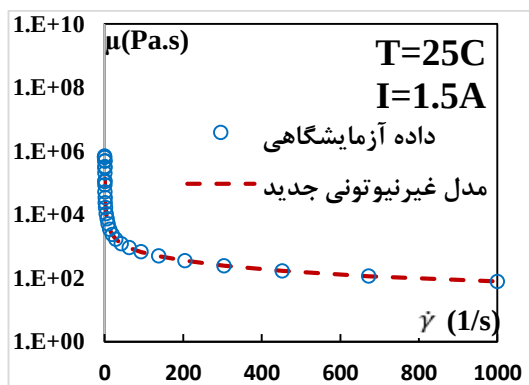
(د)



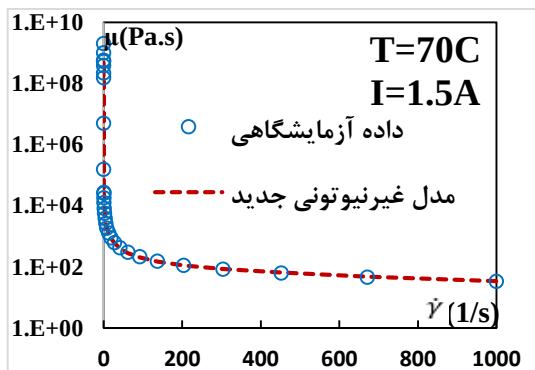
(ج)



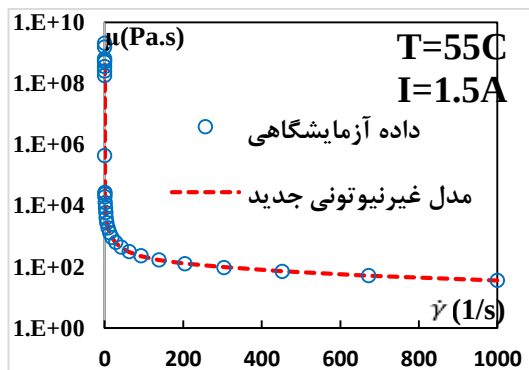
(و)



(ه)

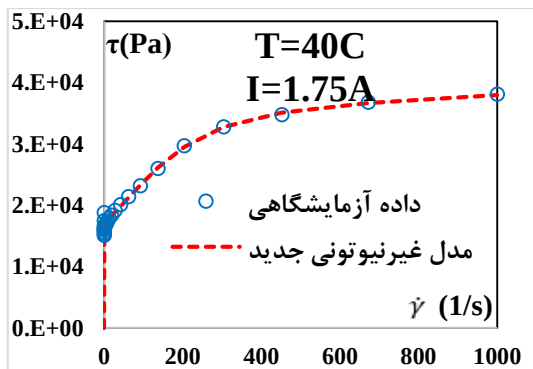


(ح)

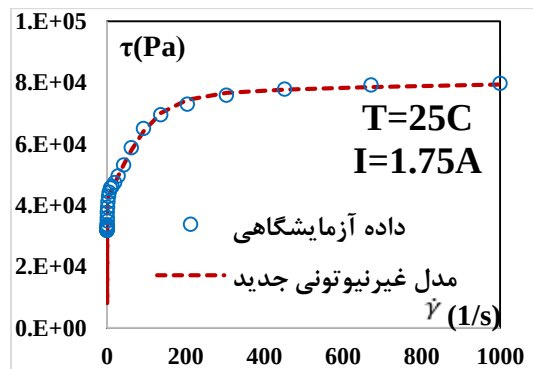


(ز)

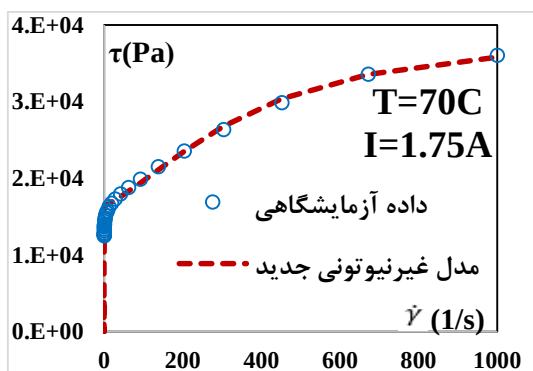
شکل ۴-۱۱: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ
برش در $I=1.5A$ در دماهای $T=25C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=70C$



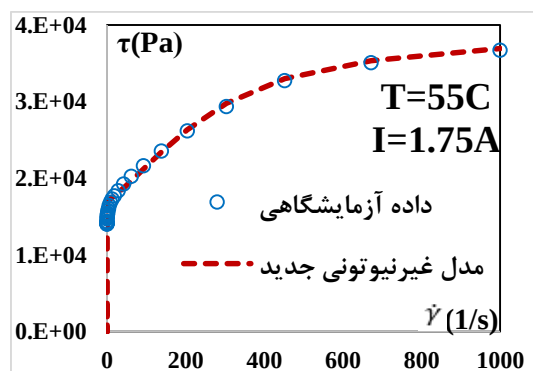
(ب)



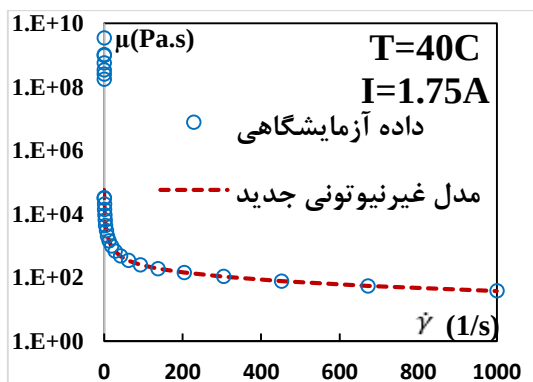
(الف)



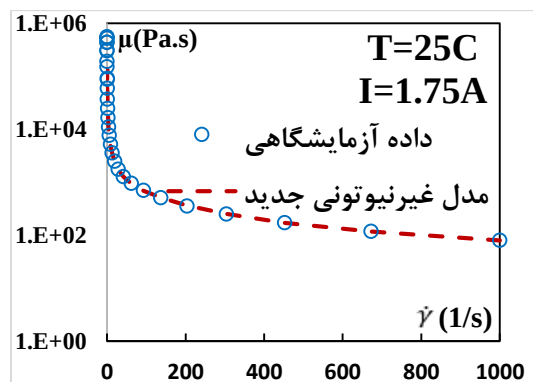
(د)



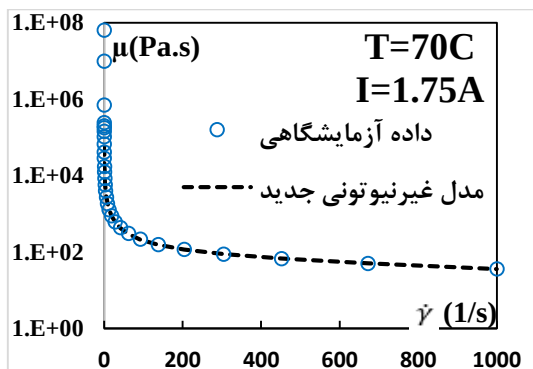
(ج)



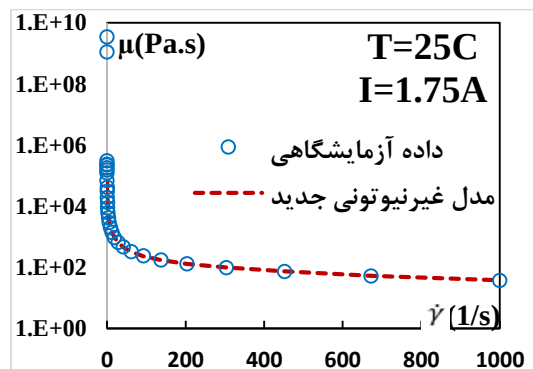
(و)



(ه)



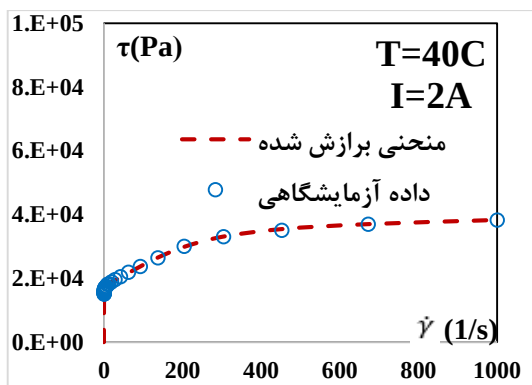
(ح)



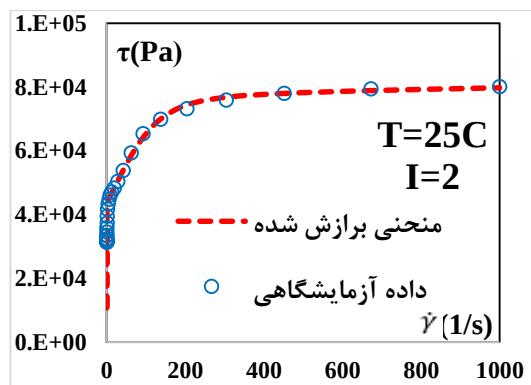
(ز)

شکل ۴-۱۲: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده‌های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ

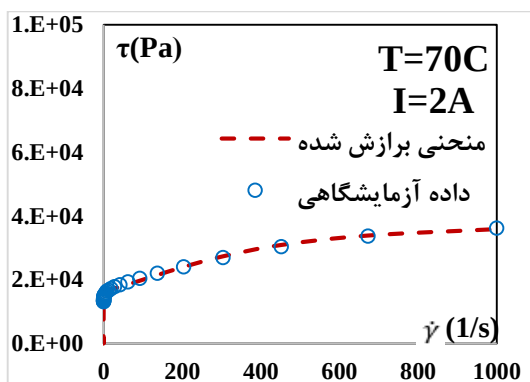
برش در $I=1.75A$ در دماهای $T=25C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=70C$



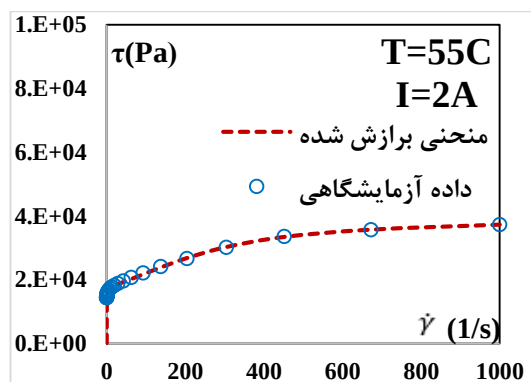
(ب)



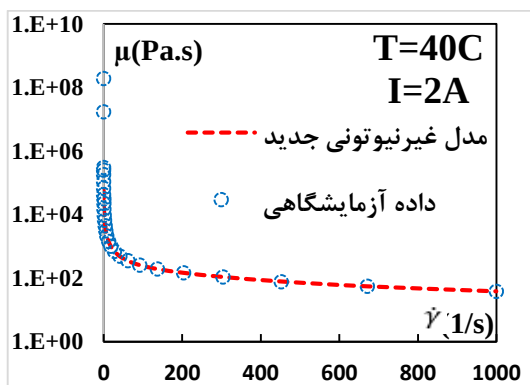
(الف)



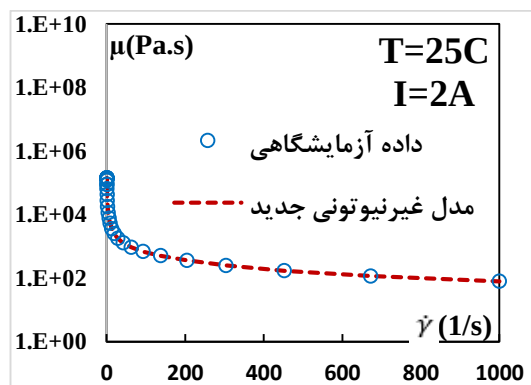
(د)



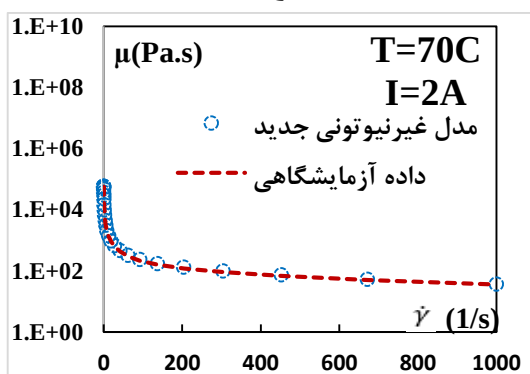
(ج)



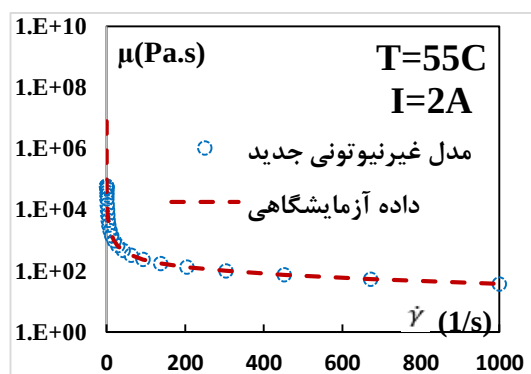
(و)



(ه)

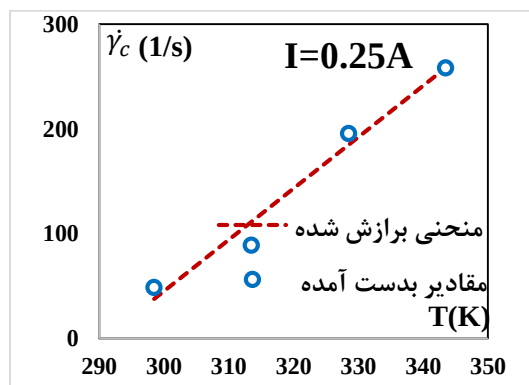
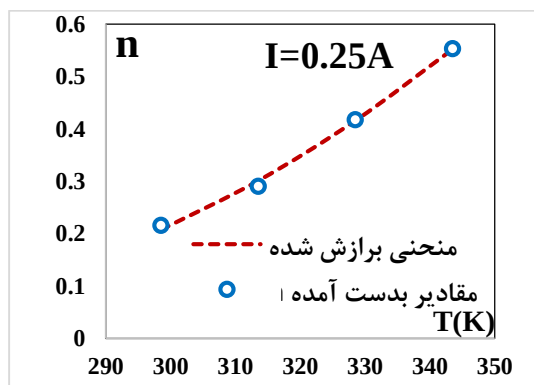
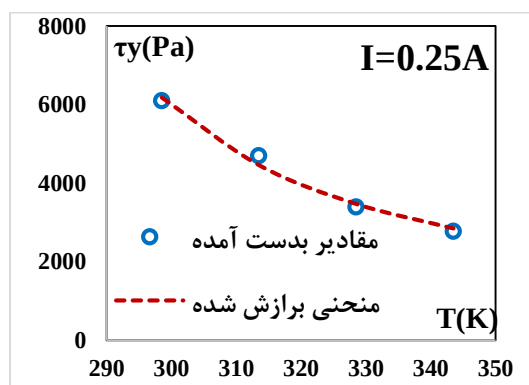
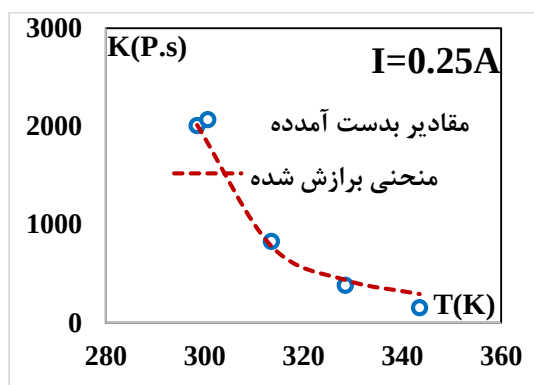
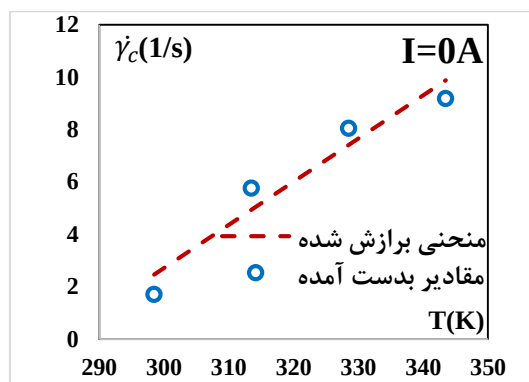
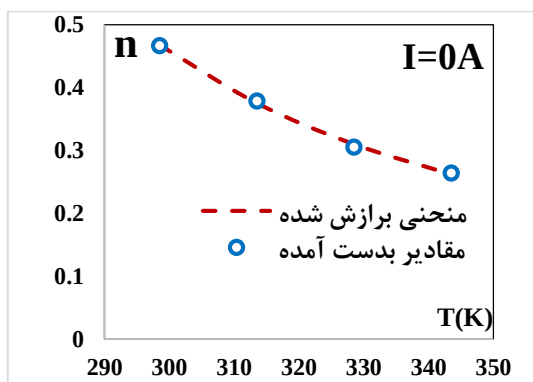
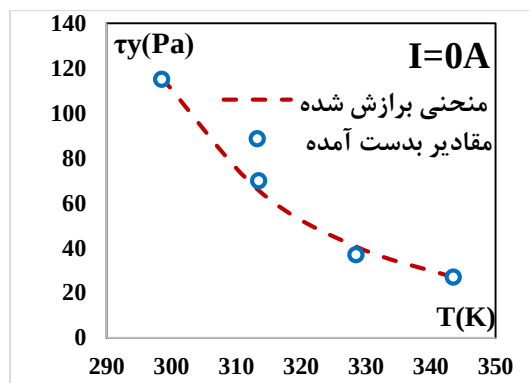
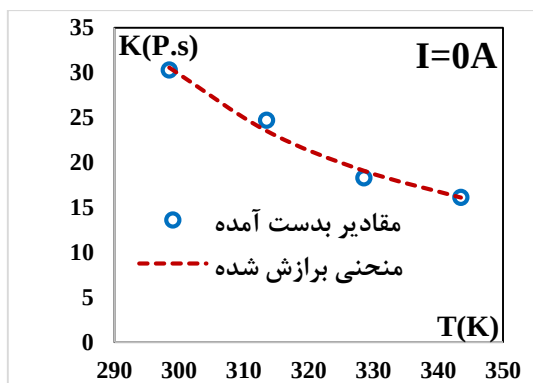


(ح)

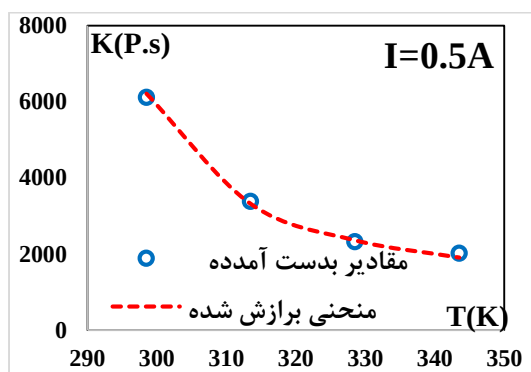


(ز)

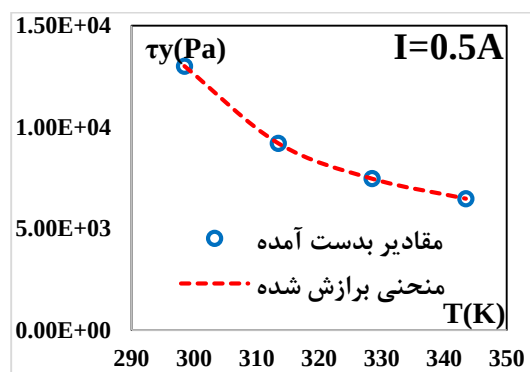
شکل ۴-۱۳: برازش مدل غیرنیوتونی اصلاح شده ارائه شده با داده‌های آزمایشگاهی تنش نرخ برش و لزجت نرخ برش در $I=2A$ در دماهای $T=25C$ $T=40C$ $T=55C$ $T=70C$



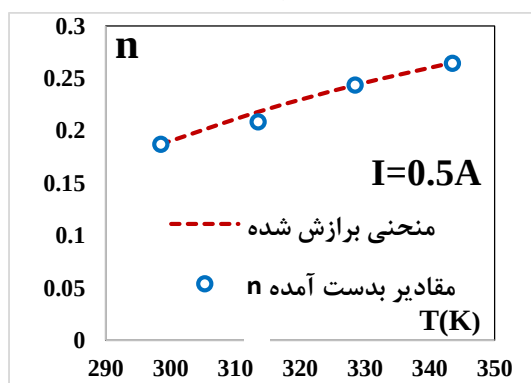
شکل ۴-۱۴: بررسی تابعت دمایی پارامترهای مدل غیرنیوتونی ارائه شده در جریان‌های $I=0A$, $I=0.25A$



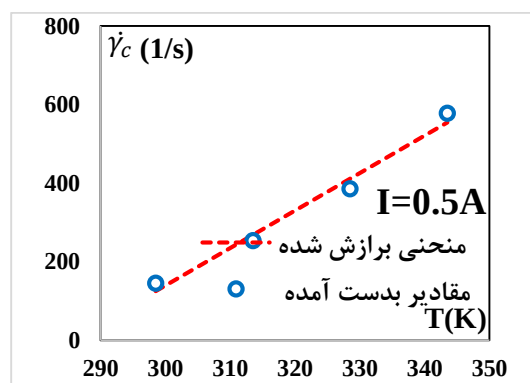
(ب)



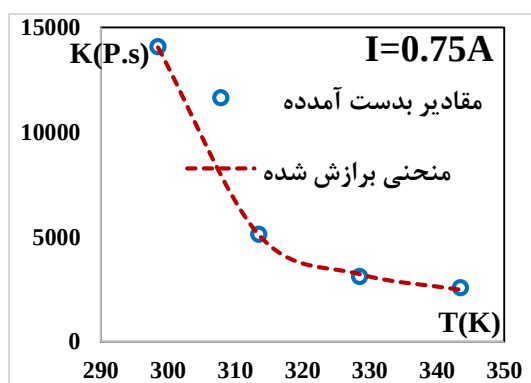
(الف)



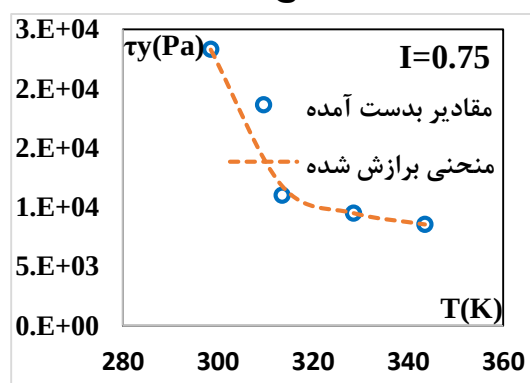
(د)



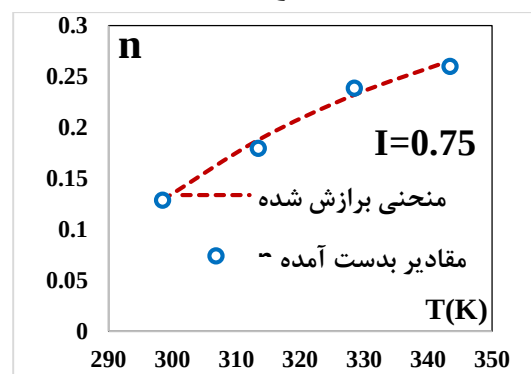
(ج)



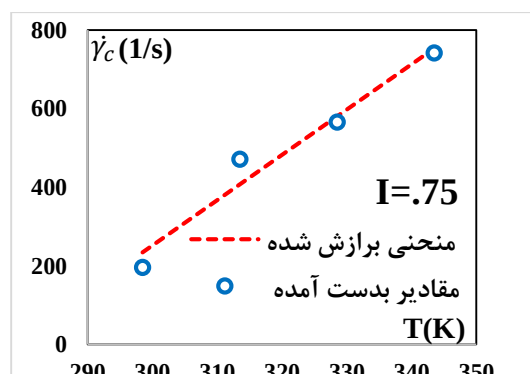
(و)



(ه)

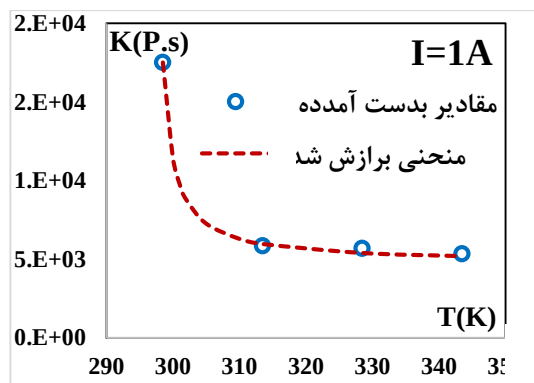


(ه)

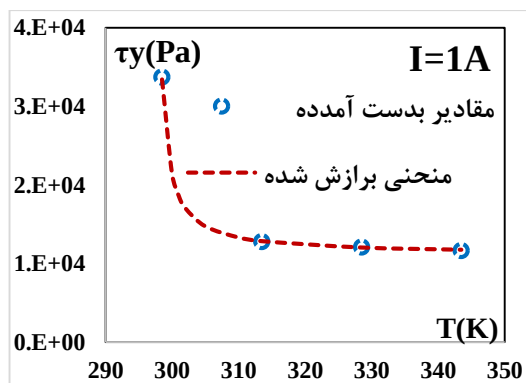


(ز)

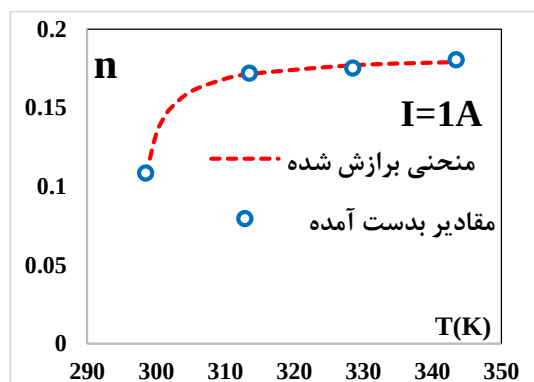
شکل ۴-۱۵: بررسی تابعیت دمایی پارامترهای مدل غیرنیوتونی ارائه شده در جریان های $I=0.5A$, $I=0.75A$



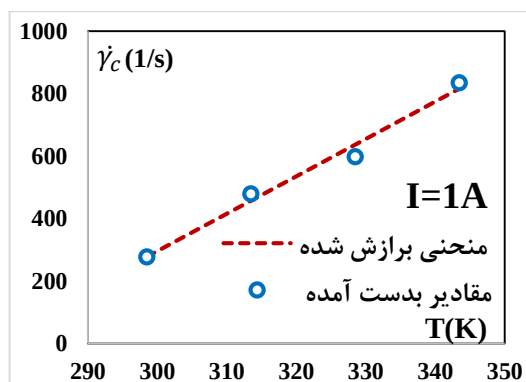
(ب)



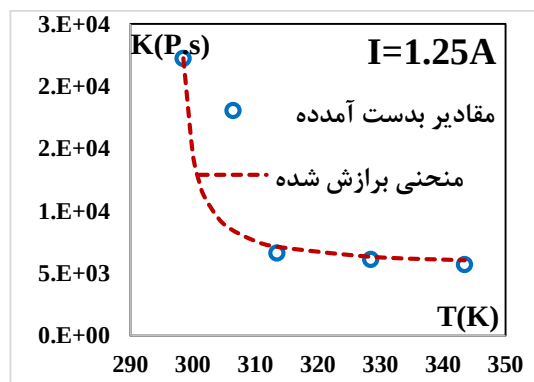
(الف)



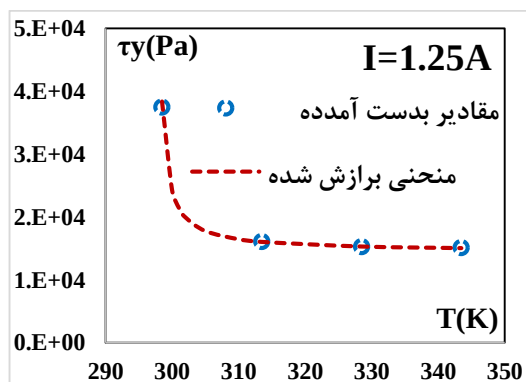
(د)



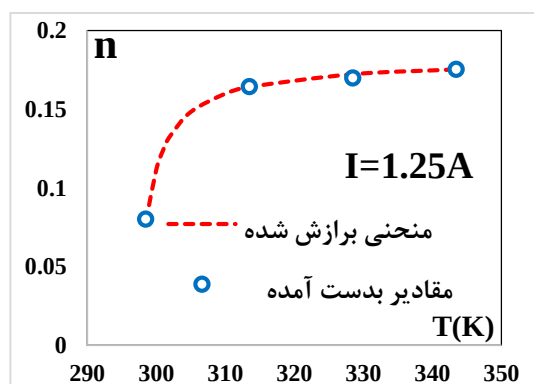
(ج)



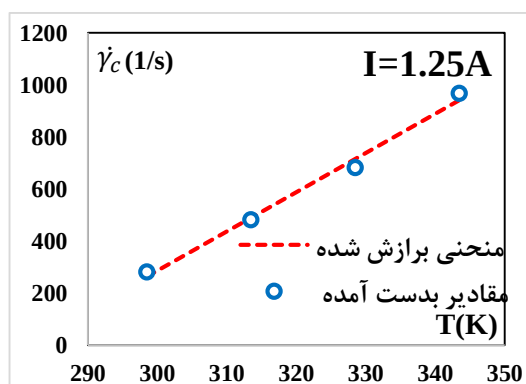
(ب)



(الف)

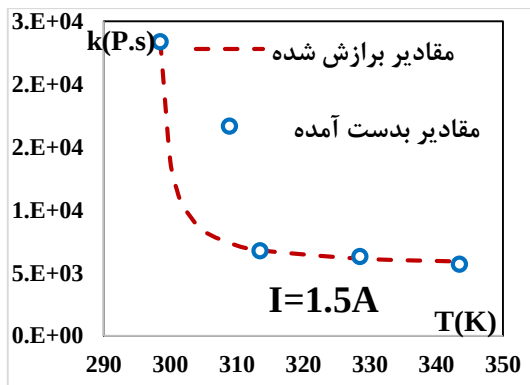


(د)

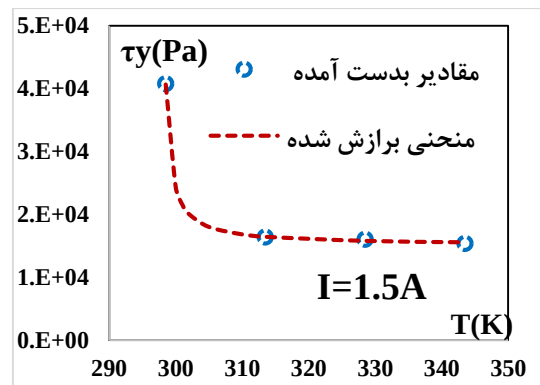


(ج)

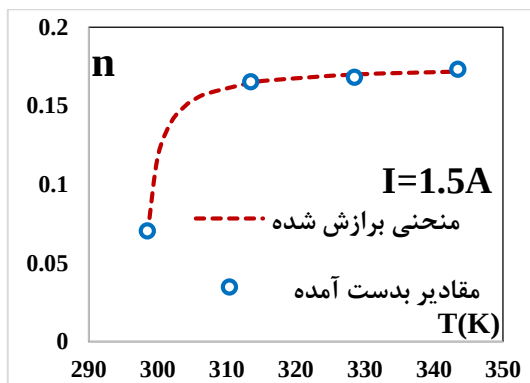
شکل ۴-۱۶: بررسی تابعیت دمایی پارامترهای مدل غیرنیوتونی ارائه شده در جریان های $I=1A$, $I=1.25A$



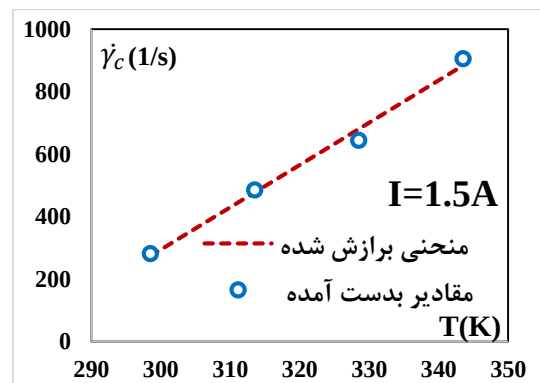
(ب)



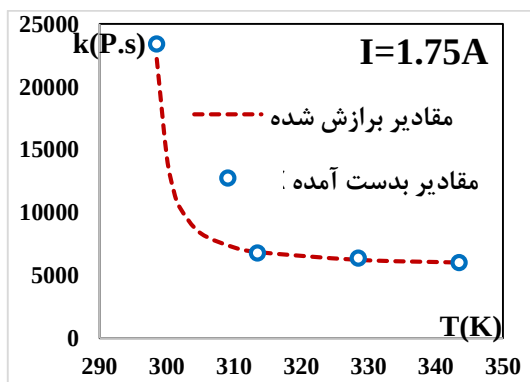
(الف)



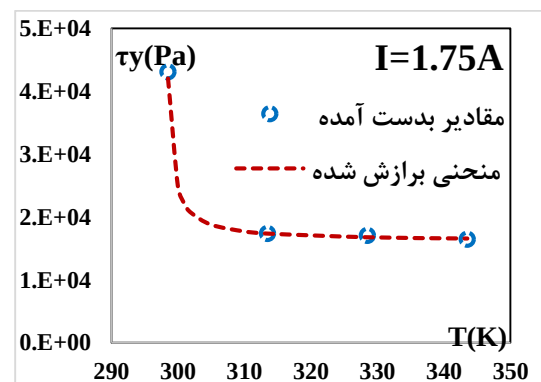
(د)



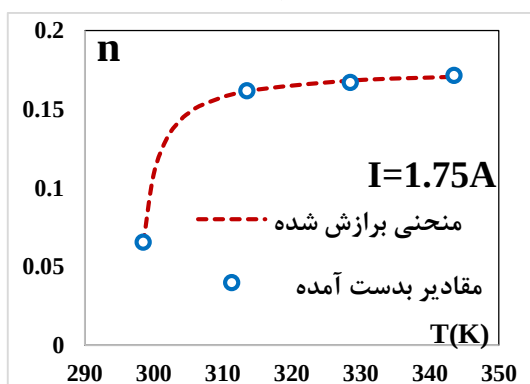
(ج)



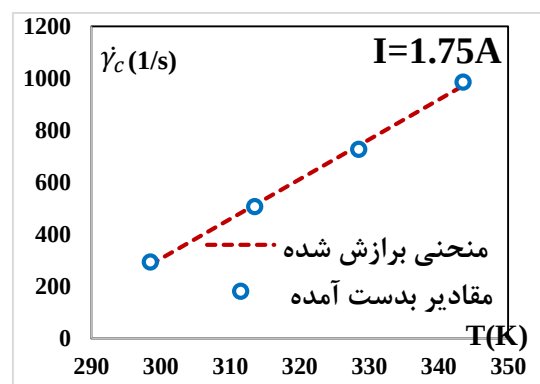
(ب)



(الف)

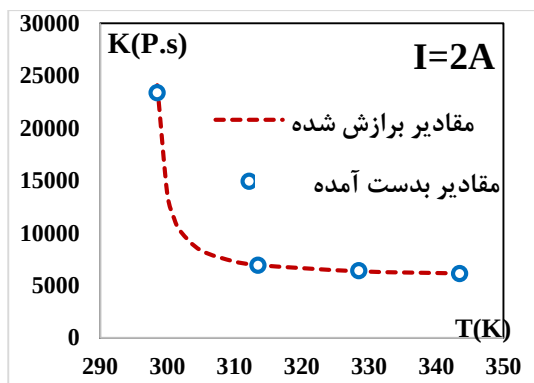


(د)

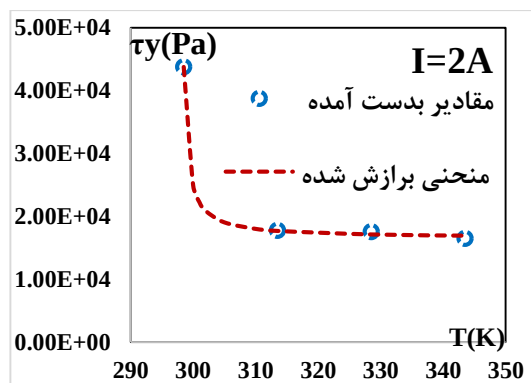


(ج)

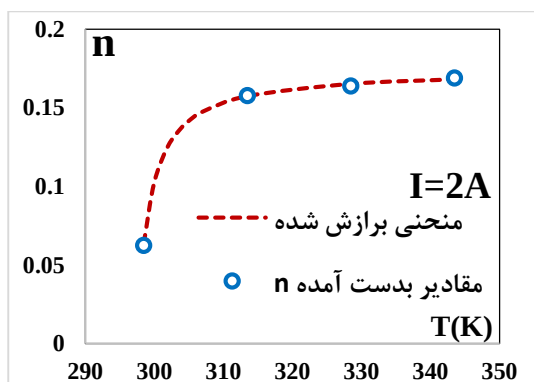
شکل ۴-۱۷: بررسی تابعیت دمایی پارامترهای مدل غیرنیوتونی ارائه شده در جریان های $I=1.5A$, $I=1.75A$



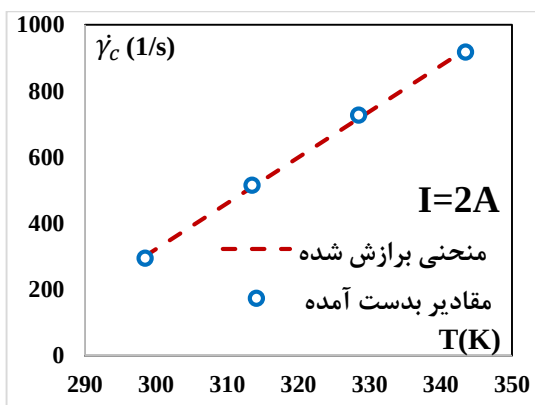
(ب)



(الف)



(د)



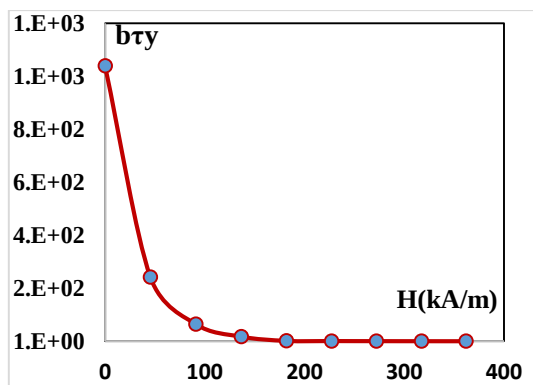
(ج)

شکل ۴-۱۸: بررسی تابعیت دمایی پارامترهای مدل غیرنیوتونی ارائه شده در جریان $I=2A$

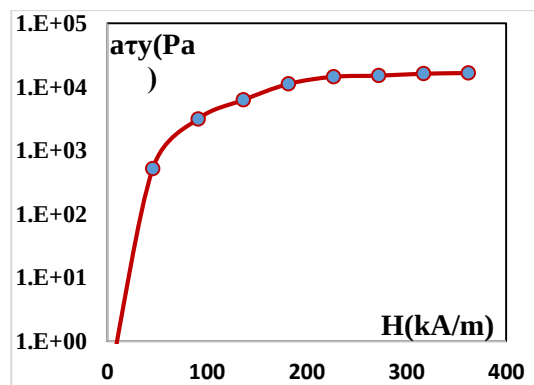
۴-۳-۳ تأثیر میدان مغناطیسی بر پارامترهای مدل ارائه شده

در شکل‌های ۴-۱۹ و ۴-۲۰، تغییرات پارامترهای مربوط به توابع دمایی تنش تسلیم و پارامتر K که مربوط به رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم می‌باشد، با میدان مغناطیسی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش میدان مغناطیسی، مقادیر این پارامترها به تدریج به اشباع می‌رسد که این نشان‌دهنده برازش درست داده‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر، این ثابت‌ها بیانگر تغییرات میدانی تنش تسلیم و لزجت می‌باشند و از آنجایی که طبق نتایج تست‌های رئومتر، مقادیر تنش و لزجت با افزایش میدان به تدریج به حالت اشباع مغناطیسی می‌رسند، در نتیجه ثوابت دست آمده، این روند را به درستی پیش‌بینی می‌کند.

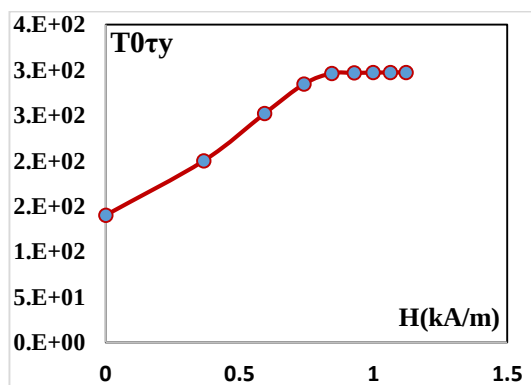
در شکل ۴-۲۱ تغییرات تنش تسلیم و پارامترهای مربوط به رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم با میدان



(ب)

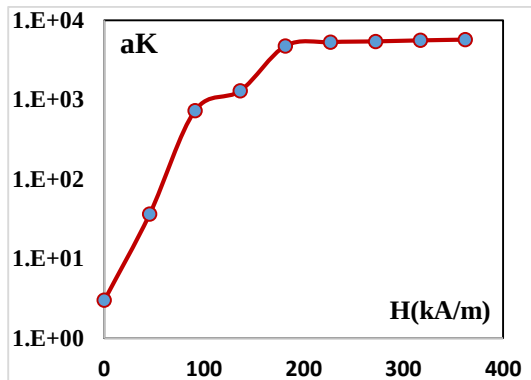


(الف)

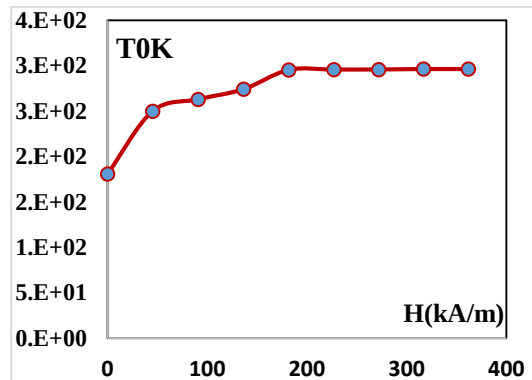


(ج)

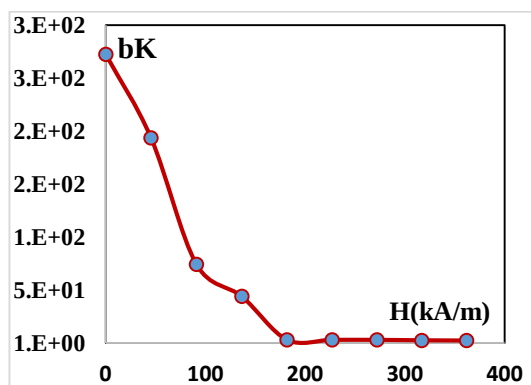
شکل ۴-۱۹: تابعیت میدانی پارامترهای مربوط به تابع دمایی تنش تسلیم



(ب)



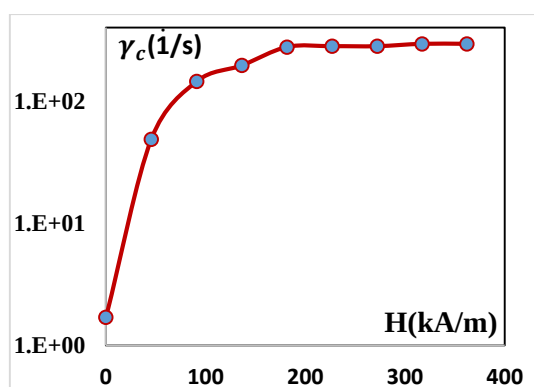
(الف)



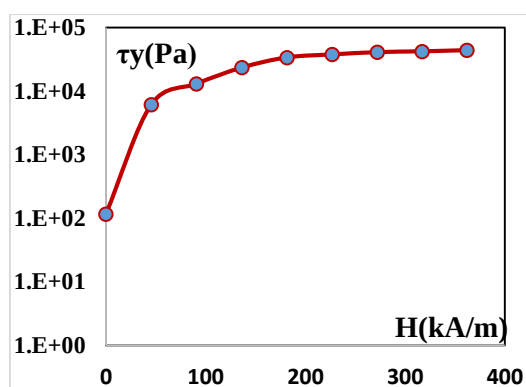
(ج)

شکل ۴-۲۰: تابعیت میدانی پارامترهای مربوط به تابع دمایی پارامتر K

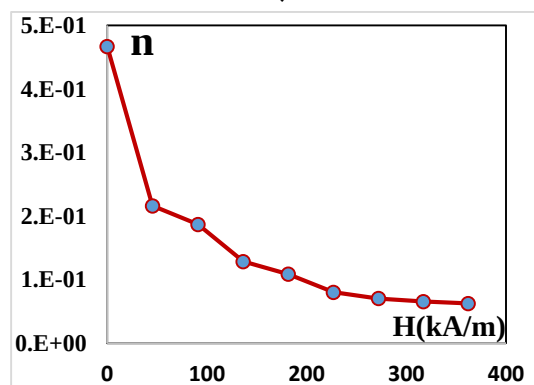
مغناطیسی، در مدل ارائه شده در این پژوهش، در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد نشان داده شده است. همچنین تغییرات تنش تسلیم و لزجت پلاستیک در مدل بینگهام پلاستیک در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است. تنش تسلیم و لزجت پلاستیک به صورت توابعی از میدان مغناطیسی در معادلات (۴-۸ و ۴-۹) نشان داده شده اند. همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود، علاوه بر تنش تسلیم، لزجت پلاستیک در مدل بینگهام پلاستیک و پارامتر K در مدل ارائه شده، با افزایش میدان مغناطیسی افزایش می یابند. به عبارت دیگر رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم نیز تابع میدان مغناطیس می باشد. این در حالی است که در تمامی فرمول های ارائه شده در پژوهش های پیشین، لزجت پلاستیک سیال با لزجت سیال در حالت بدون میدان یکسان در نظر گرفته شده است و فرمول ها بر این مبنا توسعه داده شده اند. این موضوع می تواند در تنش های تسلیم پایین تر و سرعت های بالاتر و شرایطی که سیال و در نتیجه دمپر مگنتورئولوژیکال در شرایط پس از تسلیم قوی کار می کنند، باعث خطای قابل توجه بشود.



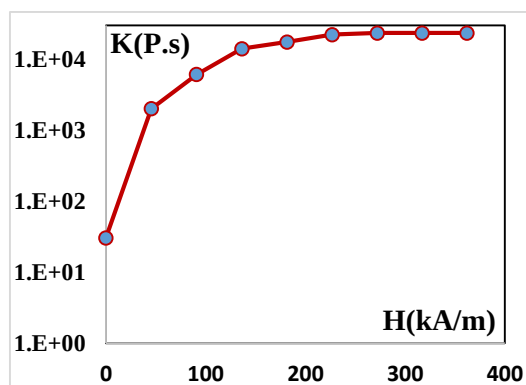
(ب)



(الف)

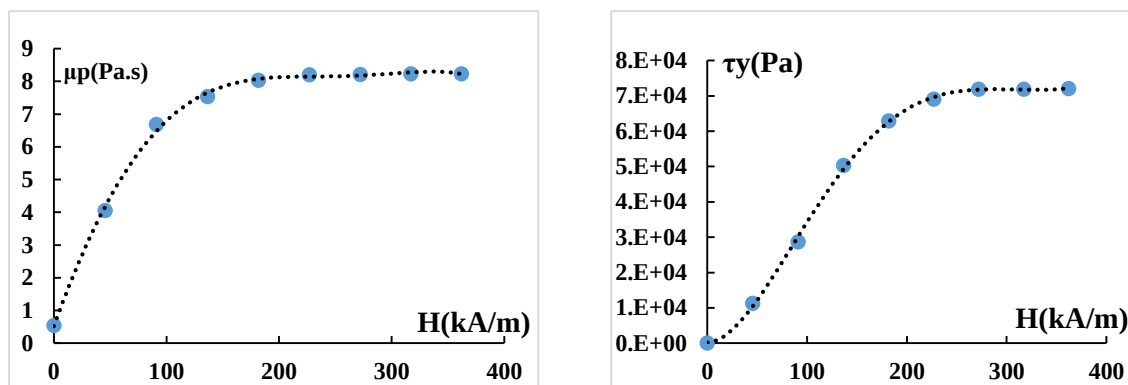


(د)



(ج)

شکل ۴-۲۱: تغییرات تنش تسلیم و پارامترهای مربوط به ناحیه پس از تسلیم در مدل ارائه شده با میدان مغناطیسی



شکل ۲۲-۴: تغییرات تنش تسلیم و لزجت پلاستیک در مدل بینگهام پلاستیک

$$\tau_y = -6E-08H^5 + 8E-05H^4 - 0.0366H^3 + 6.2274H^2 + 10.578H + 208.14 \quad (۸-۴)$$

$$\mu_p = -1E-09H^4 + 2E-06H^3 - 0.0006H^2 + 0.1176H \quad (۹-۴)$$

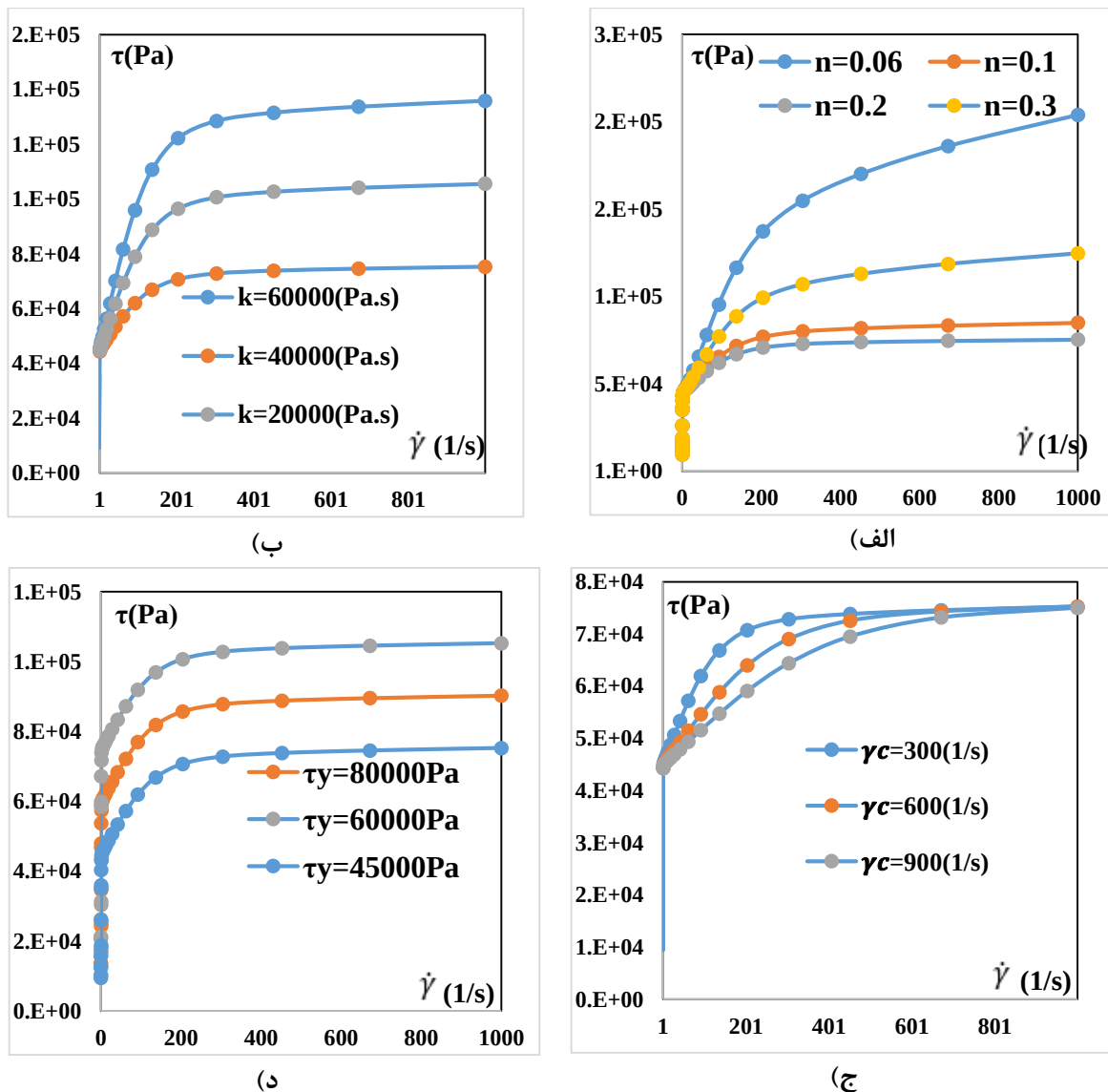
۴-۳-۴ تأثیر پارامترهای مدل ارائه شده بر رفتار رئولوژیکی سیال مگنتورئولوژیکال:

تغییر رفتار سیال مگنتورئولوژیکال MRF5 ساخته شده با تغییر پارامترهای مدل، در شکل ۲۳-۴ نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده، با افزایش پارامتر n مقادیر و شیب منحنی تنش-برش در هر دو ناحیه پس از تسلیم افزایش می یابد. افزایش پارامتر K ، بیانگر افزایش مقادیر تنش در همه نواحی می باشد، اما شیب منحنی تنها در ناحیه اول افزایش می یابد. بطوریکه می توان گفت میزان رقیق شوندگی در ناحیه اول کاهش می یابد. تأثیر تغییرات $\dot{\gamma}$ بر منحنی تنش-برش به گونه ای است که افزایش این پارامتر نشان دهنده بزرگ تر شدن ناحیه پس از تسلیم اول و همچنین افزایش میزان رقیق شوندگی سیال در این ناحیه می باشد. مطابق نتایج نشان داده شده در شکل ۲۳-۴ د تغییرات تنش تسلیم تنها مقادیر تنش در هر دو ناحیه پس از تسلیم را تغییر می دهد.

۴-۴ تأثیر جنس سیال بر خصوصیات رئولوژی سیال مگنتورئولوژیکال

در شکل ۲۴-۴ نتایج تست رئومتری سیال ساخته شده بهینه مگنتورئولوژیکال MRF5 با ۸۵٪ درصد وزنی پودر آهن و ۱ درصد وزنی ماده نگه دارنده، با نتایج تست رئومتری روغن مگنتورئولوژیکال لرد سی جی ۱۴۰^۱

^۱ LORD MRF CG140



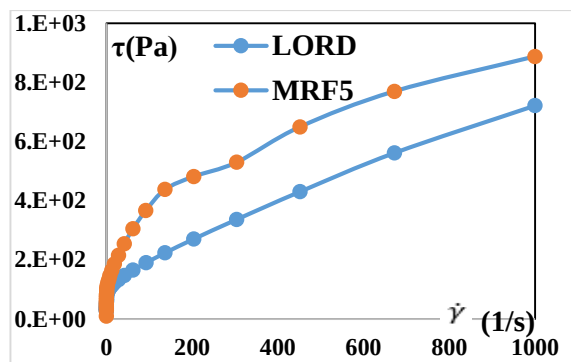
شکل ۴-۲۳: تأثیر پارامترهای مدل ارائه شده بر رفتار رئولوژی سیال مگنتورئولوژیکال

(ساخت کشور آمریکا) در شرایط اشباع مغناطیسی مقایسه شده است. همین طور که مشاهده می شود با توجه با درصد پودر آهن یکسان در هر دو روغن، تنش تسلیم هر دو روغن نزدیک به یکدیگر می باشد؛ و تفاوت جزئی می تواند به خاطر تفاوت درصد خلوص پودر آهن در دو سیال باشد. باین حال رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم در شرایط اشباع همسان نمی باشد. این پدیده به دلیل تفاوت جنس سیال (سیال پایه و ماده نگهدارنده) در دو روغن می باشد. بنا براین تفاوت جنس سیال می تواند در رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم تأثیرگذار باشد. به گونه ای که مقادیر تنش سیال MRF5 ساخته شده در این پژوهش از مقادیر تنش به دست آمده از روغن لرد در ناحیه پس از تسلیم بیشتر می باشد. همچنین مطابق شکل ۴-۲۴ مقادیر تنش به دست آمده از روغن

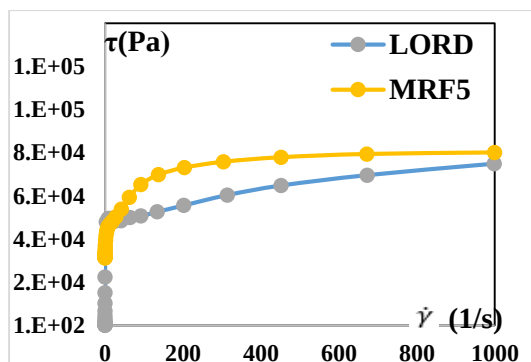
ساخته شد در این پژوهش در میدان 181 kA/m با نتایج روغن لرد در حالت اشباع شبیه می‌باشد که با توجه به قیمت قابل توجه روغن مگنتورئولوژیکال لرد سی جی ۱۴۰، ساخت سیال بهینه مگنتورئولوژیکال MRF5 با خصوصیات رئومتر مشابه روغن مذکور حائز اهمیت ویژه می‌باشد. در نتیجه سیال ساخته شده مگنتورئولوژیکال MRF5، علاوه بر غلظت و پایداری، از لحاظ شباهت رفتار آن به روغن مگنتورئولوژیکال لرد سی جی ۱۴۰، نیز مناسب بوده و می‌توان از آن به عنوان روغن بهینه در دمپرهای مگنتورئولوژیکال استفاده کرد. همچنین مطابق شکل ۴-۲۴-د روغن MRF 3 با ۳ درصد وزنی اسید استئاریک از روغن MRF5 با ۱ درصد وزنی پودر آهن در ناحیه پس از تسلیم مقادیر تنش بیشتری نشان می‌دهد. در نتیجه جنس سیال پایه و ماده نگهدارنده می‌تواند در رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم مؤثر باشد. از طرف دیگر سیال مگنتورئولوژیکال MRF5 به دلیل درصد وزنی پودر آهن بیشتر نسبت به سیال‌های MRF1 و MRF2 با به ترتیب ۶۵٪ و ۷۵٪ وزنی پودر آهن کربونیل) گستره وسیع تری از تنش‌های تسلیم و در نتیجه لزجت را پوشش می‌دهد.

۴-۵ نتیجه آزمایش‌های خصوصیات حرارتی

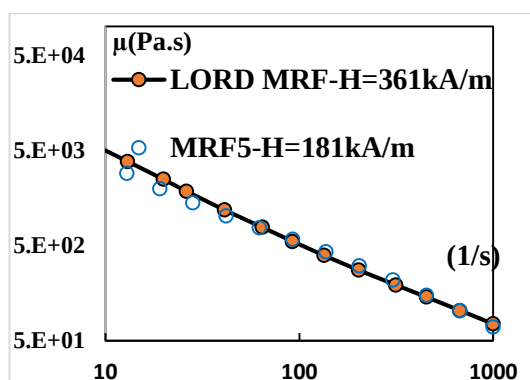
چگونگی تغییرات ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه سیال MRF5 با دما، با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری خصوصیات حرارتی که در فصل ۲ توضیح داده شد، به دست آمده و در شکل ۴-۲۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ضریب هدایت حرارتی در بازه ۲۵-۷۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش دما روند کاهشی نشان می‌دهد. در حالیکه ظرفیت گرمایی ویژه سیال مگنتورئولوژیکال MRF5، ساخته شده در این پژوهش، در این بازه دمایی با افزایش دما تا ۵۵ درجه افزایش می‌یابد و در فاصله ۵۵-۷۰ درجه سانتی‌گراد تغییر محسوسی نمی‌کند. همچنین، توابع حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی K و C_p در روابط (۴-۱۰) و (۴-۱۱) بیان شده‌اند که از این روابط جهت مدل‌سازی حرارتی دمپر مگنتورئولوژیکال، در حل عددی استفاده می‌شود.



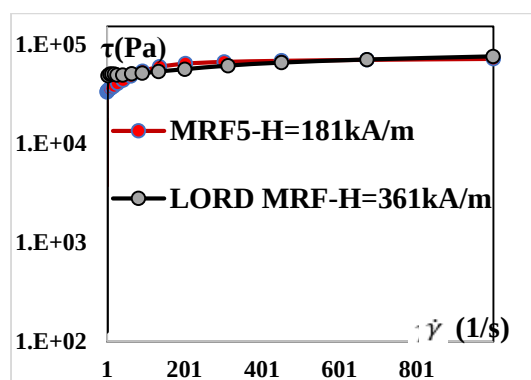
(ب)



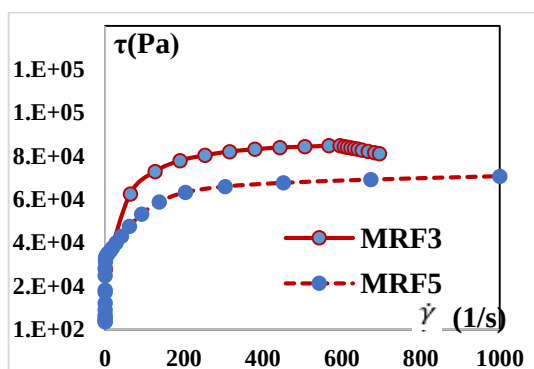
(الف)



(د)

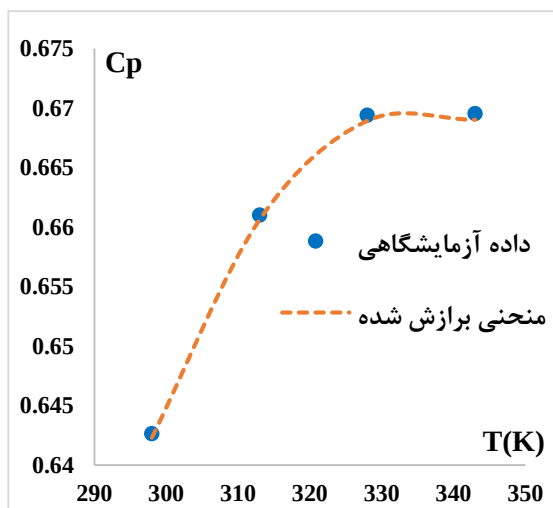


(ج)

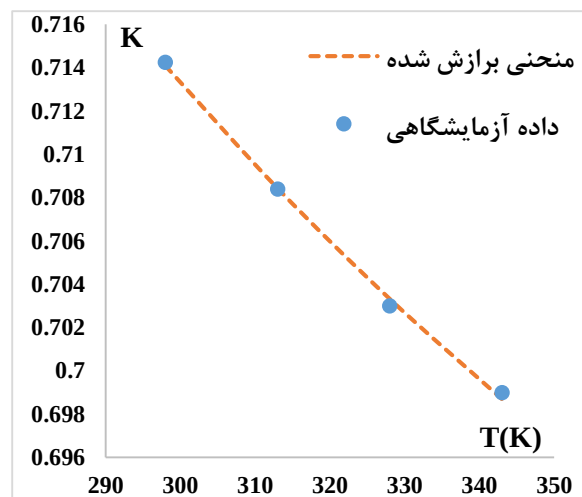


(ه)

شکل ۴-۲۴: الف) مقایسه نتایج تست‌های رئومتر سیال بهینه مگنتورئولوژیکال MRF5 با روغن مگنتورئولوژیکال لرد سی جی ۱۴۰ در شرایط اشباع (ب) بدون میدان مغناطیسی (ج) تنش نرخ برش در میدان ۱۸۱kA/m و ۳۶۱kA/m (د) لزجت نرخ برش در میدان ۱۸۱kA/m و ۳۶۱kA/m (ه) اثر ماده نگهدارنده



(ب)



(الف)

شکل ۴-۲۵: چگونگی تغییرات ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه سیال MRF5 با دما

$$C_p = 0.000000088T^3 - 0.0001048872T^2 + 0.0406642678T - 4.4900670139 \quad (۱۰-۴)$$

$$K(T) = 0.6049 \exp(49.45 / (T)) \quad (۱۱-۴)$$

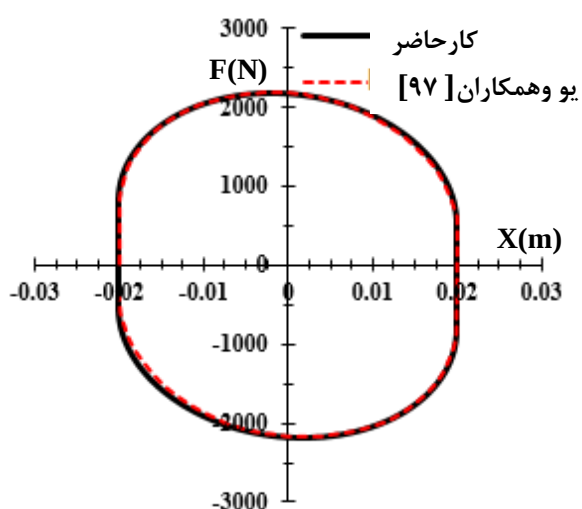
فصل پنجم

**نتایج مدل سازی شبه استاتیک، ناپایا و عددی و بررسی
پارامتریک دمپر مگنتورئولوژیکال**

۵-۱ مقایسه روش‌های شبه استاتیک و ناپایای ارائه‌شده و بررسی پارامتریک

در این قسمت از پژوهش به مقایسه بین نتایج حاصل از روش‌های شبه استاتیک و ناپایای ارائه‌شده در این پژوهش برای مدل‌سازی و بررسی پارامتریک دمپر مگنتورئولوژیکال پرداخته می‌شود.

ابتدا، روش تحلیلی ناپایای ارائه‌شده در این پژوهش برای دمپر مورد مطالعه توسط یو و همکاران [۹۷] مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل، مطابق شکل ۵-۱، مطابقت خوبی با نتایج به دست آمده در پژوهش مذکور دارد. هندسه کار مذکور مربوط به به دمپر دو متحرک با یک ولو موازی سیلندر می باشد.



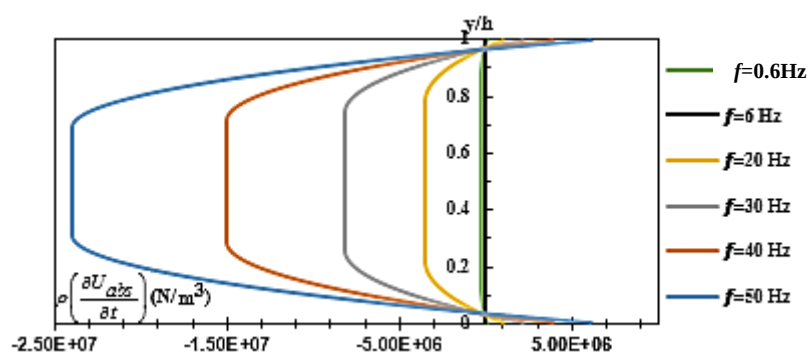
شکل ۵-۱: مقایسه نتایج کار حاضر با مطالعات پیشین [۹۷]

۵-۱-۱ بررسی میدان جریان، ضخامت ناحیه پلاگ و اختلاف فاز فشار و سرعت سیال

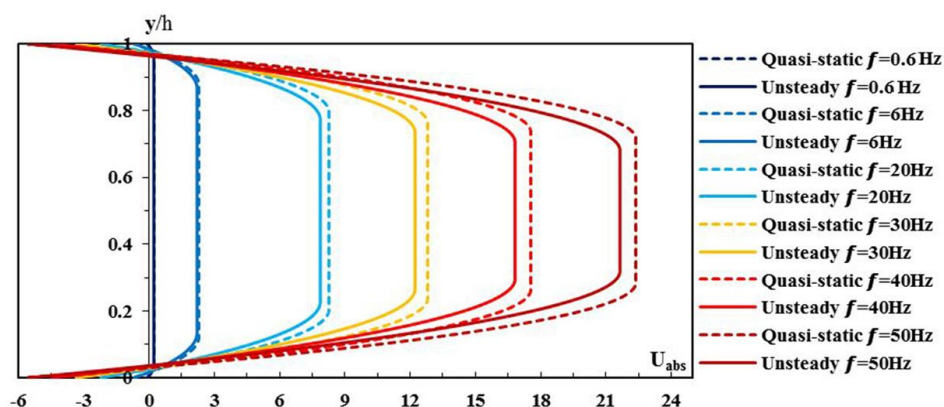
مگنتورئولوژیکال

نتایج حاصل از مدل‌سازی میدان جریان و همچنین تغییرات ترم اینرسی در عرض شیار، در فرکانس‌های مختلف، در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ترم اینرسی که در مرکز شیار مقادیر بیشتری نسبت به نواحی نزدیک به دیواره دارد، با افزایش فرکانس، افزایش می‌یابد. در نتیجه مطابق شکل اختلاف بین حل شبه استاتیک و ناپایا در مدل‌سازی میدان جریان زیاد می‌شود.

ضخامت ناحیه پلاگ بی‌بعد، برای ارزیابی وضعیت قدرت جریان کنترل‌شده با میدان بارزش است. در نتیجه بررسی عوامل مؤثر بر این پارامتر حائز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از هر دو روش تحلیلی شبه استاتیک و ناپایای ارائه‌شده، تغییرات ضخامت ناحیه پلاگ بی‌بعد، بازمان و فرکانس به‌دست‌آمده است و در شکل ۳-۵ نشان داده‌شده است. همان‌طور که در فصل ۳ بیان شد، با حل دستگاه سه معادله، سه مجهول علاوه بر گرادیان فشار، مختصات ناحیه پلاگ و در نتیجه ضخامت ناحیه پلاگ نیز قابل محاسبه می‌باشد. مقایسه نتایج حل شبه استاتیک و حل ناپایا در محاسبه ضخامت ناحیه پلاگ بی‌بعد نشان می‌دهد، افزایش ترم اینرسی در انتهای کورس باعث خطای قابل توجه روش حل شبه استاتیک نسبت به حل ناپایا می‌شود. همچنین اختلاف قابل توجه بین نتایج حاصل از مدل‌سازی به روش ناپایا و شبه استاتیک، در پیش‌بینی ضخامت ناحیه پلاگ، در فرکانس‌های بالا که ترم اینرسی قابل توجه است به میزان چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

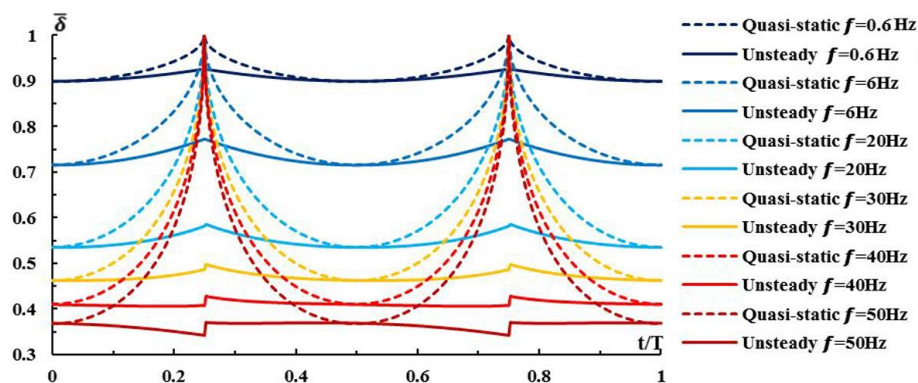


(الف)



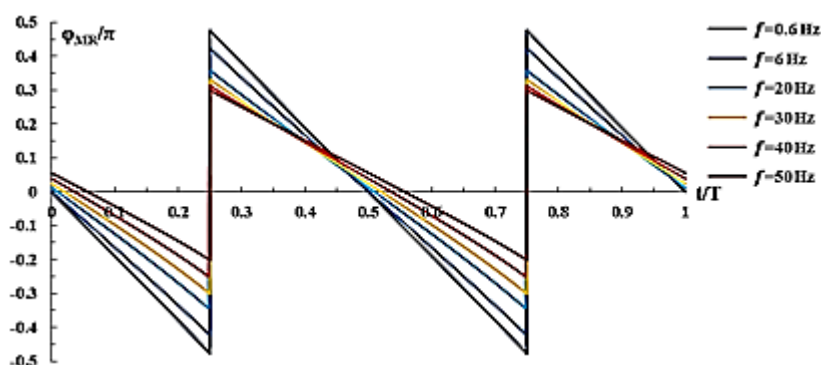
(ب)

شکل ۳-۵ (الف) تغییرات (الف) میدان جریان و (ب) اینرسی با فرکانس در نواحی تحت میدان مغناطیسی



شکل ۳-۵: تغییرات ضخامت ناحیه پلاگ با زمان و فرکانس

یکی از مزایای روش حل ناپایای ارائه شده در این پژوهش، علاوه بر محاسبه دقیق تر ضخامت ناحیه پلاگ در هر زمان، امکان اندازه گیری مستقیم اختلاف فاز بین دبی جریان و فشار می باشد. از آنجایی که اعداد به دست آمده برای اختلاف فشار و دبی جریان در این روش، مختلط می باشند. با محاسبه اختلاف آرگومان مربوط به این پارامترها، اختلاف فاز بین آن ها محاسبه می شود. تغییرات اختلاف فاز بین اختلاف فشار و سرعت سیال مگنتورئولوژیکال در عرض شیار پیستون، ϕ ، در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۴-۵ نشان داده شده است، با نزدیک شدن به انتهای کورس و کاهش اثر سرعت سیال و گرادیان سرعت در معادله مومنتوم و با توجه به ثابت بودن مقدار تنش تسلیم در طول کورس، اختلاف فاز بین فشار و سرعت ناشی از اثر تنش تسلیم، در انتهای کورس افزایش می یابد. همچنین با افزایش فرکانس و در نتیجه افزایش اثر سرعت و گرادیان سرعت سیال در معادله مومنتوم، میزان اختلاف فاز ناشی از تنش تسلیم کاهش می یابد.



شکل ۴-۵: تغییرات اختلاف فاز بین اختلاف فشار و سرعت جریان با زمان

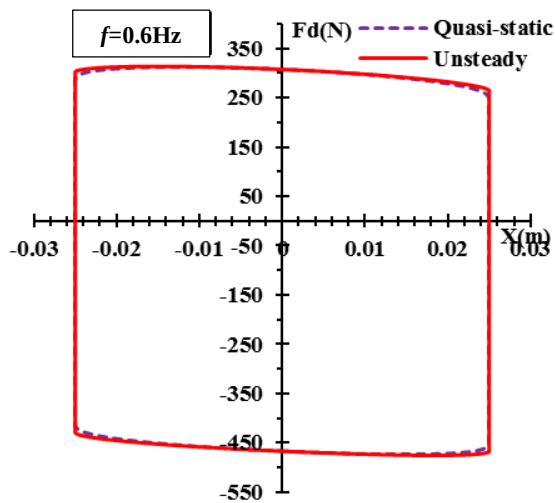
۵-۱-۲ بررسی اثر منحنی‌های ورودی با دامنه و فرکانس‌های مختلف

در این قسمت اثر منحنی ورودی با فرکانس‌های (۰,۶-۵۰ هرتز) و دامنه‌های (۰,۱۲۵-۰,۰۲۵ متر) بر منحنی‌های نیرو-جابجایی و نیرو-سرعت و همچنین اثر ترم اینرسی بر آن‌ها با مقایسه حل‌های شبه استاتیک و ناپایا بررسی می‌شود.

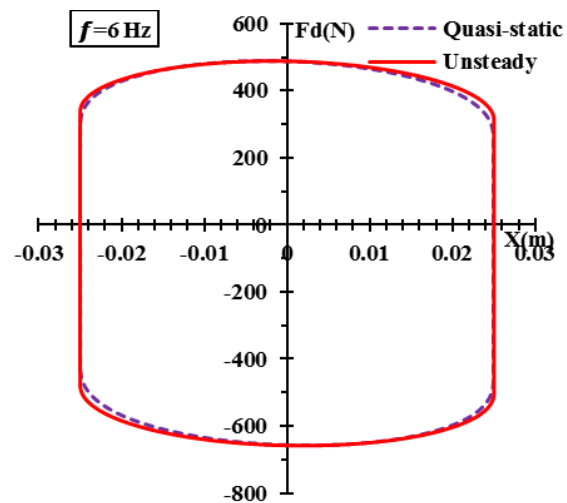
با استفاده از نتایج حاصل از مدل‌سازی جریان سیال مگنتورئولوژیکال در نواحی داخل شیار پیستون دمپر مگنتورئولوژیکال مورد مطالعه، به روش‌های شبه استاتیک و ناپایا، لوپ‌های نیرو-جابجایی و نیرو-سرعت در شکل ۵-۵ و ۵-۶ برای فرکانس‌های ۰,۶-۵۰ هرتز نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است، با افزایش فرکانس، ماکزیمم نیروی دمپینگ از ۶۰۰ به ۳۰۰۰ نیوتون افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش فرکانس نوسان، خطای حل شبه استاتیک نسبت به حل ناپایا بخصوص در نواحی نزدیک به انتهای کورس بیش از ۱۰۰ درصد افزایش می‌یابد. این اختلاف قابل توجه، به‌ویژه در لوپ‌های نیرو-سرعت قابل مشاهده است. علت این پدیده اثر ترم اینرسی می‌باشد که مطابق شکل ۵-۷ با افزایش فرکانس، به‌ویژه با نزدیک شدن به انتهای کورس زیاد می‌شود و باعث حداکثر اختلاف بین دو روش در انتهای کورس شده است. همچنین مقایسه بین نتایج به‌دست آمده برای لوپ‌های نیرو-سرعت با استفاده از هر دو روش نشان می‌دهد، روش شبه استاتیک خطای قابل ملاحظه‌ای در محاسبه مساحت تحت لوپ‌های نیرو-سرعت که انرژی دمپ شده در واحد زمان را نشان می‌دهد دارد.

به‌طور مشابه، افزایش دامنه منحنی ورودی، بر لوپ‌های نیرو-جابجایی و نیرو-سرعت در شکل ۵-۸ نشان داده شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده، افزایش دو برابری دامنه نوسان، باعث افزایش خطای روش شبه استاتیک در محاسبه نیروی دمپینگ از ۶۰ درصد به ۱۰۰ درصد در انتهای کورس که ترم اینرسی حداکثر است می‌شود. همچنین ماکزیمم نیرو به میزان ۱۰۰ درصد افزایش می‌یابد.

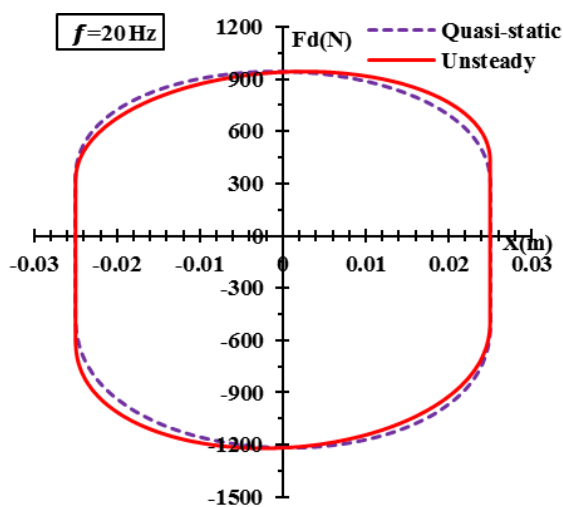
افزایش نیروی دمپینگ ناشی از افزایش پارامترهای فرکانس و دامنه نوسان منحنی ورودی به دلیل افزایش تنش‌های ویسکوز در ناحیه پس از تسلیم می‌باشد به عبارت دیگر با افزایش این دو پارامتر و در نتیجه کاهش عدد بینگهام، دمپر در شرایط پس از تسلیم قوی‌تری عمل می‌کند.



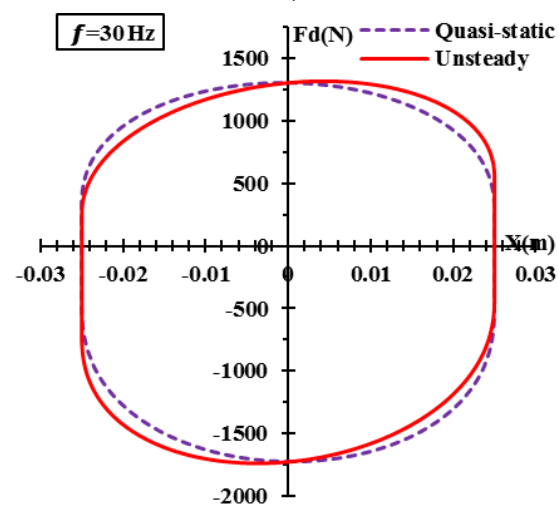
(الف)



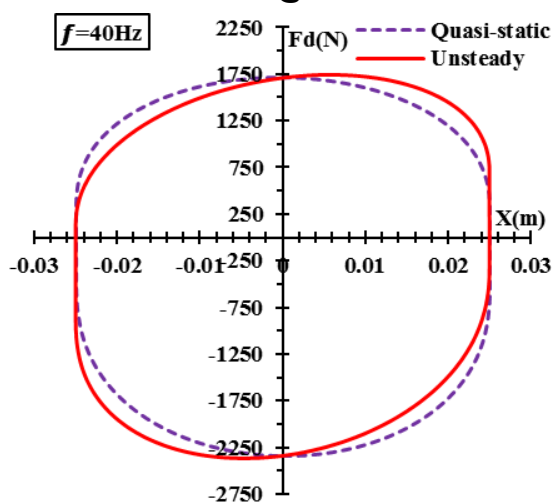
(ب)



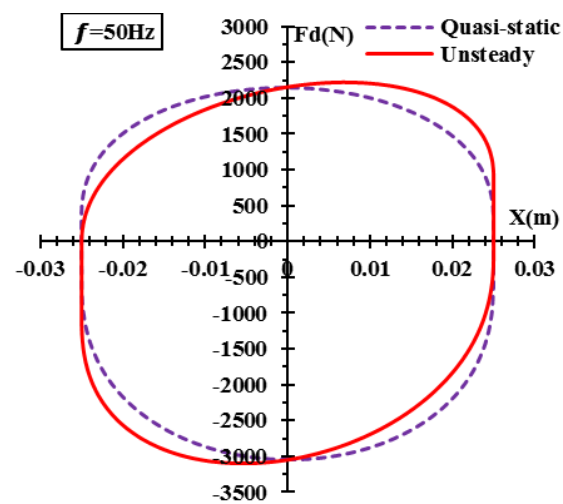
(ج)



(د)

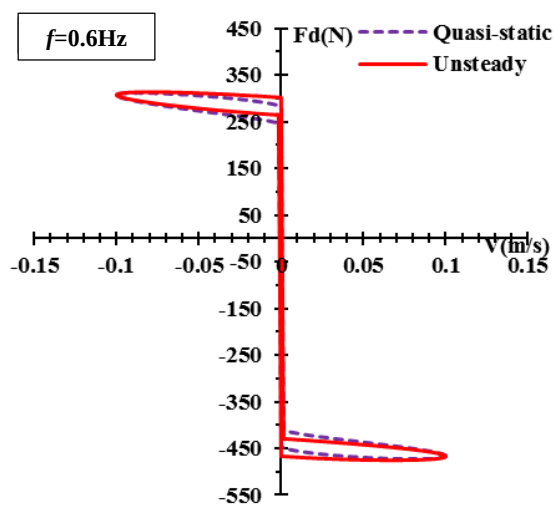


(ه)

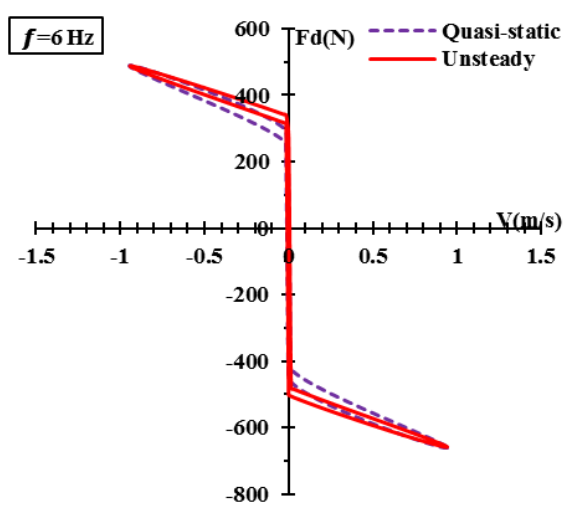


(و)

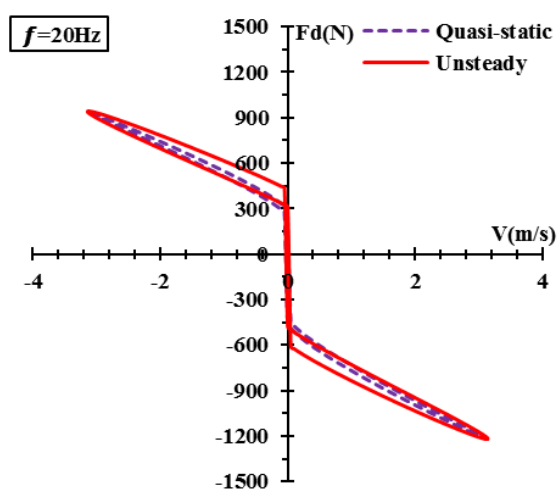
شکل ۵-۵: دیاگرام نیرو-جابجایی در فرکانس‌های الف) ۰٫۶ هرتز ب) ۶ هرتز ج) ۲۰ هرتز د) ۳۰ هرتز ه) ۴۰ هرتز و) ۵۰ هرتز



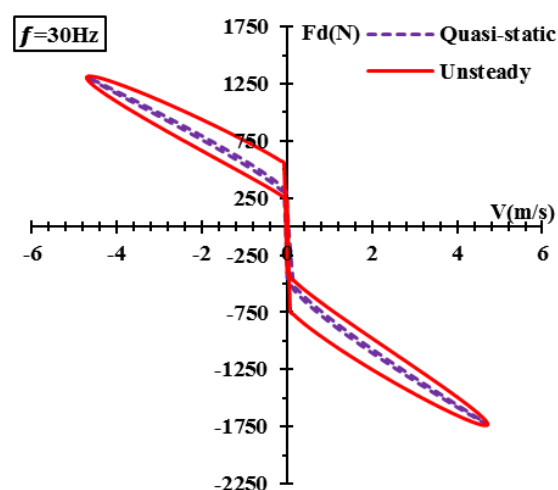
(الف)



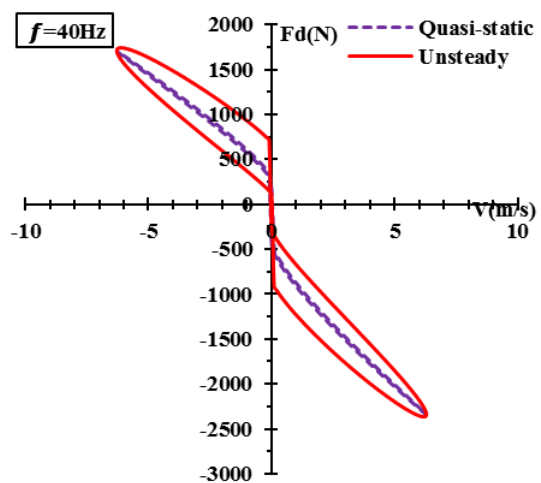
(ب)



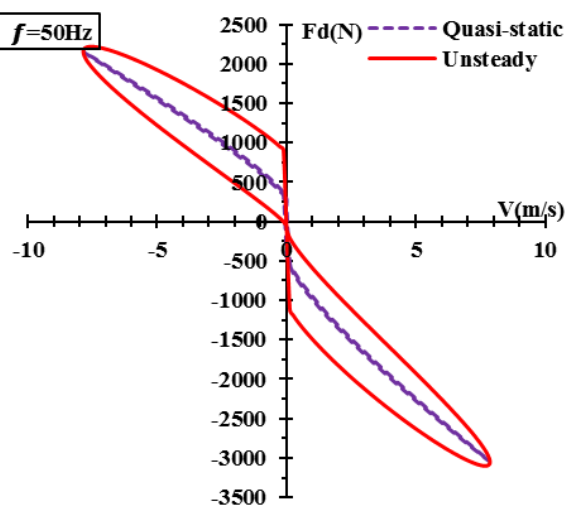
(ج)



(د)



(ه)



(و)

شکل ۵-۶: دیاگرام نیرو-جابجایی در فرکانس‌های الف) ۰.۶ هرتز ب) ۶ هرتز ج) ۲۰ هرتز د) ۳۰ هرتز ه) ۴۰ هرتز و) ۵۰ هرتز

۵-۱-۳ بررسی اثر تنش تسلیم

در شکل ۵-۹، اثر افزایش تنش تسلیم که ناشی از افزایش میدان مغناطیسی می‌باشد، بر مقادیر نیروی دمپینگ و اختلاف بین دو روش مدل‌سازی نشان داده شده است. مطابق داده‌های به دست آمده، در فرکانس بالا، افزایش تنش تسلیم از ۱۵ کیلو پاسکال به ۵۰ کیلو پاسکال، نیروی دمپینگ در میانه کورس را حداکثر ۵۰ درصد افزایش می‌دهد. همچنین با کاهش تنش تسلیم، اثر ترم اینرسی بر خطای روش شبه استاتیک افزایش می‌یابد.

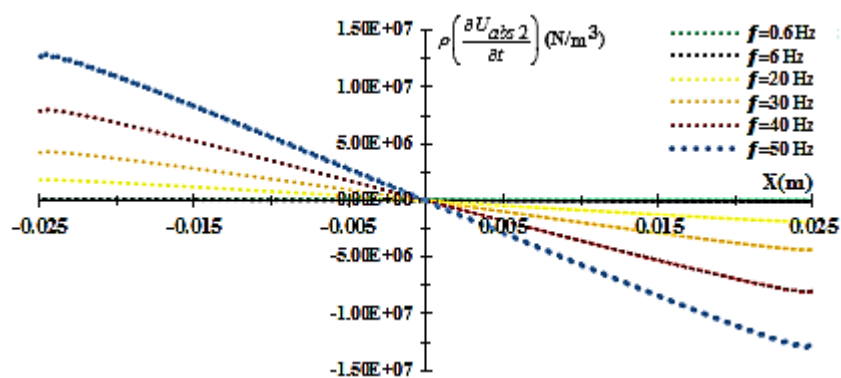
۵-۱-۴ بررسی اثر تغییر عرض شیار

اثر تغییر عرض شیار بر دمپینگ دمپر MR در ۷-۱۰، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در فرکانس‌های بالا که دمپر در شرایط پس از تسلیم قوی کار می‌کند، کاهش عرض شیار به دلیل افزایش گرادیان سرعت باعث افزایش قابل توجه نیروی دمپینگ می‌شود. همچنین افزایش عرض شیار منجر به افزایش خطای روش شبه استاتیک نسبت به ناپایا شده است.

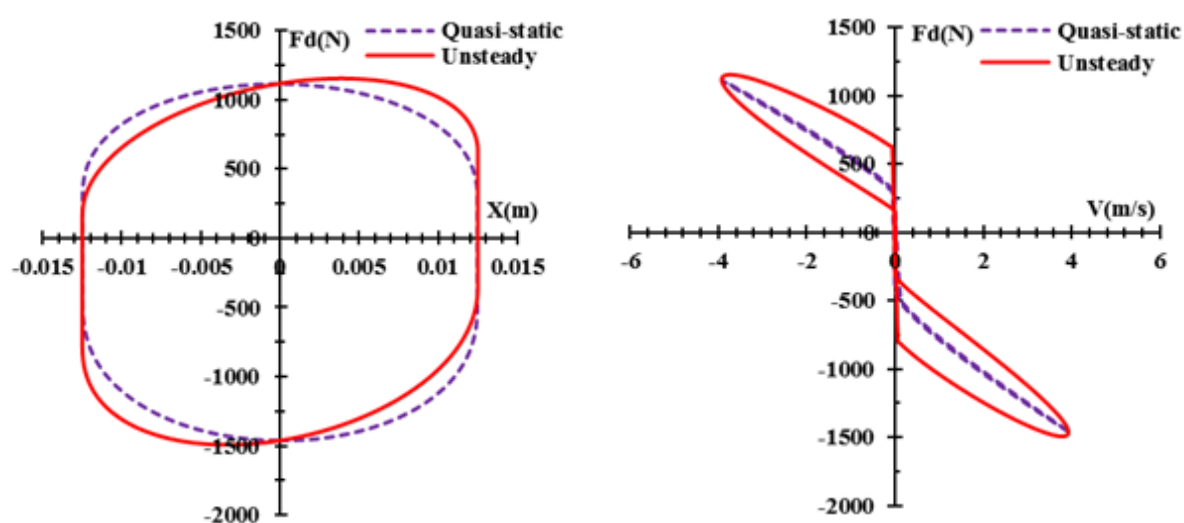
۵-۲ نتایج مدل‌سازی عددی و مقایسه نتایج مدل‌ها با یکدیگر

۵-۲-۱ بررسی استقلال حل از شبکه، گام زمانی و نوع مش بندی

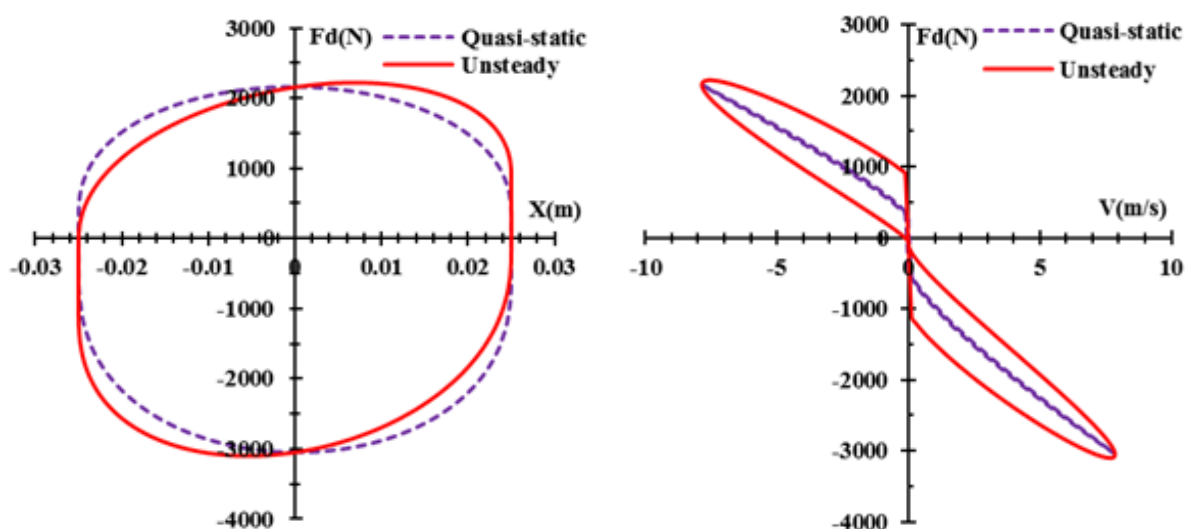
در این قسمت از پژوهش، نتایج به دست آمده از مدل‌سازی جریان و انتقال حرارت با استفاده از روش عددی که در فصل ۳ توضیح داده شد، بررسی می‌شود و ضمن مقایسه نتایج حاصل با نتایج روش‌های تحلیلی، اثرات میدان مغناطیسی بر میدان سرعت، فشار، تنش برشی دیواره، دما، شار انتقال حرارت روی دیواره در هر دو ناحیه تحت میدان مغناطیسی (فلنج‌ها) و نواحی بدون میدان (موازی سیم‌پیچ)، نیروی دمپینگ ناشی از تنش برشی روی دیواره و نیروی دمپینگ کل بررسی می‌شود. ابتدا نتایج بدون در نظر گرفتن اثرات حرارتی بررسی می‌شود و در مرحله بعد با اعمال اثرات حرارتی با استفاده از کوپل کردن معادلات انرژی با معادلات ناویر-ستوکس از طریق لزجت ظاهری تابع دما و میدان که در فصل ۴ به دست آمد، به بررسی اثرات حرارتی در حالت بدون میدان و حالت اشباع مغناطیسی در منحنی‌های ورودی با دامنه و فرکانس‌های متفاوت پرداخته می‌شود. از مزایای روش عددی امکان استفاده از مدل غیر نیوتونی دقیق‌تر ارائه شده در این پژوهش است که با در نظر گرفتن اثر رقیق شوندگی، دما و میدان، مقادیر تنش در هر دو ناحیه پس از تسلیم را به خوبی پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۵-۷: تغییرات اینرسی در طول کورس

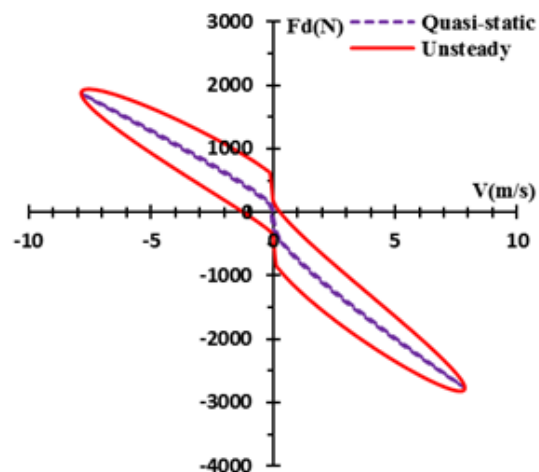
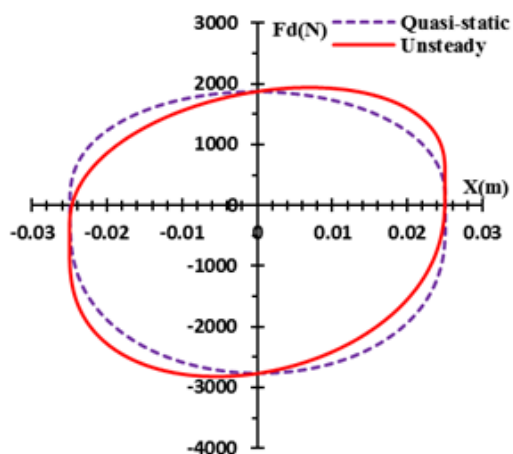


(الف)

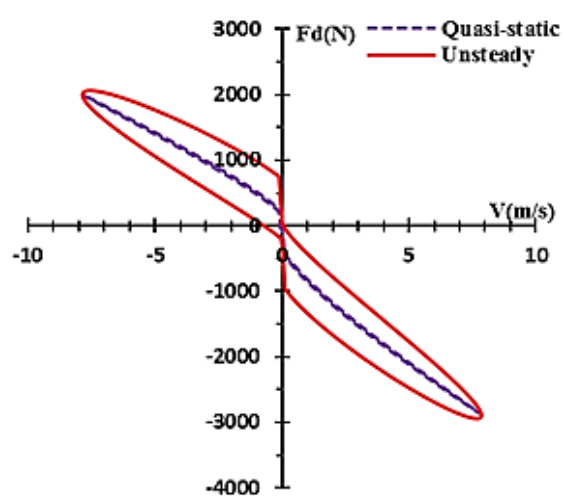
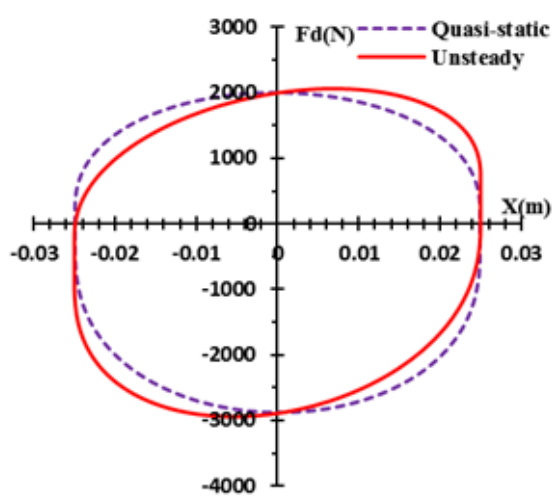


(ب)

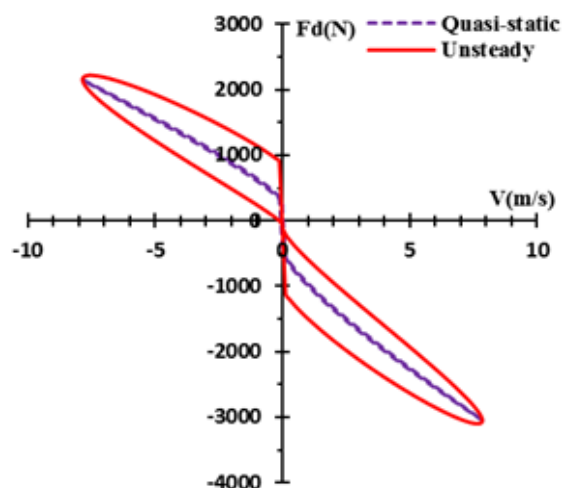
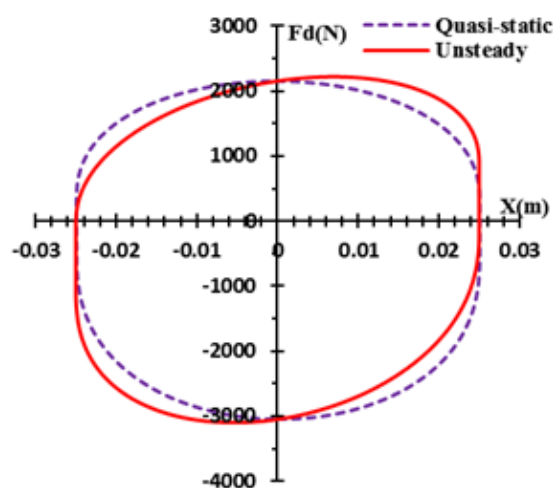
شکل ۵-۸: دیاگرام‌های نیرو و جابجایی و نیرو-سرعت در دامنه‌های (الف) $A=0.0125m$ (ب) $A=0.025m$



(الف)

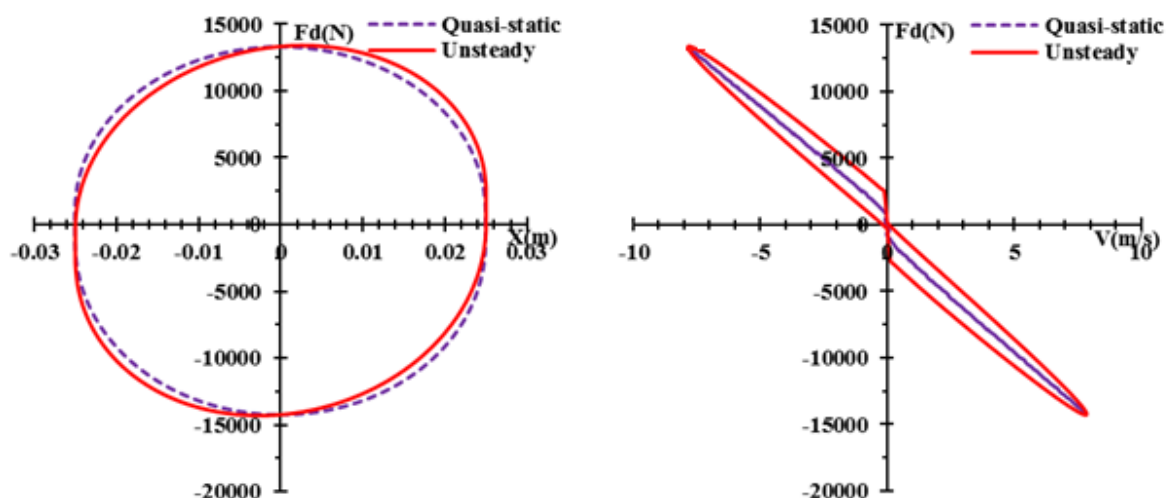


(ب)

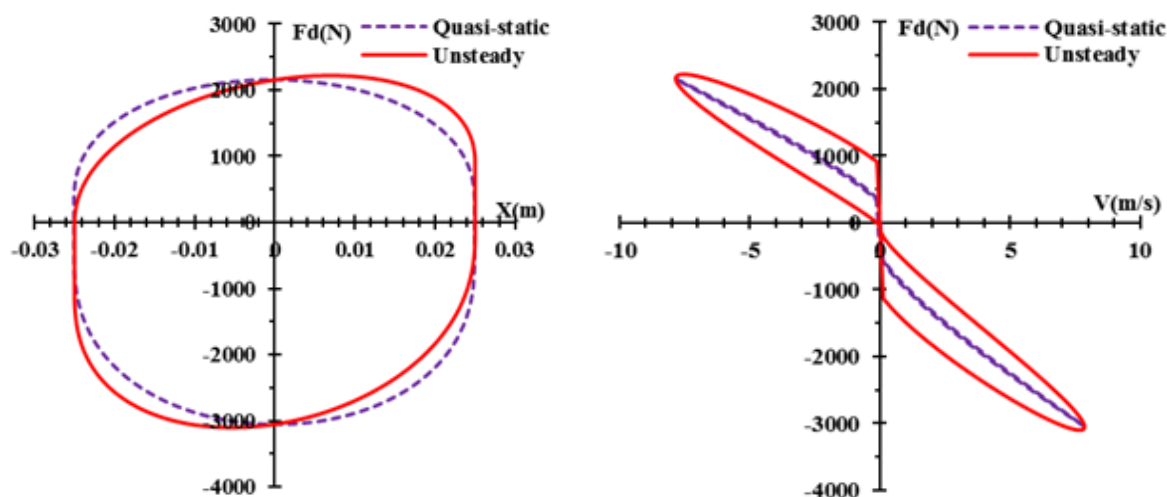


(ج)

شکل ۵-۹: دیاگرام نیرو و جابجایی و نیرو-سرعت در تنش‌های تسلیم (الف) ۱۵ کیلو پاسکال (ب) ۳۰ کیلو پاسکال (ج) ۵۰ کیلو پاسکال



(الف)

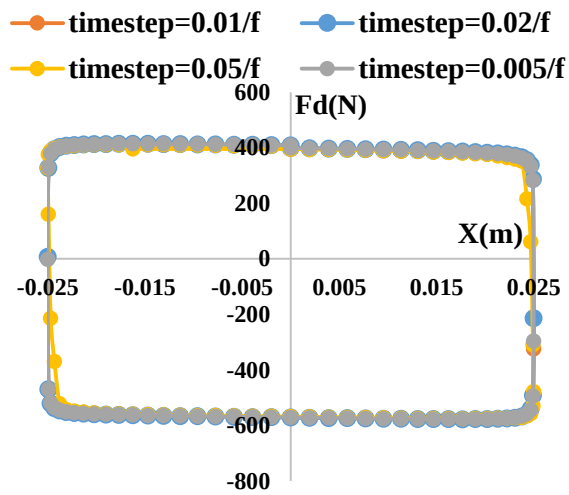


(ب)

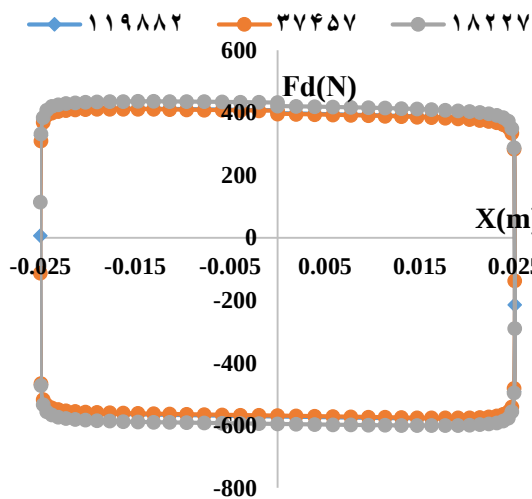
شکل ۵-۱۰: دیاگرام نیرو جابجایی و نیرو-سرعت در عرض شیارالف (۰,۰۰۷۵ متر ب) ۰,۰۰۱۵ متر

نتایج بدست آمده برای گام های زمانی مختلف و رابطه گام زمانی با فرکانس در شکل ۵-۱-الف مشاهده می شود. استقلال حل عددی انجام شده از شبکه برای سرعت و نیروی دمپینگ، در شکل ۵-۱-ب و ج نشان داده شده است. تعداد مش مورد استفاده جهت مدل سازی، ۳۷۴۵۰ مش کوآد^۱ می باشد و نمایی از مش در ناحیه تحت میدان و شیار پایین پیستون در شکل های شکل ۵-۱-د، ه و ه مشاهده می شود. نسبت عرض شیار (mm) به تعداد مش برای مش های استفاده شده به ترتیب ۰,۳، ۰,۱، ۰,۰۵ می باشد.

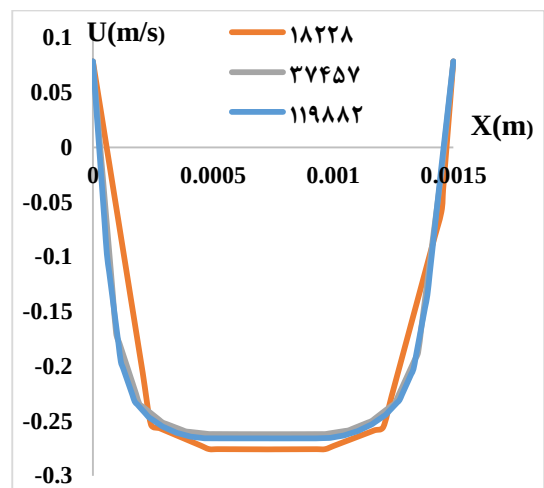
^۱Quad



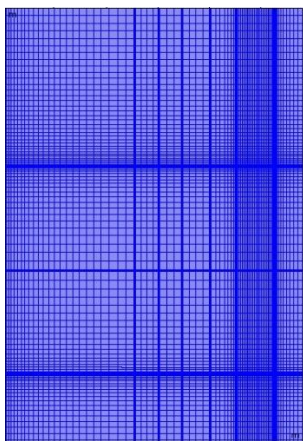
(الف)



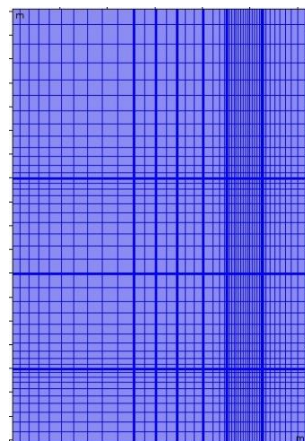
(ب)



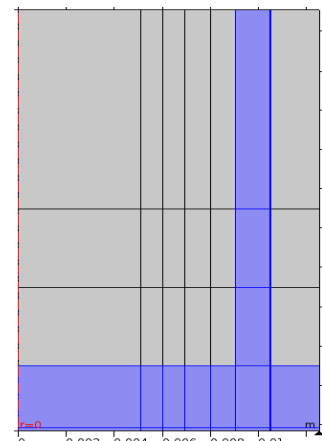
(ج)



(د)



(ه)

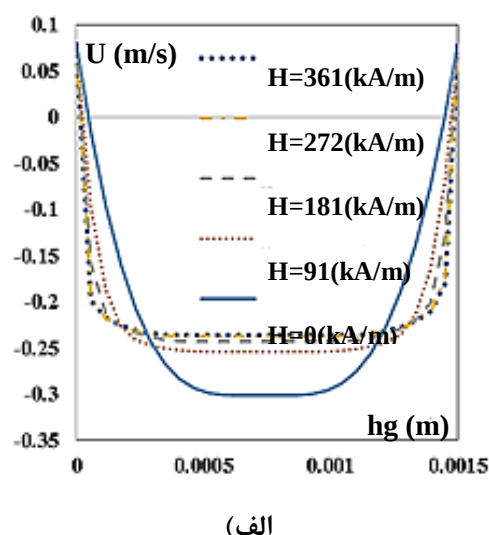
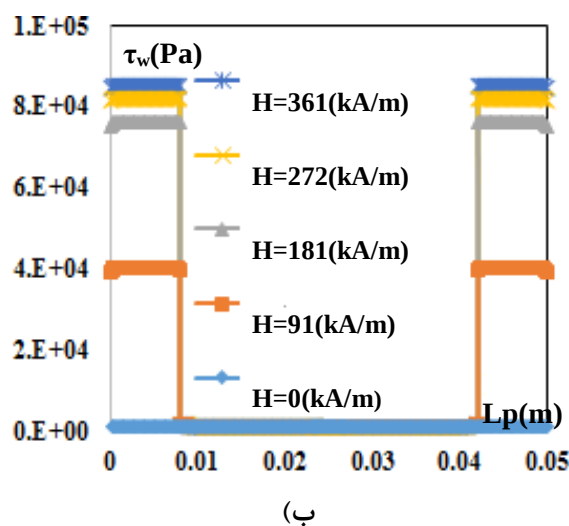


(و)

شکل ۵-۱۱: (الف) استقلال از گام زمانی (ب) استقلال حل عددی از شبکه برای سرعت (ج) استقلال حل عددی از شبکه برای نیرو (د) قسمت پایین پیستون و خروجی جریان از شیار (ه) و (و) مش در ناحیه تحت میدان و شیار پیستون در شرایط عملکرد $f=0.5\text{Hz}$ $a=0.025\text{m}$

۵-۲-۲ بررسی نتایج حل عددی بدون اثرات دمایی

چگونگی اثر میدان مغناطیسی بر پروفیل سرعت جریان سیال مگنتورئولوژیکال، با استفاده از مدل سازی اف دی در شکل ۵-۱۲-الف، نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش میدان مغناطیسی، ناحیه پلاگ تشکیل شده بزرگ تر می شود و سرعت در ناحیه مرکزی شیار کاهش می یابد. بنا براین، سرعت و در نتیجه گرادیان سرعت، در ناحیه پس از تسلیم، مطابق شکل ۵-۱۲-الف، افزایش می یابد. علاوه بر افزایش لزجت ناشی از افزایش میدان مغناطیسی، افزایش گرادیان سرعت منجر به افزایش تنش برشی در ناحیه پس از تسلیم و روی دیواره می شود. با توجه به غیرنیوتونی بودن سیال و نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، افزایش گرادیان سرعت، باعث کاهش لزجت و از طرفی دیگر باعث افزایش تنش می شود. با این حال، مطابق نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، اثر نهایی افزایش گرادیان سرعت افزایش تنش می باشد. چگونگی تغییرات تنش برشی روی دیواره با افزایش میدان مغناطیسی، در شکل ۵-۱۲-ب نشان داده شده است. همچنین مطابق این شکل ها، با رسیدن به شرایط اشباع مغناطیسی، تغییرات پروفیل های سرعت و همچنین تنش برشی دیواره به اشباع می رسند. مطابق شکل های به دست آمده، پروفیل سرعت در ناحیه بدون میدان، شکلی نزدیک به سهمی با ناحیه پلاگ کوچک دارد، در حالیکه با قرار گرفتن تحت میدان مغناطیسی ناحیه پلاگ تشکیل شده به تدریج بزرگ تر

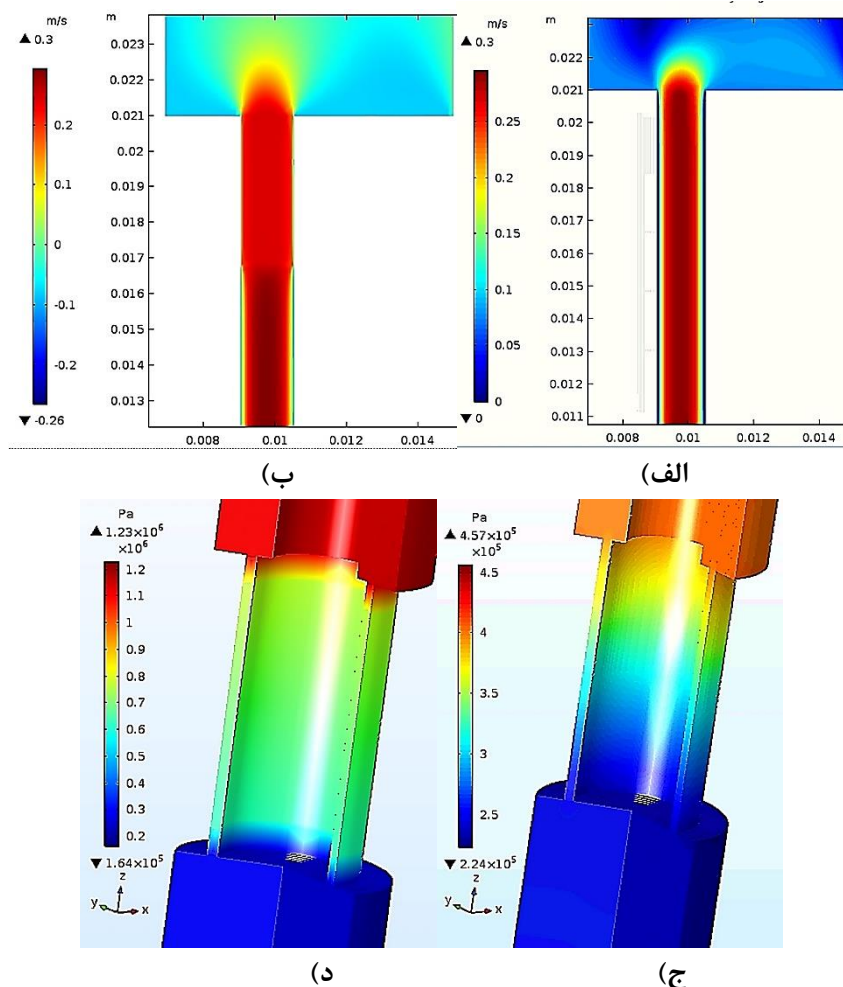


شکل ۵-۱۲: الف) چگونگی اثر میدان مغناطیسی بر پروفیل سرعت جریان سیال مگنتورئولوژیکال (ب) چگونگی تغییرات تنش برشی روی دیواره با افزایش میدان مغناطیسی

می‌شود و نهایتاً به حالت اشباع می‌رسد؛ بنابراین نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی به‌خوبی اثرات میدان مغناطیسی بر میدان جریان را پیش‌بینی می‌کند. مطابق نتایج نشان داده‌شده در شکل ۵-۱۲، اعمال و افزایش میدان مغناطیسی اثر قابل‌توجهی برافزایش تنش برشی روی دیواره در نواحی تحت میدان مغناطیسی دارد که این تغییرات نیز با رسیدن به اشباع مغناطیسی به‌تدریج به حالت اشباع می‌رسد. همچنین تفاوت قابل‌ملاحظه تنش برشی در نواحی تحت میدان و بدون میدان مغناطیسی در این شکل به‌خوبی قابل‌مشاهده می‌باشد.

چگونگی تأثیر میدان مغناطیسی بر توزیع فشار و سرعت در دمپر مگنتورئولوژیکال، با استفاده از مدل‌سازی عددی، در شکل ۵-۱۳ به‌خوبی قابل‌مشاهده است. همان‌طور که در شکل‌های ۵-۱۳-الف و ۵-۱۳-ب مشاهده می‌شود، میدان مغناطیسی باعث تغییر قابل‌توجه میدان جریان در نواحی تحت میدان مغناطیسی (موازی فلنج) در شیار عبور جریان سیال مگنتورئولوژیکال در پیستون می‌شود. در شکل ۵-۱۳-ب تشکیل ناحیه پلاگ ناشی از تنش تسلیم در ناحیه موازی فلنج و تفاوت میدان جریان با نواحی بدون میدان مغناطیسی به‌خوبی نشان داده‌شده است. همچنین اختلاف فشار بین دو سر پیستون در حالت بدون میدان مغناطیسی و تحت میدان مغناطیسی در شکل ۵-۱۳-ج و ۵-۱۳-د نشان داده‌شده است. مطابق این شکل‌ها، با اعمال میدان مغناطیسی تا شرایط نزدیک اشباع، اختلاف فشار بین دو سر پیستون تا ۵ برابر افزایش یافته است.

در شکل ۵-۱۴-الف و ب اثر میدان مغناطیسی بر نیروی دمپینگ و نیروی ناشی از تنش برشی روی دیواره نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش میدان مغناطیسی، نیروی دمپینگ افزایش می‌یابد و نهایتاً به شرایط اشباع می‌رسد. مطابق فرمول (۳-۳۸)، اختلاف فشار بین دو سر پیستون و تنش برشی روی دیواره دو عامل مؤثر بر نیروی دمپینگ ناشی می‌باشد. در فرمول‌های متداول برای محاسبه نیروی دمپینگ، از اثر تنش برشی دیواره و اثر میدان مغناطیسی بر لزجت پلاستیک و همچنین اثرات ترم اینرسی صرف‌نظر می‌شود. با این‌وجود، مطابق نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، همان‌طور که در شکل ۵-۱۲ و ۵-۱۴-الف نشان داده‌شده است، تنش برشی روی دیواره در نواحی تحت میدان و نیروی ناشی از آن در مقادیر نیروی دمپینگ کل به‌دست‌آمده تأثیر داشته و قابل صرف‌نظر کردن نمی‌باشند. همچنین مطابق نتایج نشان داده‌شده در شکل ۵-۱۴-ج با کاهش عرض شیار اختلاف فشار بین دو سر پیستون کاهش قابل‌ملاحظه‌ای



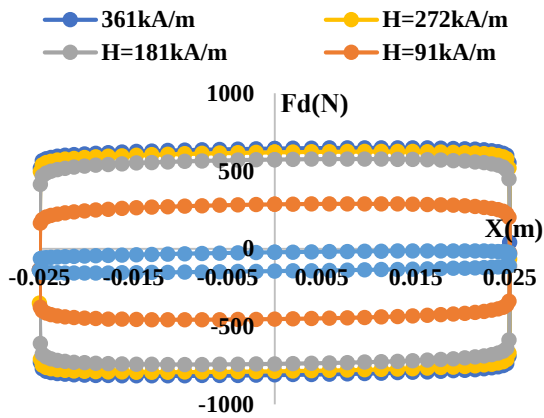
شکل ۵-۱۳: تأثیر میدان مغناطیسی بر توزیع سرعت جریان سیال بهینه ساخته شده مگنتورئولوژیکال MRF5 در دمپر مگنتورئولوژیکال، (الف) بدون میدان مغناطیسی (ب) تحت میدان مغناطیسی و توزیع فشار (ج) بدون میدان مغناطیسی (د) تحت میدان مغناطیسی با استفاده از مدل سازی عددی

می یابد، در حالیکه تنش برشی روی دیواره کاهش چندانی پیدا نمی کند. دلیل این پدیده این است که با افزایش عرض شیار، گرادیان سرعت و به عبارتی نرخ برش در عرض شیار و در نتیجه در نزدیک دیواره کاهش پیدا می کند. کاهش نرخ برش، بالقوه باعث کاهش تنش برشی روی دیواره می شود؛ اما با توجه به ماهیت غیر نیوتونی بودن سیال مگنتورئولوژیکال و افزایش لزجت پلاستیک و لزجت کل سیال مگنتورئولوژیکال با کاهش نرخ برش، مطابق نتایج آزمایش های رئومتری نشان داده شده در فصل ۴، میزان این کاهش تنش که در شکل ۵-۱۴ ج نشان داده شده است، زیاد نمی باشد. در نتیجه، با افزایش عرض شیار، سهم تنش برشی روی دیواره در نیروی دمپینگ نسبت به اختلاف فشار، افزایش یافته و در نظر نگرفتن آن در فرمول متداول (۳-۸)، باعث خطای بیشتری در عرض شیارهای بزرگ تر می شود. همچنین مطابق شکل ۵-۱۴ د افزایش طول ناحیه تحت

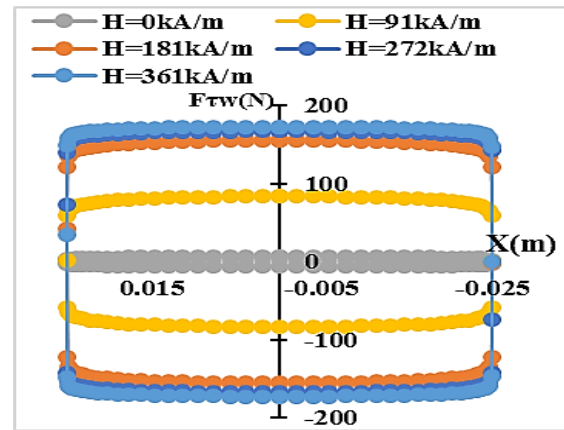
میدان مغناطیسی می‌تواند نیروی دمپینگ را تا نزدیک به دو برابر افزایش دهد.

اثر بالقوه میدان مغناطیسی بر انرژی دمپ شده و ضریب میرایی معادل که با استفاده از روش عددی

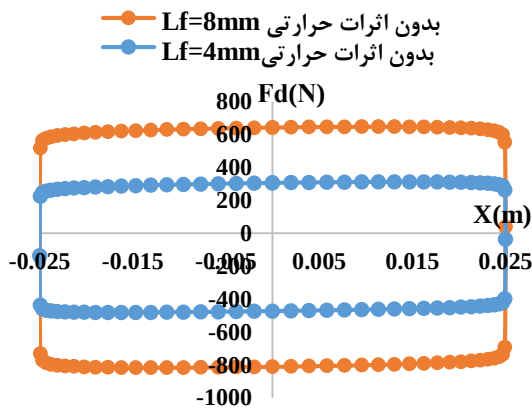
به دست آمده، در شکل ۵-۱۴ و نشان داده شده است. مطابق نتایج نشان داده شده، انرژی دمپینگ و ضریب



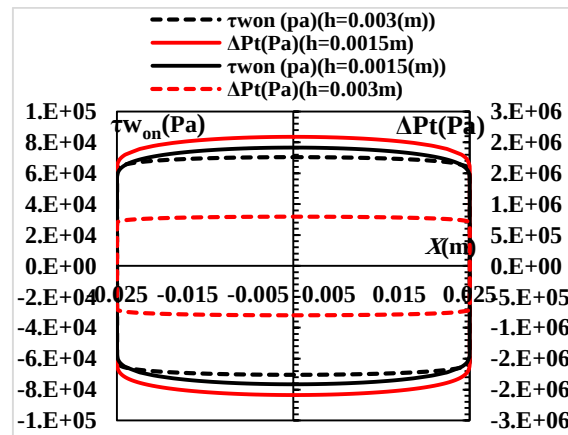
(ب)



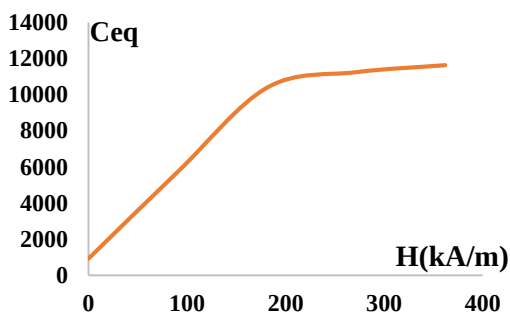
(الف)



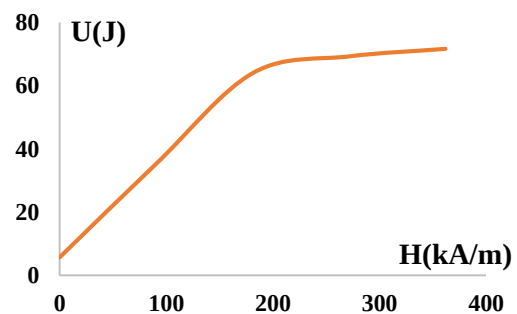
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۵-۱۴: تأثیر میدان مغناطیسی بر (الف) نیروی ناشی از تنش برشی روی دیواره و (ب) نیروی دمپینگ کل

ج اثر کاهش عرض شیار بر اختلاف فشار و تنش برشی روی دیواره

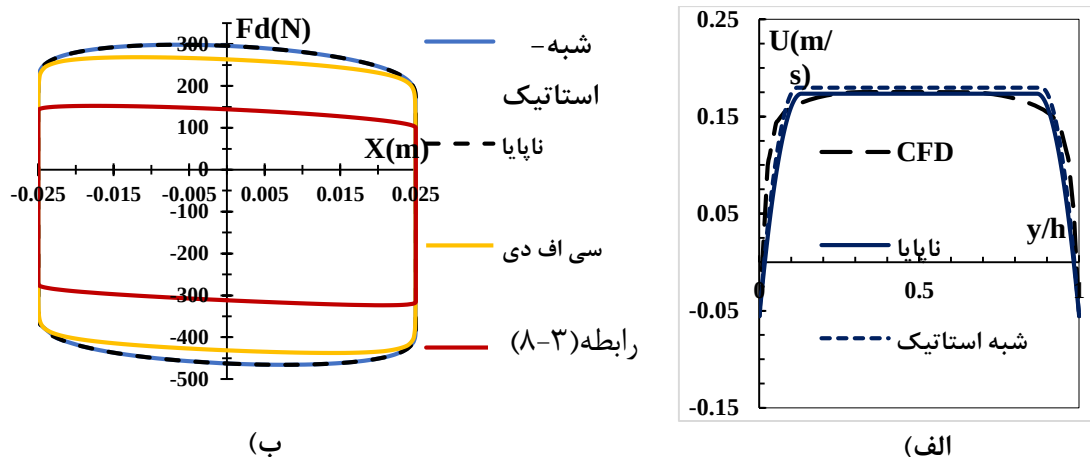
ه اثر میدان مغناطیسی بر (د) انرژی دمپ شده و (و) ضریب میرایی معادل

میرایی معادل نیز با افزایش میدان مغناطیسی به میزان قابل ملاحظه افزایش می‌یابد و با رسیدن به شرایط اشباع مغناطیسی به تدریج از میزان افزایش آن کاسته شده و به اشباع می‌رسد.

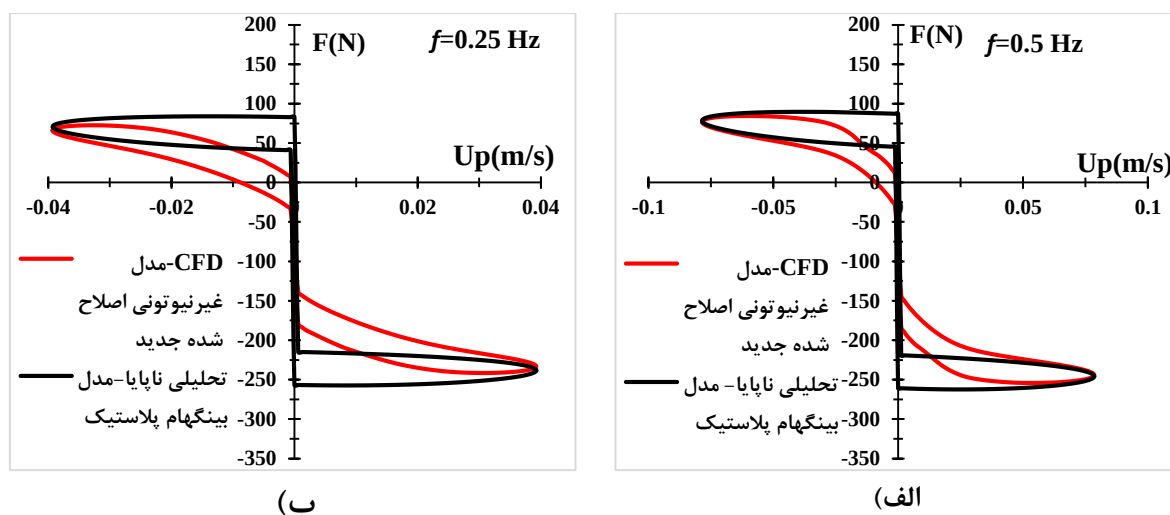
۵-۲-۳ مقایسه نتایج مدل‌های عددی و تحلیلی

در شکل ۵-۱۵ پروفیل سرعت به دست آمده از هر یک از روش‌های عددی، تحلیلی شبه استاتیک و ناپایا، در شرایط اشباع مغناطیسی و به طور نمونه، در زمان $T/8$ که پیستون بین میانه کورس و انتهای کورس قرار دارد با یکدیگر مقایسه شده است. تفاوت بین پروفیل سرعت شبه استاتیک و ناپایا ناشی از اعمال اثر ترم اینرسی در حل ناپایا می‌باشد که در روش شبه استاتیک از آن صرف نظر می‌شود. همچنین تفاوت بین پروفیل سرعت به دست آمده از حل عددی با پروفیل سرعت به دست آمده از حل تحلیلی ناپایا که در نواحی پس از تسلیم مشهودتر است، به دلیل تفاوت بین مدل غیر نیوتونی ارائه شده در این پژوهش با مدل بینگهام پلاستیک که در روش‌های تحلیلی استفاده می‌شود، می‌باشد. نتایج حاصل از فرمول متداول برای دمپرهای مود جریانی (رابطه ۳-۸)، به دلیل، در نظر نگرفتن اثر میدان مغناطیسی بر لزجت پلاستیک و همچنین اثر تنش برشی سیال روی دیواره بر نیروی دمپینگ و اثر میدان مغناطیسی بر آن، اثر سرعت دیواره و فرضیات ساده کننده، نسبت به مدل اصلاح شده ارائه شده و روش‌های حل بکار گرفته شده در این پژوهش، دارای خطای قابل توجهی می‌باشد که در شکل ۵-۱۵ ب مشاهده می‌شود. همچنین نتایج حل‌های شبه استاتیک و ناپایا به دلیل پایین بودن فرکانس ۰٫۵ هرتز و در نتیجه ناچیز بودن اثر ترم اینرسی در این شکل منطبق بر هم می‌باشند. از طرفی، تفاوت نتایج تحلیلی با عددی به دلیل تفاوت مدل بینگهام پلاستیک و مدل ارائه شده در پیش‌بینی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال و اثرات رقیق شوندگی سیال می‌باشد

در شکل ۵-۱۶، نمودارهای نیرو-سرعت دمپر مگنتورئولوژیکال، در دو فرکانس ۰٫۲۵ و ۰٫۵ هرتز در عرض شیار سه میلی‌متر نشان داده شده‌اند. شکل ظاهری این نمودارها که با دو روش عددی و تحلیلی ناپایا به دست آمده‌اند. شکل ظاهری نمودارهای نیرو-سرعت به دست آمده از روش عددی مشابه دیاگرام‌های تنش-نرخ برش به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. اثرات رقیق شوندگی سیال، به خصوص در نرخ برش‌های

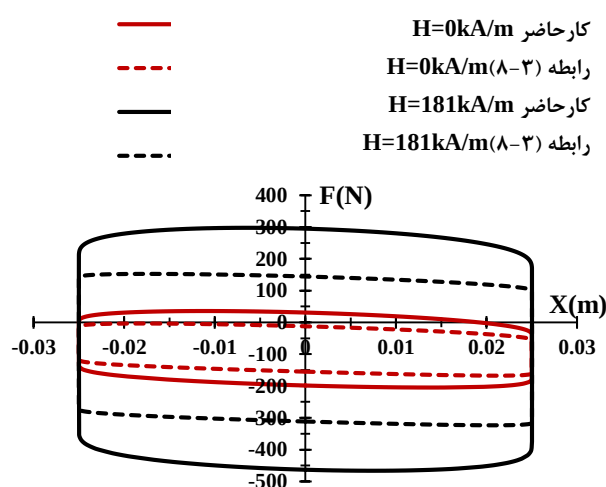


شکل ۵-۱۵: مقایسه الف) پروفیل سرعت به دست آمده از هر یک از روش های عددی، تحلیلی شبه استاتیک و ناپایا، در زمان $T/8$ ب) لوپ نیرو-جابجایی به دست آمده از هر یک از روش های عددی، تحلیلی شبه استاتیک پایین که در داده های آزمایشگاهی مشاهده و توسط مدل اصلاح شده جدید مدل شد، در نمودارهای نیرو-سرعت به دست آمده از حل عددی نیز به خوبی قابل مشاهده است. مطابق شکل ۵-۱۶، نواحی دارای نرخ برش پایین که در آن خطای مدل متداول بینگهام-پلاستیک، نسبت به مدل اصلاح شده جدید ارائه شده در این پژوهش قابل توجه است، با کاهش فرکانس، بیشتر می شود. در نتیجه استفاده از مدل ارائه شده در این پژوهش، بخصوص جهت در نظر گرفتن رفتار رقیق شوندگی سیال در نرخ برش های پایین تر، برای محاسبه نیروی دمپینگ دمپر، حائز اهمیت است.



شکل ۵-۱۶: مقایسه نمودارهای نیرو-سرعت دمپر مگنتورئولوژیکال، به دست آمده از مدل بینگهام پلاستیک و مدل غیر نیوتونی اصلاح شده جدید در دو فرکانس الف) 0.5 Hz ب) 0.25 Hz

اثر میدان مغناطیسی بر رفتار سیال در نواحی پس از تسلیم، در نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده در فصل ۴، قابل مشاهده است. در رابطه (۸-۳) که به طور متداول برای محاسبه نیروی دمپینگ در دمپرهای مگنتورئولوژیکال مود جریانی استفاده می شود [۱۰۸]، اثرات میدان مغناطیسی بر رفتار جریان در ناحیه پس از تسلیم و لزجت پلاستیک اعمال نشده است. به عبارت دیگر، لزجت پلاستیک سیال مگنتورئولوژیکال در ناحیه پس از تسلیم، با لزجت سیال در حالت بدون میدان مغناطیسی یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین در این فرمول، از اثر حرکت دیواره و تنش برشی روی دیواره، صرف نظر شده است. اثر میدان مغناطیسی بر تنش برشی روی دیواره و نیروی دمپینگ ناشی از این تنش در شکل های ۵-۱۲ و ۵-۱۴-الف نشان داده شده اند. همان طور که مشاهده می شود، بخصوص با افزایش میدان مغناطیسی تنش برشی روی دیواره و اثر آن بر نیروی دمپینگ افزایش می یابد. در نتیجه مطابق شکل ۵-۱۷، خطای نتایج به دست آمده از فرمول متداول برای نیروی دمپینگ دمپر مود جریانی، با افزایش میدان مغناطیسی افزایش می یابد. همچنین قسمتی از خطای ذکر شده ناشی از در نظر نگرفتن اثر میدان مغناطیسی بر رفتار سیال در نواحی پس از تسلیم، می باشد.



شکل ۵-۱۷: مقایسه

نتایج پژوهش حاضر و فرمول متداول دمپر مود جریانی در حالت بدون میدان و تحت میدان مغناطیسی

۵-۲-۴ بررسی نتایج حل عددی با در نظر گرفتن اثرات دمایی

در این قسمت به بررسی اثرات دمایی و منحنی های ورودی با فرکانس و دامنه های مختلف، بر سرعت، تنش برشی، شار حرارتی، نیروی دمپینگ، انرژی دمپینگ و ضریب میرایی دمپر پرداخته می شود.

۵-۲-۴-۱ مقایسه اثرات دمایی در دو حالت اشباع مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی

در مرحله نخست، به بررسی موارد مذکور در دو حالت بدون میدان مغناطیسی و تحت شرایط اشباع مغناطیسی پرداخته می‌شود. مقایسه نتایج نشان داده‌شده در شکل‌های ۵-۱۸ و ۵-۱۹ نشان می‌دهد، در حالتی که دمپر تحت میدان مغناطیسی قرار نمی‌گیرد نسبت حالت اشباع مغناطیسی افزایش دمای قابل‌توجهی در عرض شیار ایجاد نمی‌شود و در نتیجه کاهش در مقادیر مربوط به سرعت سیال، تنش برشی روی دیواره، نیروی ناشی از تنش برشی روی دیواره و نیروی دمپینگ کل به وجود نمی‌آید.

با قرار گرفتن سیال مگنتورئولوژیکال تحت میدان مغناطیسی، به دلیل افزایش قابل‌توجه مقادیر تنش برشی، مطابق نتایج آزمایش‌های رئومتری ارائه‌شده در فصل ۴، افزایش دمای ناشی از این تنش‌ها باعث کاهش مقادیر تنش تسلیم و لزجت در عرض شیار و همین‌طور تنش روی دیواره شیار می‌شود. این پدیده مطابق شکل ۵-۱۹، باعث افزایش سرعت در ناحیه میانی شیار و کاهش ضخامت ناحیه پلاگ می‌شود. در نتیجه افزایش دما اثر کاهش بر ضخامت ناحیه پلاگ دارد.

همانطور که در شکل ۵-۱۹-ه نشان داده‌شده است، با افزایش دما در عرض شیار، در نواحی تحت میدان مغناطیسی، تنش برشی روی دیواره شیار و نیروی دمپینگ ناشی از آن تا ۴۰ درصد کاهش می‌یابند. همچنین نیروی دمپینگ کل نیز به میزان ۳۰ درصد کاهش می‌یابد.

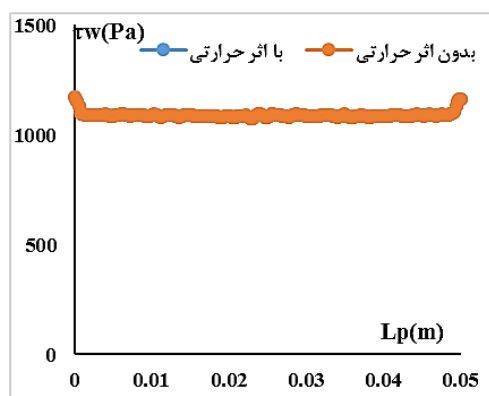
مطابق شکل ۵-۱۹-و شار حرارتی روی دیواره شیار در نواحی تحت میدان مغناطیسی نیز نسبت به نواحی بدون میدان میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد؛ که ناشی از افزایش گرادیان دمای روی دیواره بر اثر اعمال میدان مغناطیسی می‌باشد.

۵-۲-۴-۲ بررسی اثر منحنی با فرکانس و دامنه‌های مختلف بر دما و عملکرد دمپر

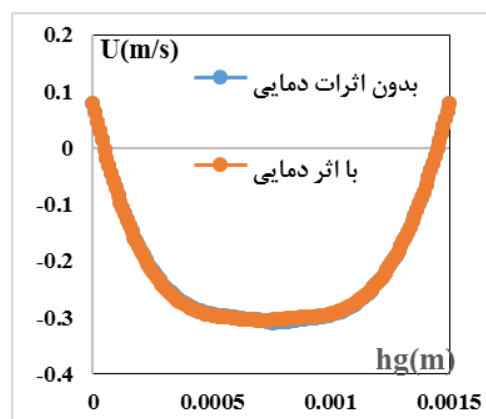
در این مرحله اثر منحنی‌های ورودی با فرکانس و دامنه‌های مختلف بر دما، سرعت، تنش، شار حرارتی، نیروی دمپینگ، انرژی دمپینگ و ضریب میرایی دمپر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اثرات منحنی ورودی با تغییر فرکانس، بر سرعت سیال در عرض شیار، نیروی دمپینگ ناشی از تنش برشی و نیروی دمپینگ در حالت بدون میدان و تحت میدان مغناطیسی در شکل‌های ۵-۲۰ و ۵-۲۱ نشان داده‌شده

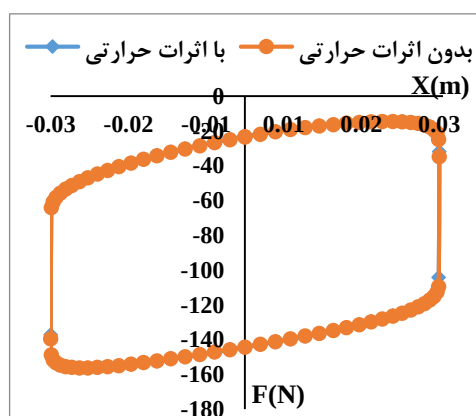
است. همانطور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، در حالت بدون میدان مغناطیسی، افزایش فرکانس باعث افزایش سرعت و گرادیان سرعت در عرض شیار و در نتیجه افزایش تنش در سیال می‌شود؛ بنابراین نیروی ناشی از تنش برشی و نیروی دمپینگ افزایش می‌یابند. همچنین مطابق شکل ۵-۲۰-د افزایش نیروی دمپینگ



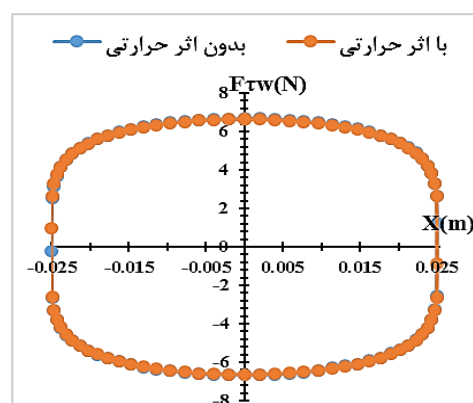
(ب)



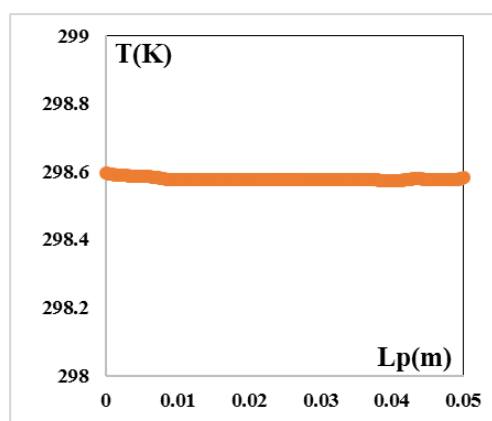
(الف)



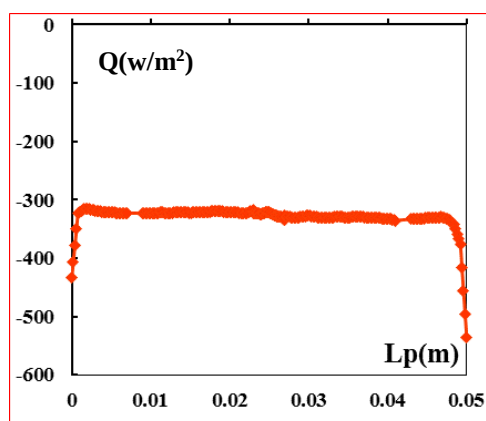
(د)



(ج)

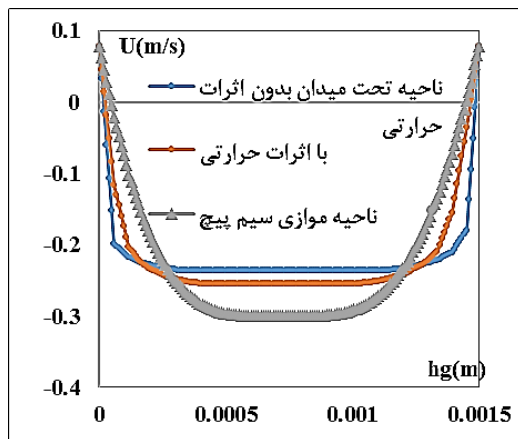


(و)

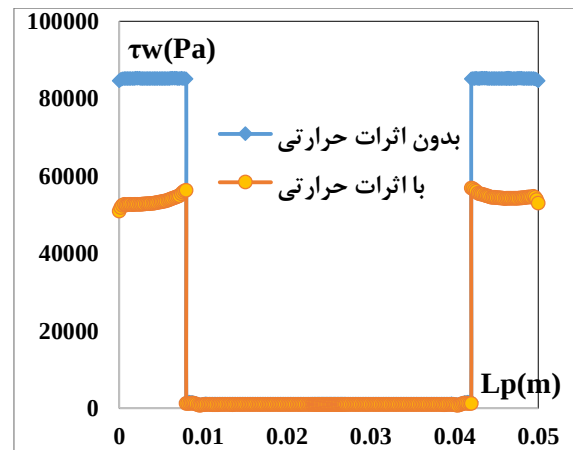


(ه)

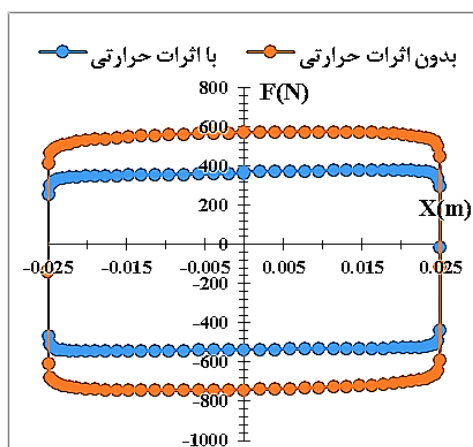
شکل ۵- ۱۸: مقادیر مربوط به (الف) سرعت سیال (ب) تنش برشی روی دیواره (ج) نیروی ناشی از تنش برشی روی دیواره (د) نیروی دمپینگ (ه) شار حرارتی روی دیواره در حالت بدون میدان مغناطیسی



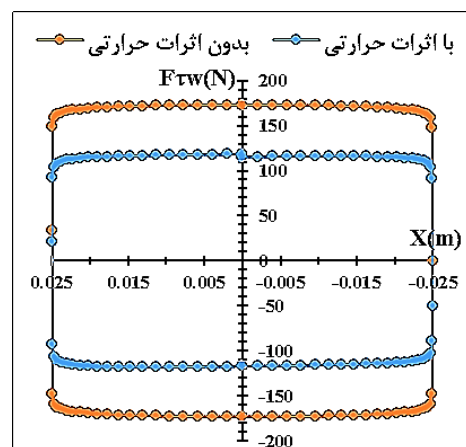
(ب)



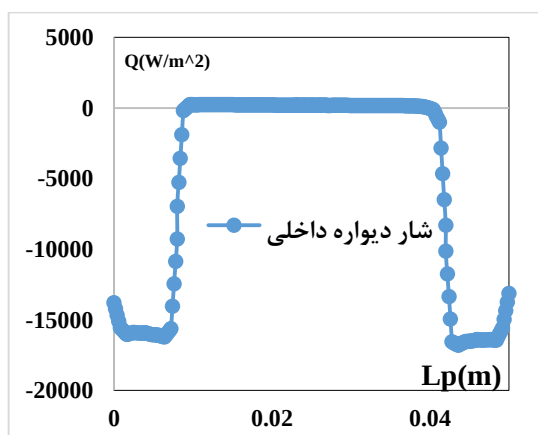
(ف)



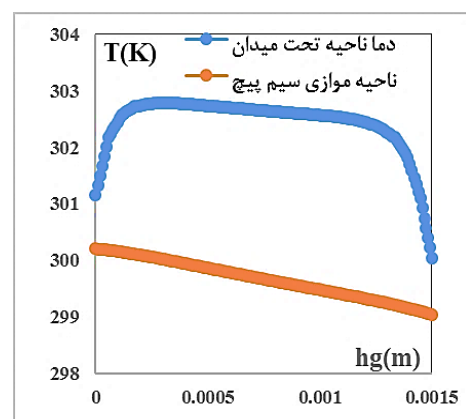
(د)



(ج)



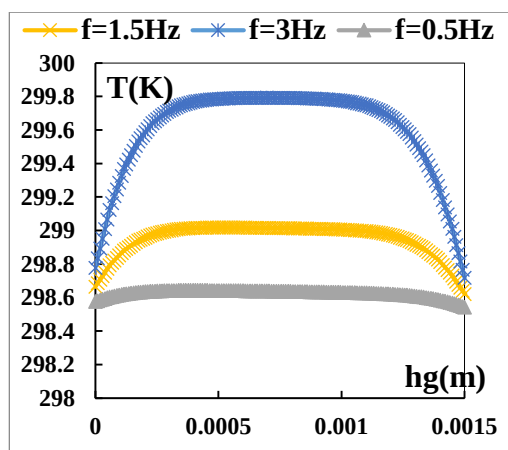
(و)



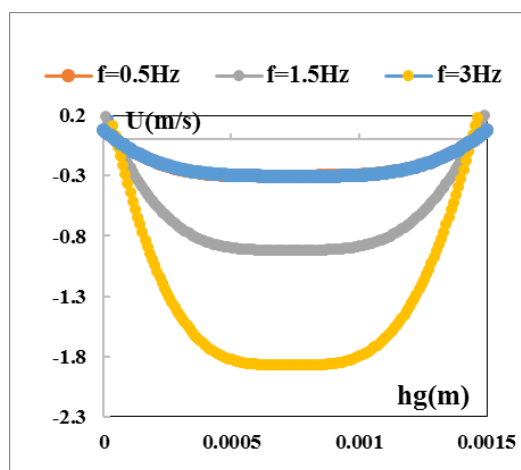
(ه)

شکل ۵- ۱۹: مقادیر مربوط به (الف) سرعت سیال (ب) تنش برشی روی دیواره (ج) نیروی ناشی از تنش برشی روی دیواره (د) نیروی دمپینگ دمای سیال (ه) شار حرارتی روی دیواره در حالت اشباع مغناطیسی

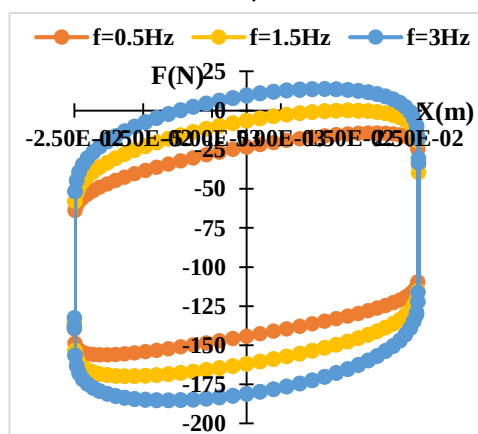
منجر به افزایش مساحت تحت لوپ نیرو-جابجایی دمپر و در نتیجه انرژی دمپ شده می‌شود. باین حال مطابق شکل ۵-۲۰، به دلیل اثرات افزایشی فرکانس بر سرعت، ضریب میرایی دمپر با افزایش فرکانس از ۰.۵ هرتز به ۳ هرتز به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.



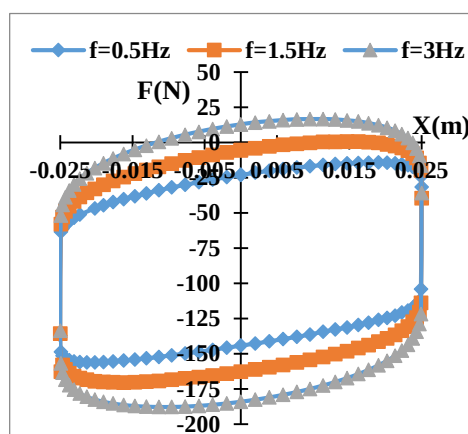
(ب)



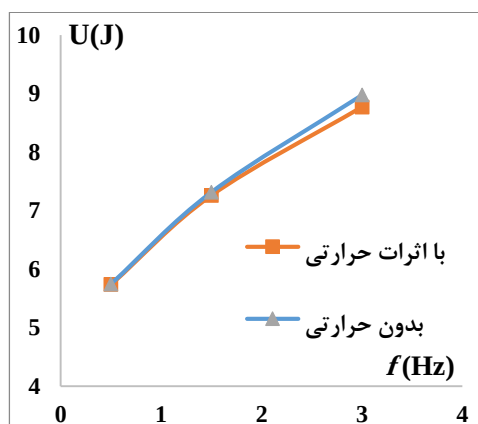
(الف)



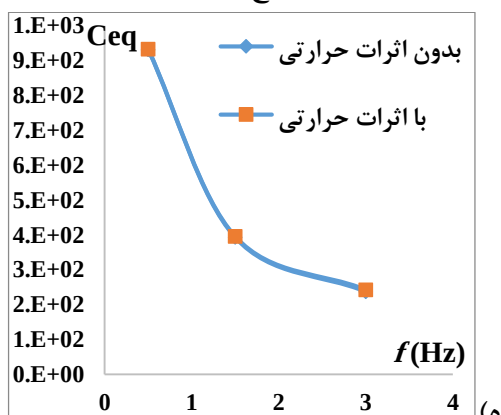
(د)



(ج)



(و)



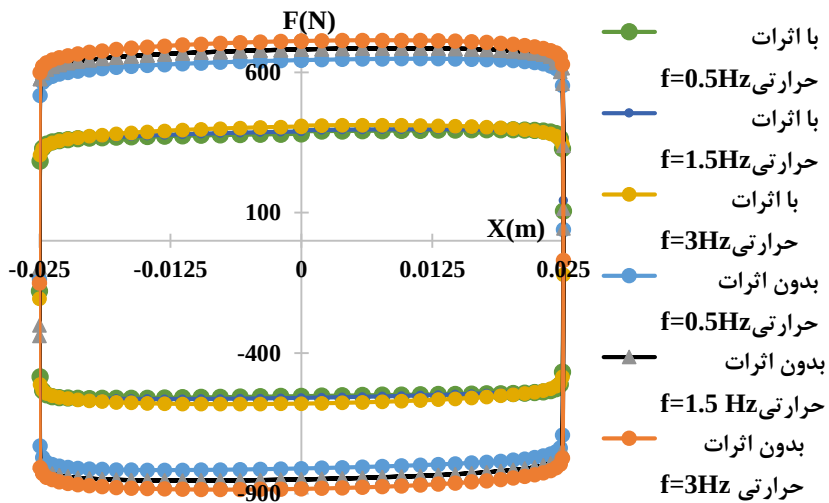
(ه)

شکل ۵-۲۰: اثرات فرکانس بر الف) پروفیل سرعت ب) دما ج) نیروی دمپینگ کل با اثرات حرارتی د) نیروی دمپینگ کل بدون اثرات حرارتی ه) ضریب میرایی معادل و) انرژی دمپ شده

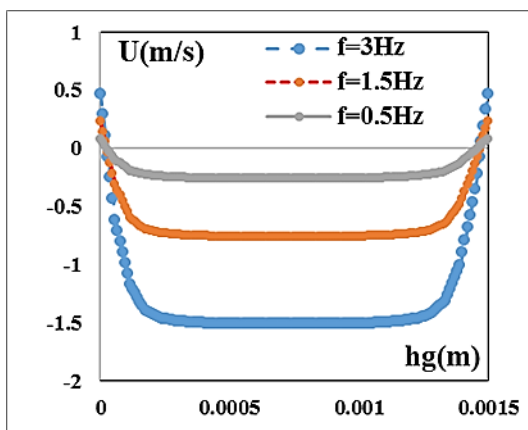
مطابق نتایج نشان داده شده در شکل ۵-۲۱، منحنی ورودی با فرکانس بالاتر منجر به افزایش سرعت سیال مگنتورئولوژیکال تحت میدان مغناطیسی در عرض شیار پیستون و کاهش ضخامت ناحیه پلاگ می شود. باین حال سیال مگنتورئولوژیکال تحت شرایط اشباع مغناطیسی، به دلیل تشکیل ناحیه پلاگ ناشی از میدان مغناطیسی، در حالت پس از تسلیم قوی نمی باشد. در نتیجه مطابق شکل ۵-۲۱-الف افزایش فرکانس تا ۳ هرتز، حتی بدون در نظر گرفتن اثرات حرارتی تأثیر قابل توجهی برافزایش مقادیر نیروی دمپینگ نمی گذارد. باین وجود، مطابق شکل ۵-۲۱-ج با افزایش فرکانس، به دلیل افزایش سرعت و گرادیان سرعت در ناحیه پس تسلیم و افزایش تنش به وجود آمده ناشی از آن، دمای سیال مگنتورئولوژیکال تحت میدان مغناطیسی در عرض شیار تا ۳۱۳ درجه کلوین افزایش می یابد. این افزایش دما، باعث کاهش تنش تسلیم در عرض شیار می شود؛ که این پدیده بنا بر نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در فصل ۴، قابل پیش بینی می باشد. در نتیجه با در نظر گرفتن اثرات حرارتی، به دلیل افزایش دمای ناشی از افزایش فرکانس، نهایتاً حداکثر نیروی دمپینگ با افزایش فرکانس تا فرکانس ۳ هرتز تغییر چندانی نمی کند.

همچنین تغییرات انرژی دمپینگ و ضریب میرایی معادل با افزایش فرکانس سیال مگنتورئولوژیکال تحت میدان مغناطیسی اشباع، در شکل ۵-۲۱-ه و ۵-۲۱-و نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، افزایش فرکانس در محدوده ۰,۵-۳ هرتز تغییر قابل توجهی در افزایش انرژی دمپینگ نمی گذارد. عدم افزایش انرژی دمپینگ همان طور که توضیح داده شد، به دلیل عدم افزایش مقادیر نیروی دمپینگ در این محدوده فرکانسی می باشد. در واقع به دلیل این که سیال تحت میدان مغناطیسی اشباع به طور عمده در ناحیه پس از تسلیم نمی باشد و همچنین اثرات کاهشی افزایش دمای ناشی از افزایش فرکانس بر تنش تسلیم، انرژی دمپینگ نیز در این محدوده تغییر قابل توجهی نمی کند. باین حال ضریب میرایی معادل به دلیل ثابت بودن نیرو و افزایش سرعت در این محدوده فرکانسی، مطابق شکل ۵-۲۱-و کاهش می یابد.

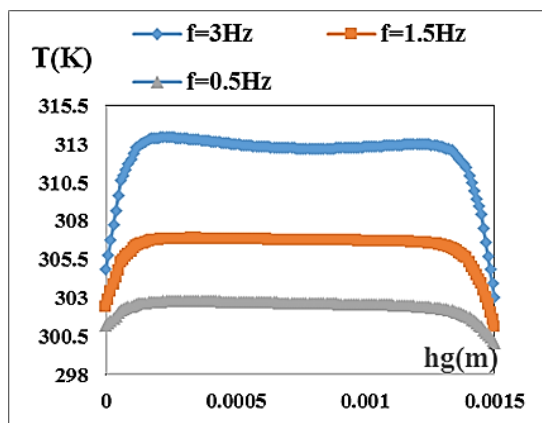
اثر دو منحنی ورودی با دامنه های ۰,۰۲۵، ۰,۰۵ و ۰,۰۷۵ متر در شکل های ۵-۲۲ و ۲۳ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود در حالت بدون میدان مغناطیسی با افزایش دامنه نوسان،



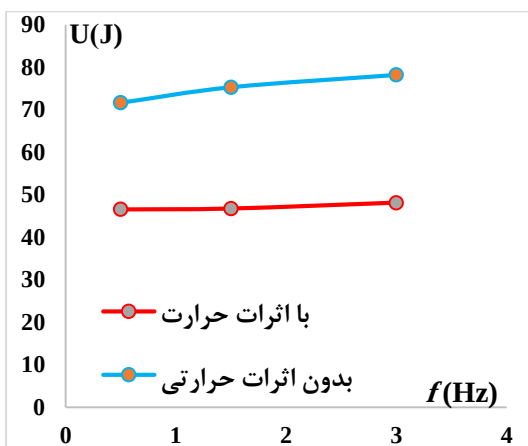
(الف)



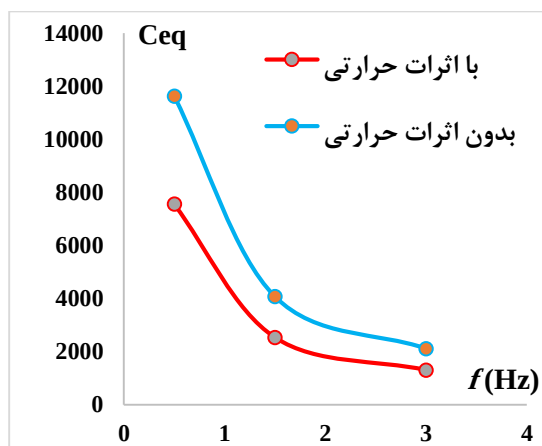
(ب)



(ج)

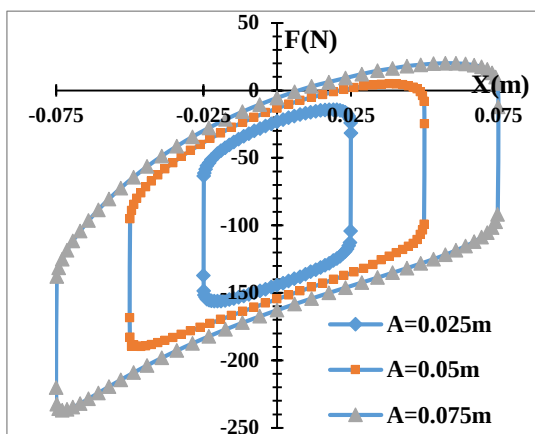


(د)

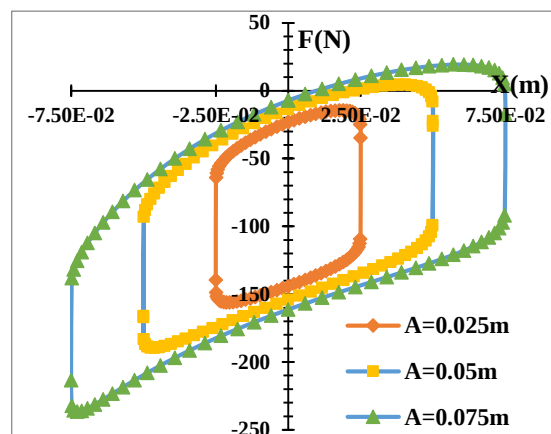


(ه)

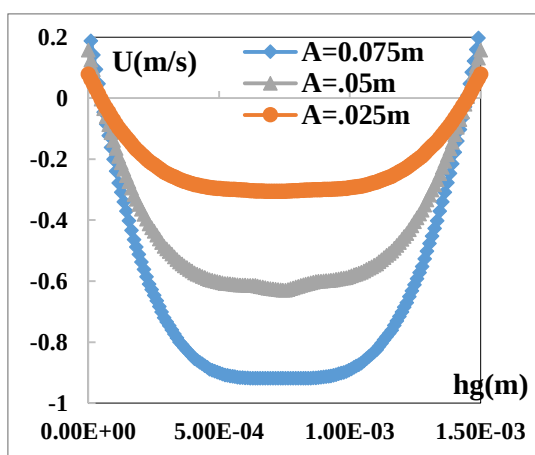
شکل ۵-۲۱: اثرات فرکانس بر (الف) نیروی دمپینگ (ب) دمای عرض شیار (ج) سرعت عرض شیار (ه) ضریب میرایی معادل (و) انرژی دمپ شده در شرایط اشباع



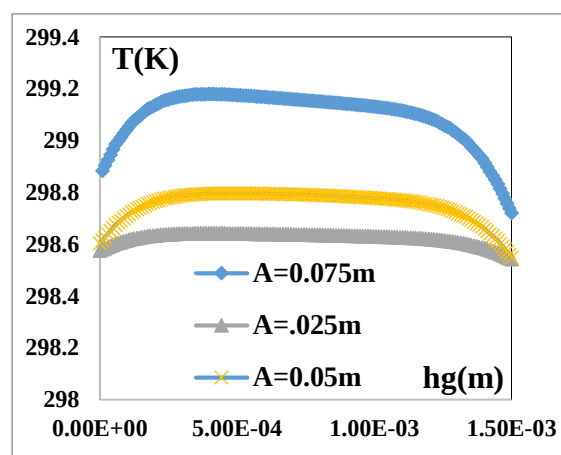
(ب)



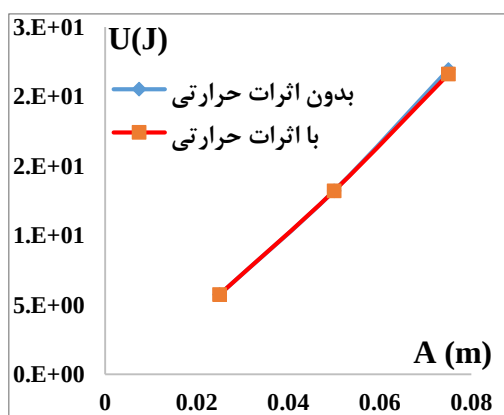
(الف)



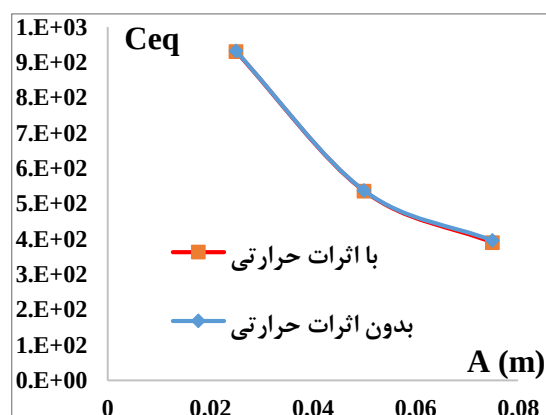
(د)



(ج)



(و)



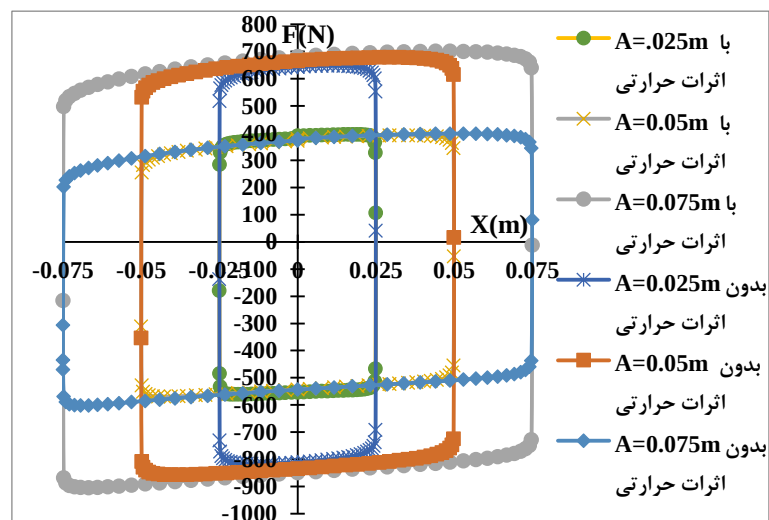
(ه)

شکل ۵-۲۲: اثرات دامنه نوسان بربر الف) نیروی دمپینگ ب) دمای عرض شیار ج) سرعت عرض شیار ه) ضریب میرایی معادل و) انرژی دمپ شده در شرایط اشباع

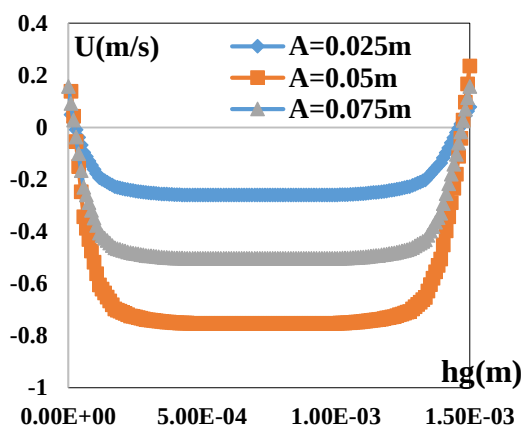
سرعت سیال مگنتورئولوژیکال در عرض شیار افزایش یافته و در نتیجه گرادیان سرعت و تنش‌ها در سیال زیاد می‌شود. از آنجایی که در حالت بدون میدان، تنش تسلیم سیال قابل چشم‌پوشی است. در نتیجه تنش‌های ایجاد شده در سیال ناشی از گرادیان سرعت می‌باشند و افزایش دامنه و گرادیان سرعت ناشی از آن، باعث افزایش نیروی دمپینگ می‌شوند. از طرف دیگر افزایش دمای ایجاد شده، مطابق شکل ۵-۲۳-ج قابل توجه نبوده و در نتیجه اثرات کاهشی دما روی لزجت و در نتیجه نیروی دمپینگ تأثیری ندارد. مطابق شکل ۵-۲۳-ه، افزایش دامنه، باعث افزایش قابل توجه مساحت تحت دیاگرام نیرو-جابجایی و در نتیجه انرژی دمپینگ می‌شود که میزان این افزایش در شکل نشان داده شده است. همچنین تأثیر افزایش دامنه نوسان بر ضریب میرایی معادل در حالت بدون میدان مغناطیسی در شکل ۵-۲۲-و نشان داده شده است.

در حالتی که سیال مگنتورئولوژیکال، تحت میدان مغناطیسی اشباع قرار می‌گیرد، عمده تنش‌ها ناشی از تنش تسلیم بوده و به اصطلاح، دمپر در حالت پس از تسلیم قوی کار نمی‌کند. در نتیجه مطابق شکل ۵-۲۳، افزایش سرعت ناشی از افزایش دامنه نوسان که باعث افزایش گرادیان سرعت و در نتیجه تنش در ناحیه پس از تسلیم می‌شود، تأثیر زیادی در بالا رفتن نیروی دمپینگ حتی بدون در نظر گرفتن اثرات دمایی نمی‌گذارد. باین وجود، افزایش گرادیان سرعت و تنش در ناحیه پس از تسلیم مطابق شکل ۵-۲۳-ج باعث افزایش دما می‌شود و در نتیجه به خاطر اثرات حرارتی، حداکثر نیروی دمپینگ با افزایش دامنه نوسان تغییری نمی‌کند. باین وجود، برخلاف افزایش فرکانس، افزایش دامنه نوسان، مطابق شکل ۵-۲۳-و باعث افزایش ملموس انرژی دمپینگ می‌شود. همچنین تأثیر افزایش دامنه نوسان بر ضریب میرایی معادل در حالت اشباع مغناطیسی در شکل ۵-۲۳-ه نشان داده شده است. تأثیر کاهشی دما بر انرژی دمپینگ و ضریب میرایی معادل نیز در این دو شکل به خوبی نشان داده شده است.

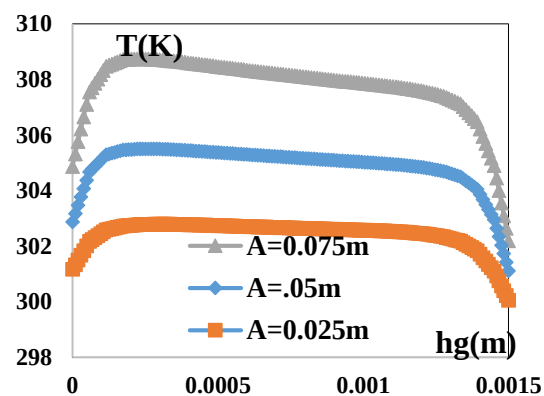
شکل ۵-۲۴ تغییرات دمای متوسط ناحیه تحت میدان مغناطیسی با زمان، تحت بارهای نوسانی در فرکانس و دامنه‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق نتایج نشان داده شده افزایش فرکانس و دامنه نوسان اثر مشابهی بر افزایش دما در ناحیه تحت میدان مغناطیسی دارند. با افزایش دامنه و فرکانس، به دلیل افزایش نرخ برش و تنش‌ها در ناحیه پس از تسلیم، علاوه بر افزایش دما به صورت نوسانی در ناحیه تحت میدان، شیب افزایش دما



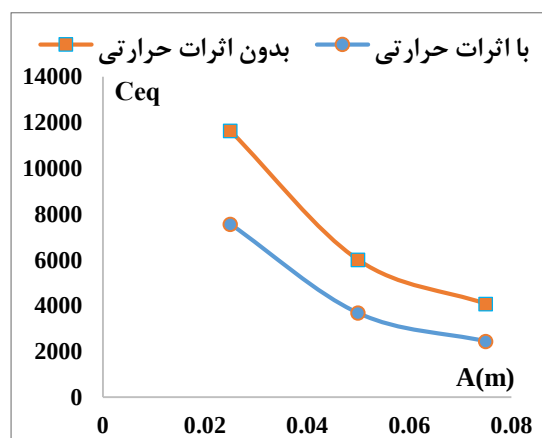
(الف)



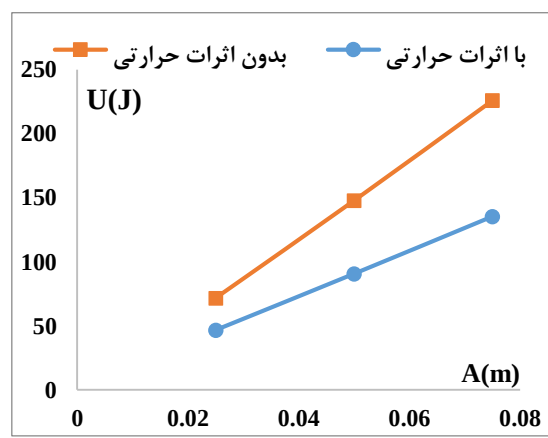
(د)



(ج)

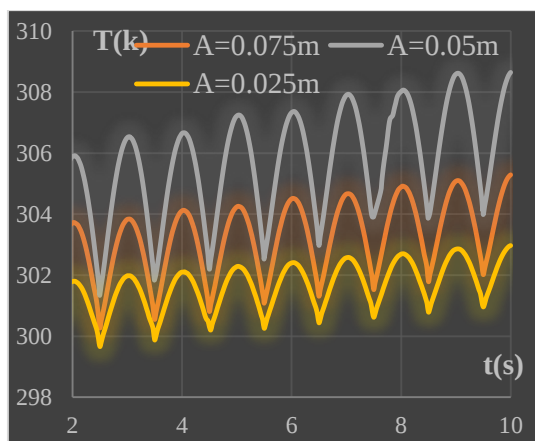


(ه)

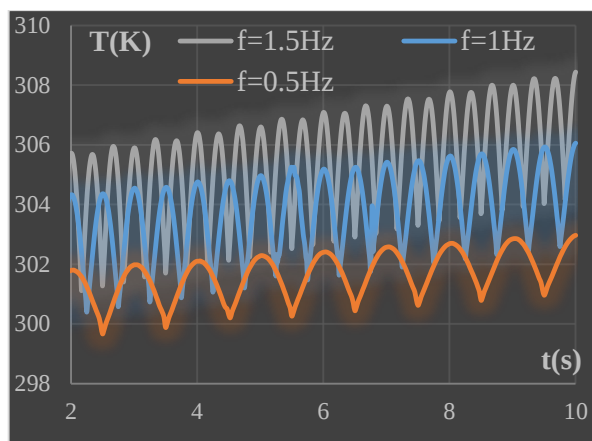


(و)

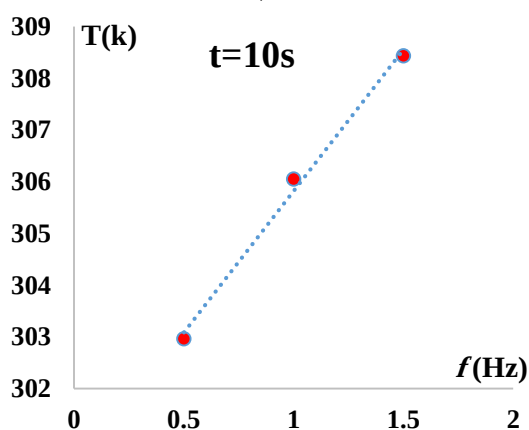
شکل ۵-۲۳: اثرات دامنه نوسان و دما بر الف) نیروی دمپینگ ب) دمای عرض شیار ج) سرعت عرض شیار ه) ضریب میرایی معادل و) انرژی دمپ شده در شرایط اشباع



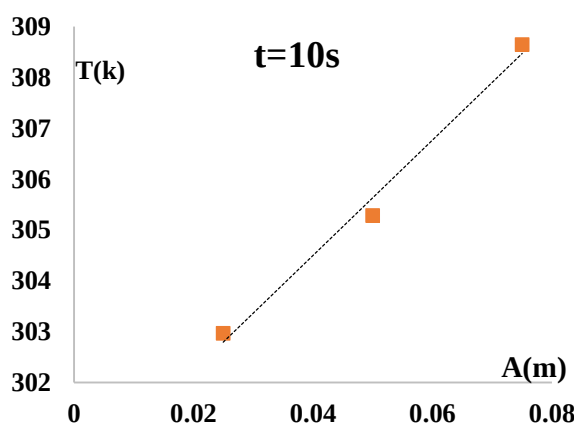
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵-۲۴ تغییرات دمای متوسط ناحیه تحت میدان مغناطیسی با زمان، تحت بارهای نوسانی در الف) فرکانس و ب) دامنه‌های مختلف ج) اثر افزایش دامنه د) اثر افزایش فرکانس

نیز افزایش می‌یابد. تنش تسلیم، یکی از پارامترهای مهم در مبحث سیال‌های مگنتورئولوژیکال می‌باشد. بررسی آزمایشگاهی اثرات دما و میدان بر تنش تسلیم در فصول گذشته انجام شد. در مطالعات انجام‌شده تحلیلی پیشین با فرض شبه استاتیک، فرض بر توزیع یکنواخت تنش تسلیم در عرض شیار می‌باشد. در این پژوهش با به دست آوردن تابعیت دمایی تنش تسلیم با استفاده از آزمایش‌های رئومتری انجام‌شده و سپس استفاده از آن در روش عددی، توزیع تنش تسلیم در عرض شیار و اثر دامنه و فرکانس بر آن در زمان‌های مختلف به دست آمد که در شکل ۵-۲۵ نشان داده‌شده است. با توجه به توزیع دما در عرض شیار که در شکل‌های ۵-۲۰-۲۳ نشان داده‌شده است، تنش تسلیم در عرض شیار تغییر می‌کند. هانطور که در شکل ۵-۲۵ مشاهده می‌شود، در نواحی کناری شیار و نزدیک به دیواره که دمای سیال کمتر می‌باشد، مقدار تنش تسلیم بیشتر و در نواحی میانی کمتر است. از طرف دیگر، با گذشت زمان و افزایش دمای دیواره‌های شیار

پیستون، توزیع تنش تسلیم نشان داده شده در عرض شیار، یکنواخت تر می شود. همچنین بر طبق نتایج نشان داده شده، افزایش فرکانس و دامنه نوسانات، باعث کاهش تنش تسلیم می شود که این کاهش به خاطر افزایش دمای ناشی از آن ها می باشد.

توزیع تنش برشی دیواره داخلی شیار، در فرکانس، دامنه و زمان های مختلف در شکل ۵-۲۶ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد، ضمن تفاوت قابل ملاحظه تنش برشی دیواره در نواحی تحت میدان مغناطیسی اشباع و نواحی بدون میدان، اثر افزایش فرکانس و دامنه بر تنش برشی روی دیواره، به دلیل اثرات حرارتی ناچیز می باشد. در نتیجه اثر دمپینگ ناشی از تنش برشی روی دیواره، متناسب با افزایش سرعت افزایش نمی یابد و کاهش ضریب میرایی بیشتر می شود. با گذشت زمان و افزایش دما مقادیر تنش برشی دیواره تا ۲۰ درصد کاهش می یابد که به تدریج از میزان این کاهش کاسته می شود.

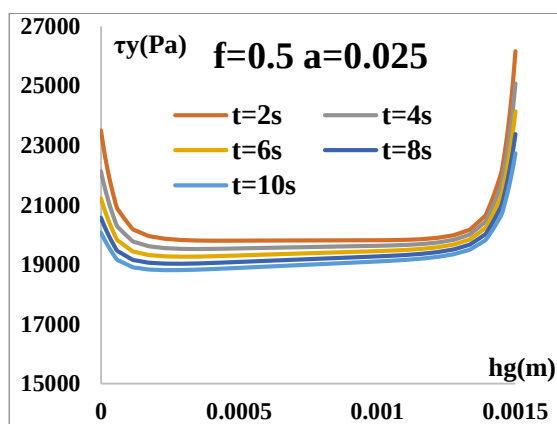
افزایش دمای پیستون، علاوه بر حرارت تولید شده در سیم پیچ، ناشی از شار حرارت منتقل شده از سیال مگنتورئولوژیکال تحت میدان مغناطیسی به دیواره شیار هم می باشد. تغییرات شار حرارتی دیواره داخلی شیار، در شکل ۵-۲۷ نشان داده شده است.

به دلیل افزایش دمای ناشی از افزایش تنش ها در نواحی تحت میدان مغناطیسی، گرادیان دما و در نتیجه مقادیر شار حرارتی در این نواحی، نسبت به نواحی بدون میدان مغناطیسی، به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. با بالا رفتن سرعت و دامنه نوسان، انتقال حرارت بین سیال و دیواره داخلی شیار، به دلیل افزایش دمای سیال و انتقال حرارت جابجایی، به طور مشابه و تقریباً خطی، افزایش می یابد. مطابق نتایج نشان داده شده با گذشت زمان و افزایش دمای دیواره، به تدریج از میزان این شار کاسته می شود.

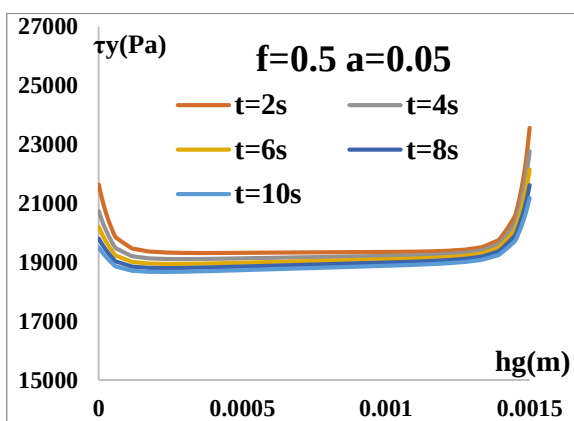
۵-۲-۴-۳ بررسی رژیم جریان داخل شیار

در شکل ۵-۲۸ تغییرات عدد رینولدز نوسانی جریان در شیار و در قسمت موازی سیم پیچ که سیال، لزجت کمتری نسبت به نواحی تحت میدان مغناطیسی دارد، در محدوده دامنه و فرکانس های مورد بررسی نشان داده شده است. در محاسبه عدد رینولدز نوسانی از دامنه سرعت نوسانی متوسط سیال در عرض شیار که حداکثر مقدار این سرعت، در طول کورس می باشد استفاده شده است. از آنجایی که یکی از اهداف پژوهش تعیین رژیم

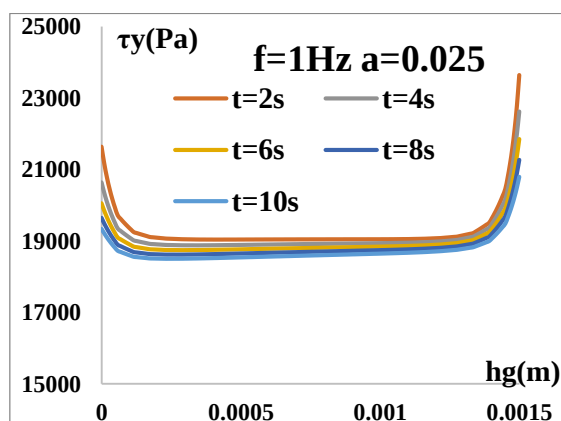
جریان به جهت بررسی امکان مغشوش شدن جریان بوده است، اعداد رینولدز در نواحی بدون میدان مغناطیسی که ویسکوزیته پایین تری نسبت به نواحی تحت میدان مغناطیسی دارد محاسبه و بررسی شده است. با این



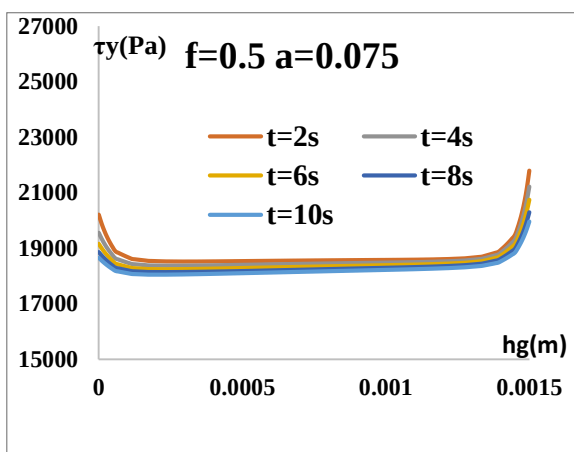
(الف)



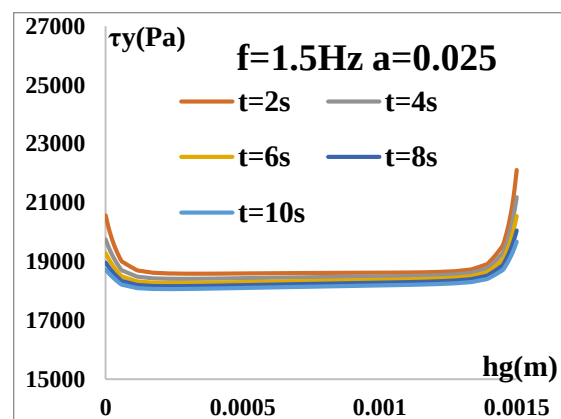
(ج)



(ب)

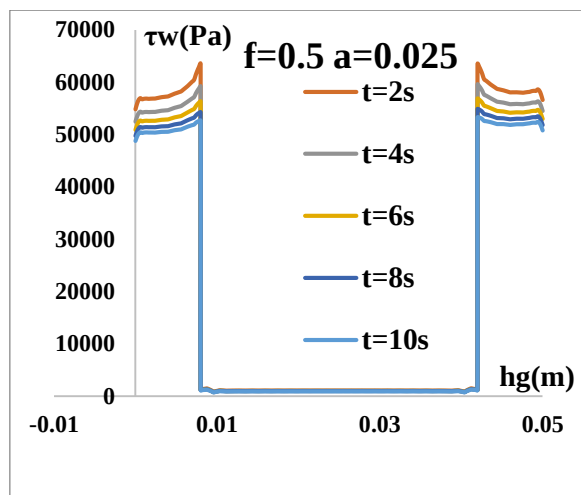


(ه)

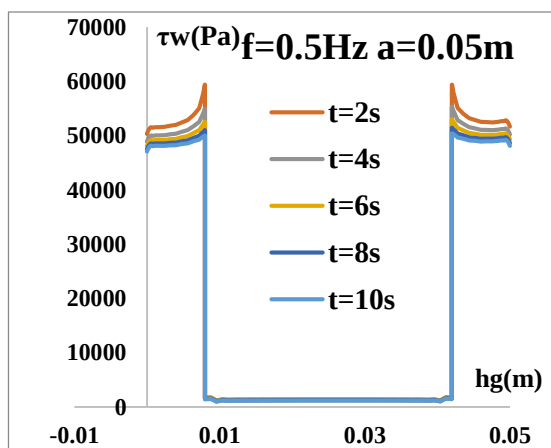


(د)

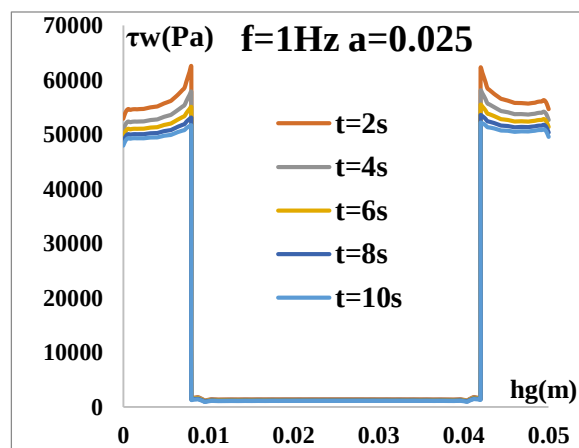
شکل ۵-۲۵: توزیع تنش تسلیم در عرض شیار در فرکانس، دامنه و زمان‌های مختلف



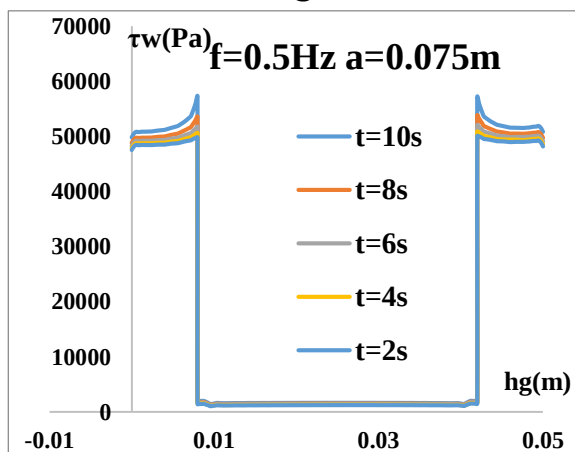
(الف)



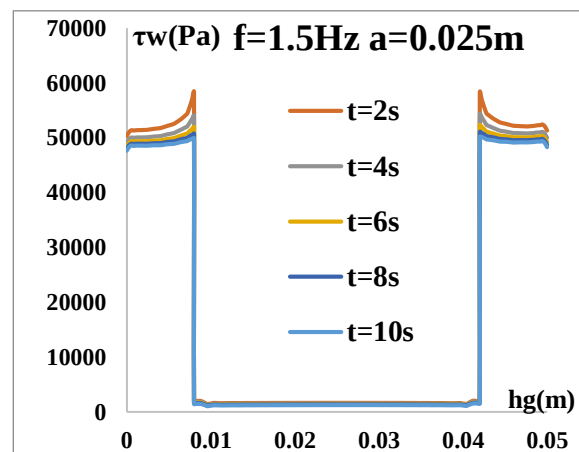
(ج)



(ب)

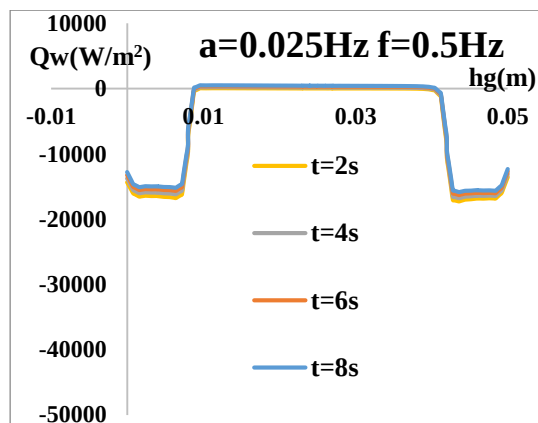


(ه)

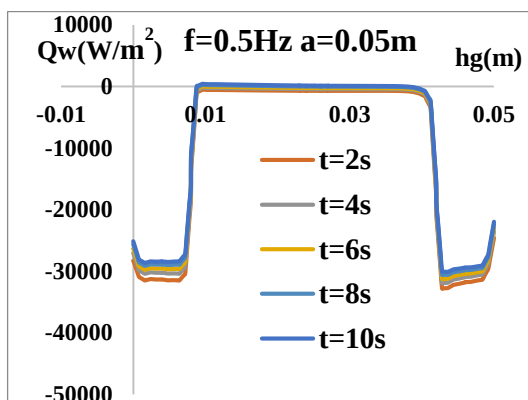


(د)

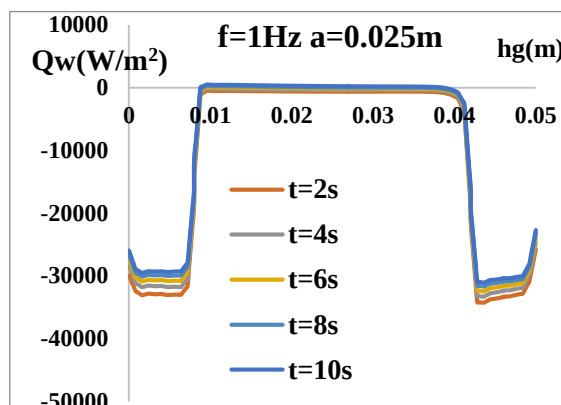
شکل ۵-۲۶: توزیع تنش برشی در دیواره شیار پیستون در فرکانس، دامنه و زمان‌های مختلف



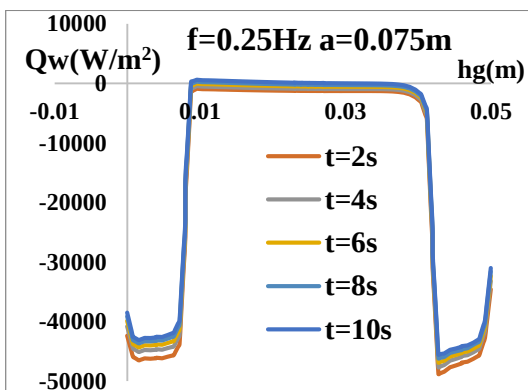
(الف)



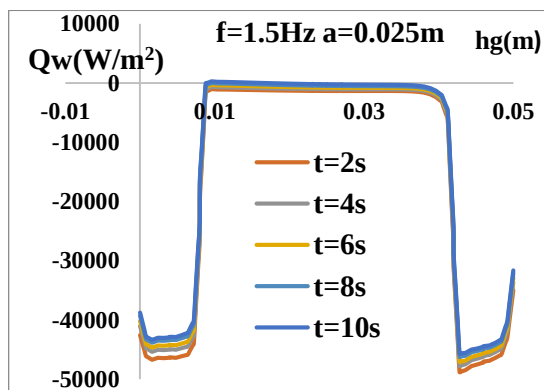
(ج)



(ب)



(ه)



(د)

شکل ۵-۲۷: توزیع شار حرارتی در دیواره شیار پیستون در فرکانس، دامنه و زمان‌های مختلف

در نواحی تحت میدان مغناطیسی که ویسکوزیته افزایش می‌یابد اعداد رینولدز در فرکانس‌های پایین به زیر یک کاهش می‌یابد و در نتیجه حل شبه استاتیک در فرکانسهای پایین متداول است. به طور نمونه با کاهش فرکانس از ۳ هرتز به ۱/۵ هرتز عدد رینولدز در نواحی تحت میدان مغناطیسی از ۲/۵ به ۰/۶۶ کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج نیرویی بدست آمده از حل شبه استاتیک و ناپایا در شکل‌های ۵-۵ و ۵-۶ در صفحات ۱۰۵ و ۱۰۶

و همینطور نتایج مربوط به سرعت در صفحه ۱۰۱ نیز نشان می دهد با کاهش فرکانس بتدریج نتایج حل شبه استاتیک و ناپایا بر هم منطبق می شوند.

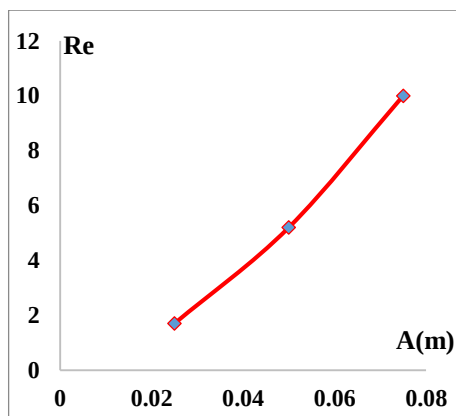
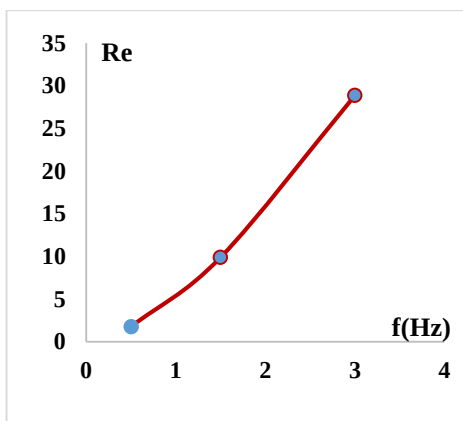
۵-۲-۴ بررسی اثر نوع بار

نمودارهای نیرو-زمان، نیرو جابجایی و نیرو سرعت برای دو نوع منحنی بار سینوسی و کسینوسی در فرکانس ۰,۵ هرتز و دامنه ۰,۰۲۵ متر در شکل های ۵-۲۸-ج-د با یکدیگر مقایسه شده اند. همانطور که مشاهده می شود تغییر نوع بار از سینوسی به کسینوسی به دلیل اختلاف فاز این دو نوع بار، تنها باعث تفاوت نمودار نیرو زمان می شود و لویهای نیرو جابجایی و نیرو سرعت هر دو نوع بار بر هم منطبق می باشند؛ بنابراین تأثیری بر عملکرد دمپر نمی گذارد.

۵-۲-۴-۵ بررسی کانتورهای توزیع تنش، دما و سرعت

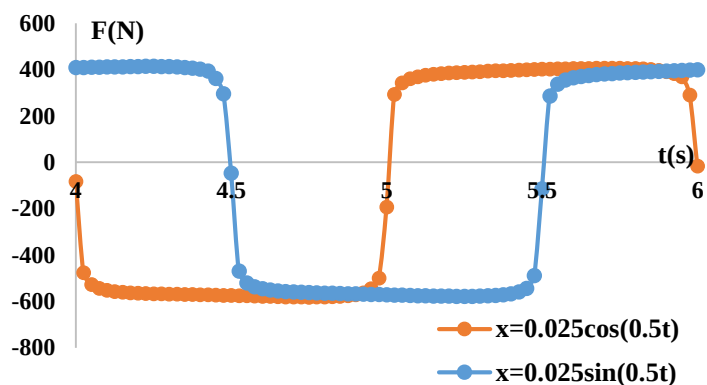
جهت بررسی دقیق تر تأثیر میدان مغناطیسی بر میدان جریان و انتقال حرارت، در این قسمت کانتورهای تنش، سرعت و چگونگی توزیع دما در عرض شیار و پیستون ارائه می شود.

شکل های ۵-۲۹-الف-ه چگونگی اثر افزایش میدان مغناطیسی بر افزایش تنش در عرض شیار و تشکیل ناحیه پلاگ، در ناحیه تحت میدان مغناطیسی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، افزایش مقادیر تنش در داخل شیار با افزایش میدان مغناطیسی، در هر دو ناحیه میانه و نزدیک دیواره توسط مدل سازی انجام شده به خوبی پیش بینی می شود. این افزایش ناشی از افزایش تنش تسلیم و لزجت سیال در ناحیه پس از تسلیم با افزایش میدان مغناطیسی می باشد. همان طور که مشاهده می شود مشابه نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، تغییرات مقادیر تنش به دست آمده در عرض شیار در میدان 272 kA/m به اشباع می رسد. شکل ۵-۲۹-و اثر افزایش دما بر کاهش تنش ها در عرض شیار در حالت اشباع مغناطیسی را نشان می دهد. مطابق کانتورهای نشان داده شده، حداکثر تنش در عرض شیار با افزایش میدان مغناطیسی تا ۸۵ کیلو پاسکال می تواند افزایش یابد که با در نظر گرفتن اثرات حرارتی این مقدار به ۶۰ کیلو پاسکال کاهش می یابد؛ بنابراین، اثرات حرارتی باعث می شود مقادیر تنش برشی در عرض شیار نزدیک به ۳۰ درصد کاهش یابد. چگونگی توزیع دما در عرض شیار و پیستون با گذشت زمان، در شکل های ۵-۳۰ و ۳۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده

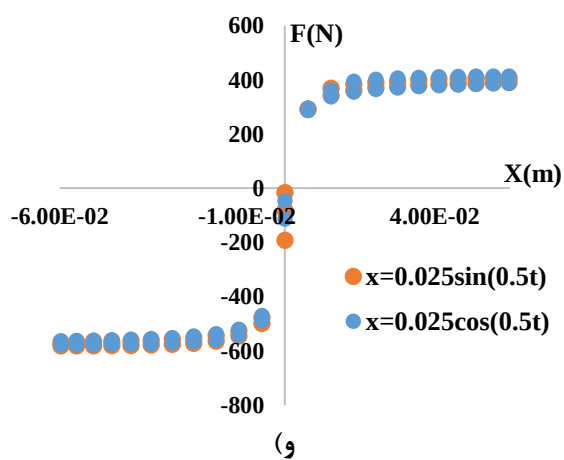


(ب)

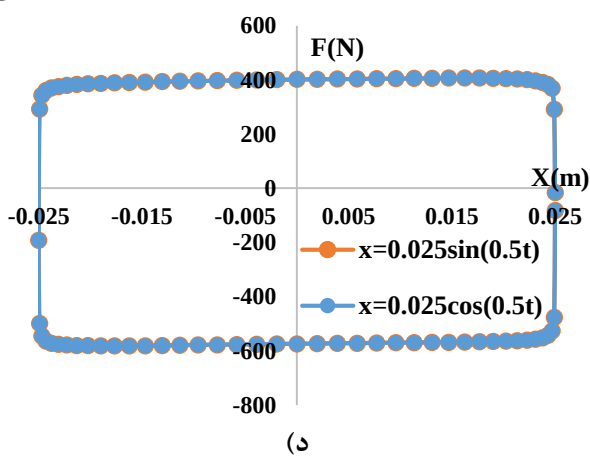
(الف)



(ج)



(و)

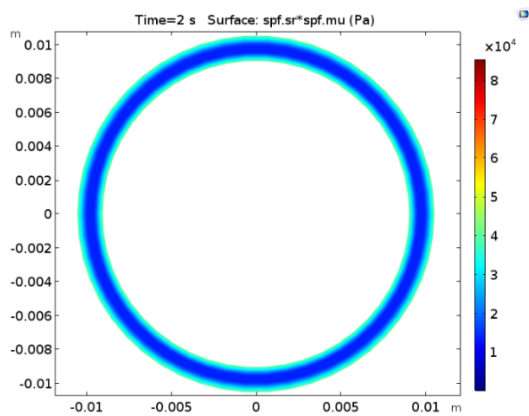


(د)

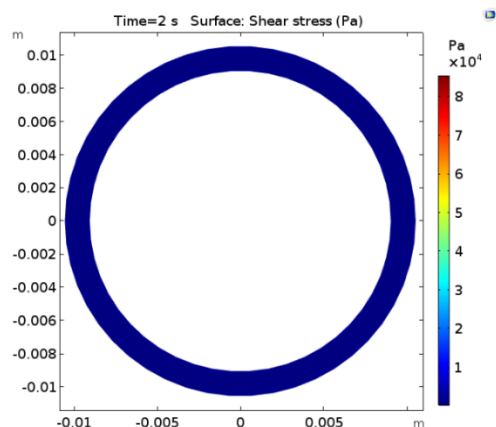
شکل ۵-۲۸ بررسی رینولدز جریان در الف) دامنه و ب) فرکانس‌های مورد بررسی و مقایسه ج) نمودارهای نیرو زمان

(د) نیرو-جابجایی و نیرو-سرعت بارهای سینوسی و کسینوسی

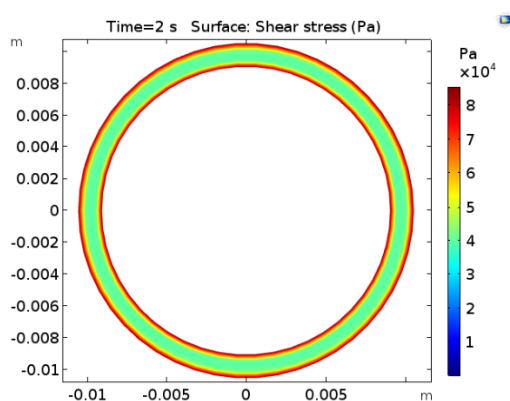
می‌شود، با گذشت زمان، به تدریج افزایش دمای ایجادشده در سیال در ناحیه تحت میدان مغناطیسی، باعث افزایش دمای بدنه پیستون می‌شود. در نواحی نزدیک به دیواره داخلی، به دلیل مجاورت با کوئل افزایش دمای بیشتری مشاهده می‌شود.



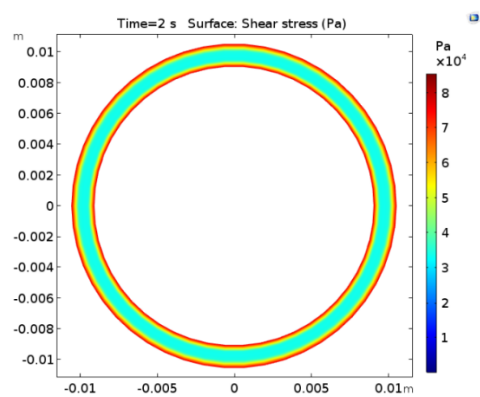
(ب)



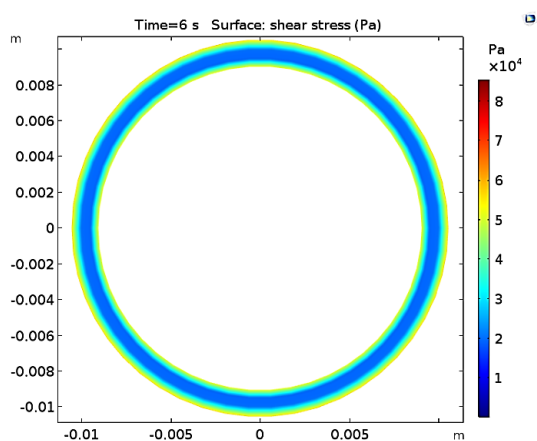
(الف)



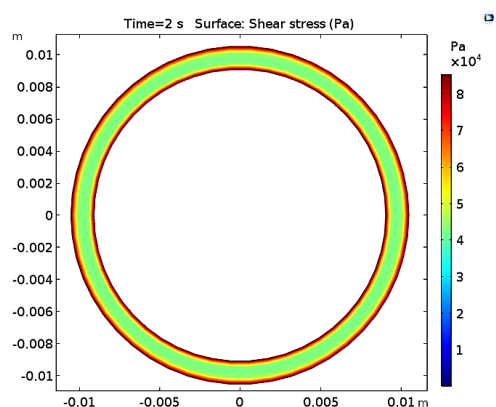
(د)



(ج)



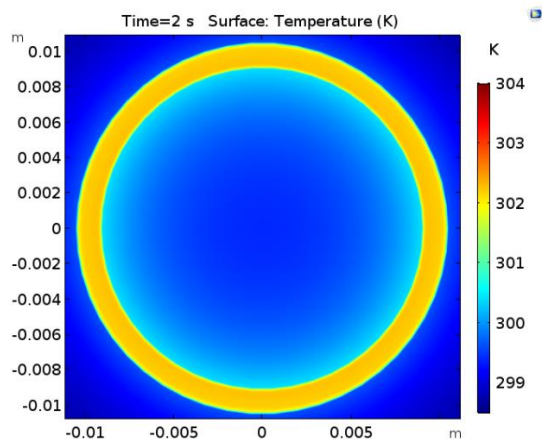
(و)



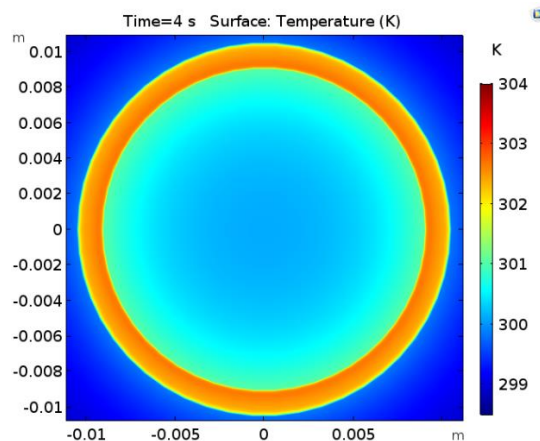
(ه)

شکل ۵-۲۹: توزیع تنش در شیار پیستون در ناحیه تحت میدان مغناطیسی

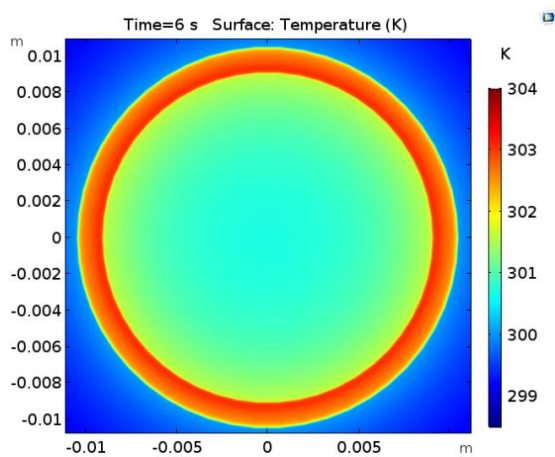
الف) $H=0\text{KA/m}$ (ب) $H=91.01\text{KA/m}$ (ج) $H=181.77\text{KA/m}$ (د) $H=272.099\text{KA/m}$ (ه) 361.98KA/m (و) با در نظر گرفتن اثرات حرارتی



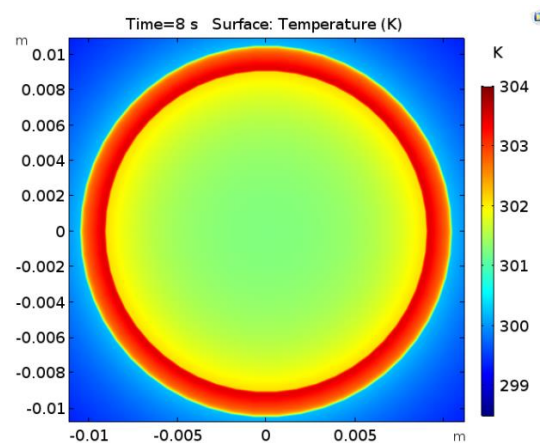
(ب)



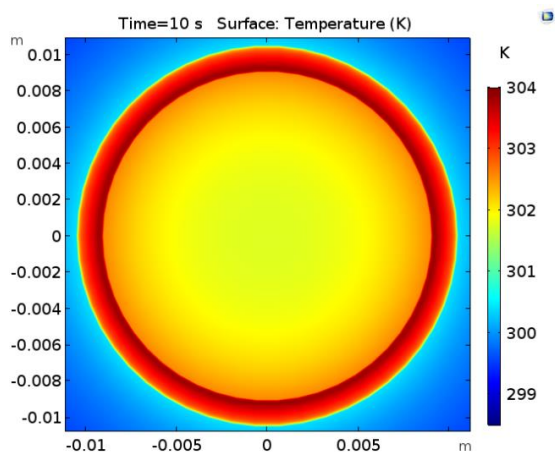
(الف)



(د)



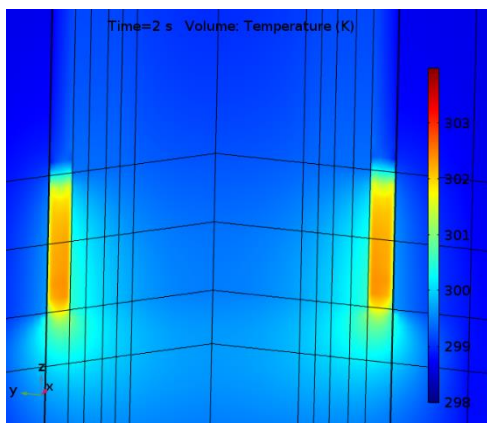
(ج)



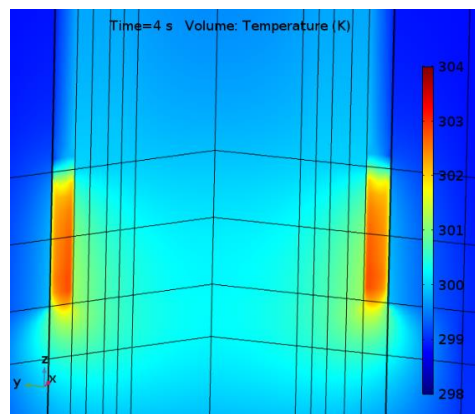
(ه)

شکل ۵-۳: توزیع دما در شیار و بدنه پیستون در ناحیه تحت میدان مغناطیسی

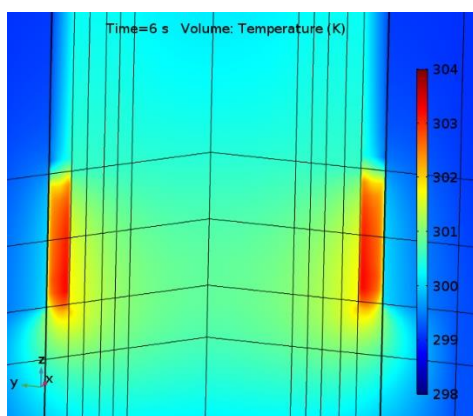
الف) $t=2s$ ب) $t=4s$ ج) $t=6s$ د) $t=8s$ ه) $t=10s$



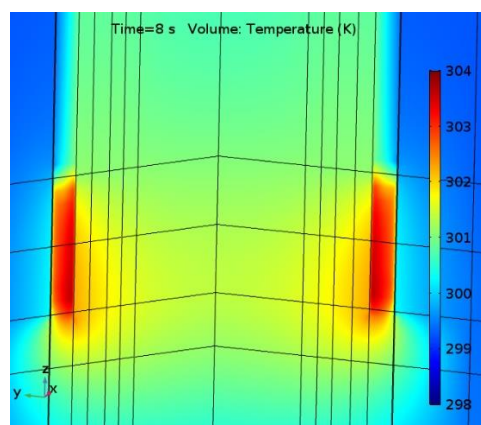
(ب)



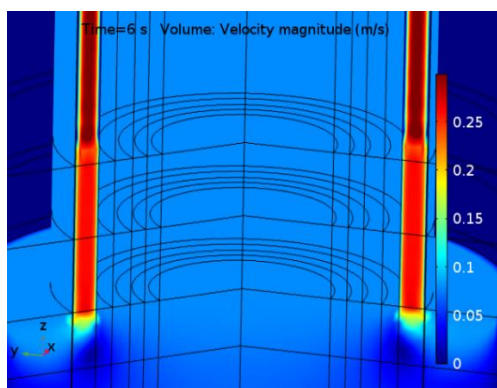
(الف)



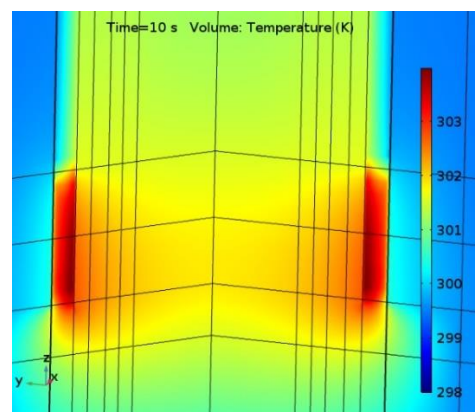
(د)



(ج)



(و)



(ه)

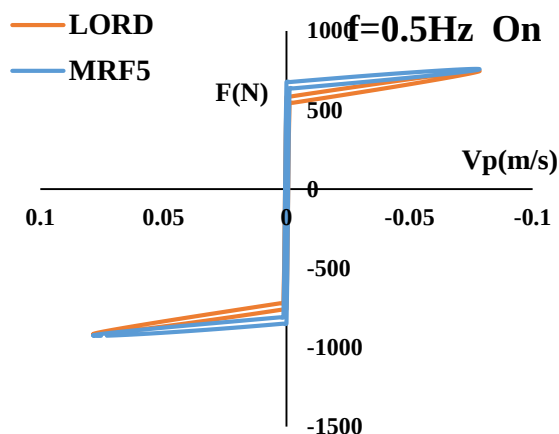
شکل ۵-۳۱: توزیع دما در طول شیار و بدنه پیستون در ناحیه تحت میدان مغناطیسی
 (الف) $t=2s$ (ب) $t=4s$ (ج) $t=6s$ (د) $t=8s$ (ه) $t=10s$ (و) توزیع سرعت در $t=6s$

۵-۳ بررسی اثر جنس سیال

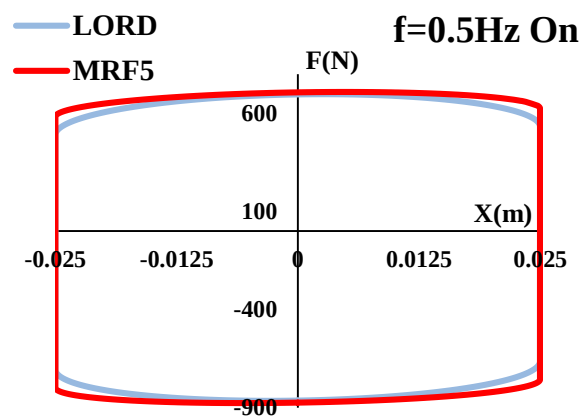
اثر پودر آهن کربونیل بر خصوصیات رئولوژی سیال در مطالعات پیشین مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس مطالعات انجام شده، افزایش درصد پودر آهن باعث افزایش تنش تسلیم سیال می شود. در این پژوهش و در فصول گذشته، اثر جنس سیال پایه و درصد ماده نگهدارنده بر این خصوصیات مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت از پژوهش، اثر جنس سیال پایه بر نیرو و انرژی دمپینگ و همچنین ضریب میرایی دمپر مورد بررسی قرار می گیرد. به این منظور با استفاده از نتایج به دست آمده از تست های رئومتری برای سیال لرد و سیال MRF5 ساخته شده در این پژوهش که هر دو دارای ۸۵ درصد پودر آهن کربونیل و سیال پایه مختلف می باشند و مدل سازی انجام شده، لوپهای نیرو-جابجایی و نیرو سرعت دمپر، به دست آمده و با یکدیگر مقایسه شده اند. همچنین مقادیر انرژی دمپینگ و ضریب میرایی دمپر نیز محاسبه می شوند.

مطابق نمودارهای تنش-نرخ برش به دست آمده از تست های رئومتری انجام شده، مقادیر تنش به دست آمده برای سیال MRF5 ساخته شده در این پژوهش از سیال لرد، بیشتر می باشد. در نتیجه مطابق شکل های ۵-۳۲-الف-د، مقادیر نیروی دمپینگ به دست آمده از سیال MRF5 ساخته شده در این پژوهش از سیال لرد در هر دو حالت اشباع مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی بیشتر می باشد. مطابق شکل های نشان داده شده، در فرکانس ۰,۵ هرتز در نرخ برش های پایین (دو انتهای کورس) اختلاف بین لوپهای نیرو جابجایی و نیرو سرعت دو سیال افزایش می یابد. این اختلاف در فرکانس ۰,۱۵ هرتز نیز، به دلیل کاهش سرعت و در نتیجه محدوده نرخ برش پایین تر، در همه نواحی بیشتر می شود. از آنجایی که هر دو سیال از درصد پودر یکسانی تشکیل شده اند، در نتیجه، دلیل این اختلاف، به دلیل تفاوت سیال پایه و ماده نگهدارنده می باشد. درصد پودر، بیشترین تأثیر را در تنش تسلیم سیال مگنتورئولوژیکال تحت میدان مغناطیسی دارد؛ بنابراین در حالت بدون میدان مغناطیسی که تنش تسلیم ناچیز می باشد، اختلاف رفتار رئولوژیکی دو سیال و نتایج نیرویی ناشی از تفاوت سیال پایه، مطابق شکل ۵-۳۲-و ه مشهودتر است.

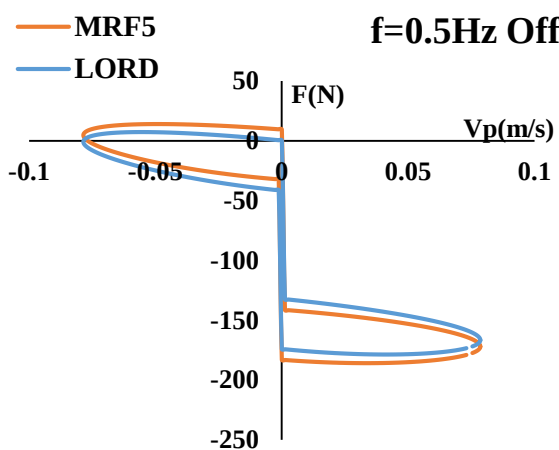
تفاوت بین نتایج نیرویی دو سیال MRF5 و لرد، به طور مشابه باعث تفاوت انرژی دمپینگ و ضریب میرایی دمپر می شود. مطابق شکل های ۵-۳۳، این اختلاف در فرکانس های پایین تر و بدون میدان، افزایش می یابد.



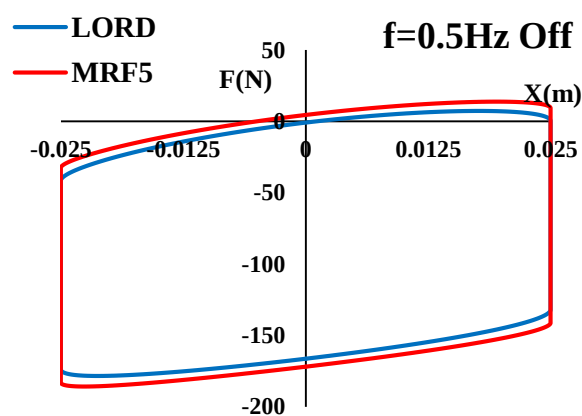
(ب)



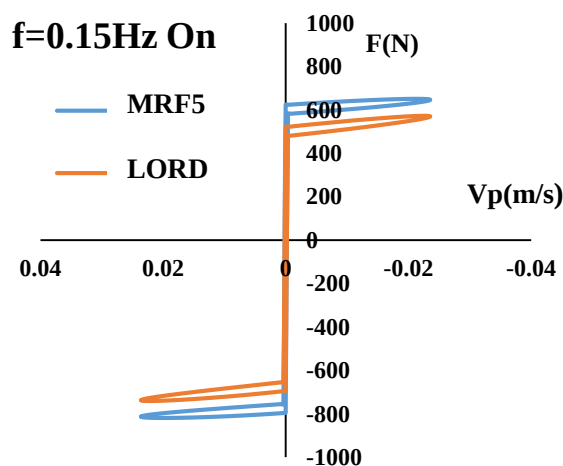
(الف)



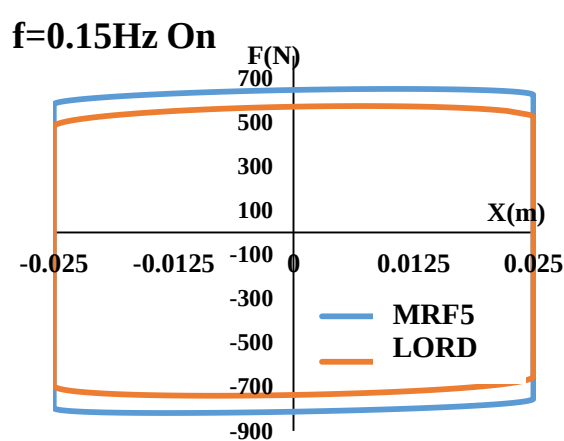
(د)



(ج)

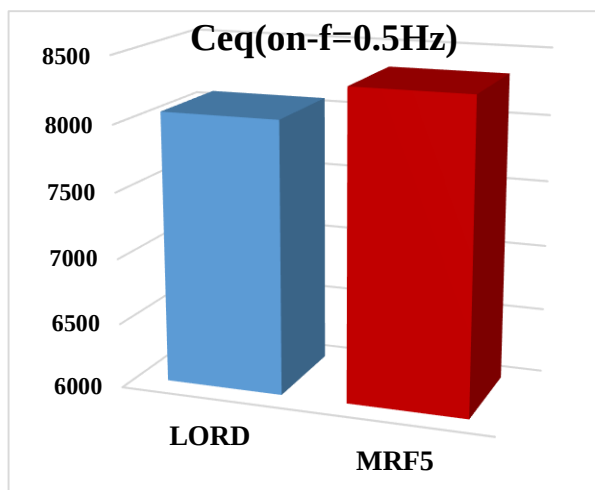


(ه)

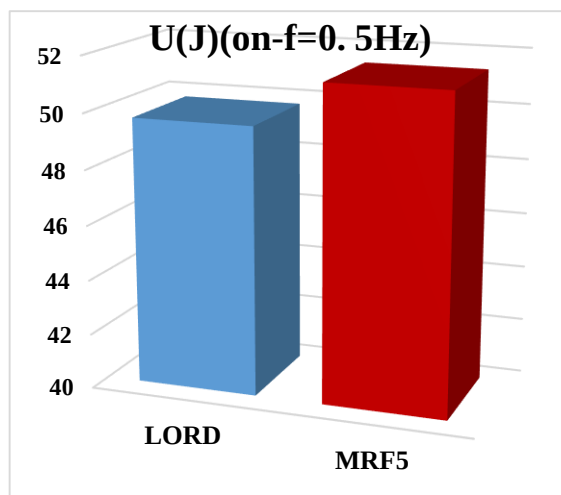


(و)

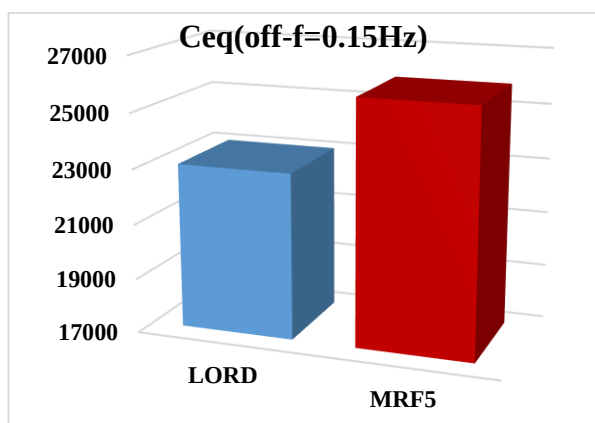
شکل ۵-۳۲: اثر جنس سیال بر لویهای نیرو-جابجایی و نیرو-سرعت



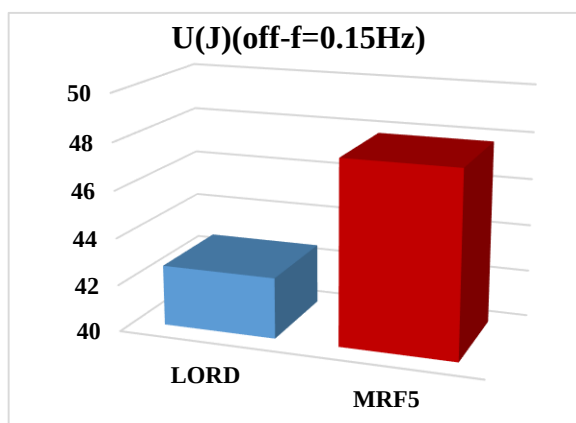
(ب)



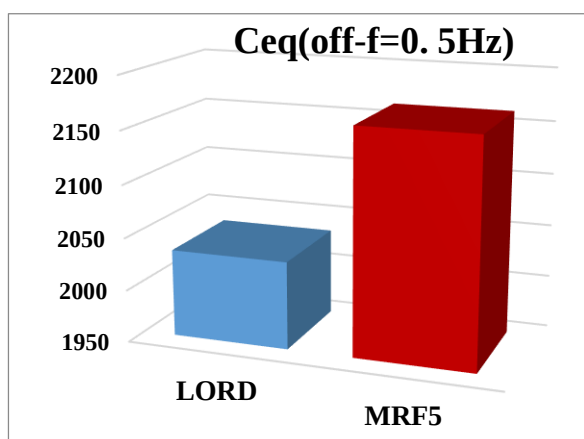
(الف)



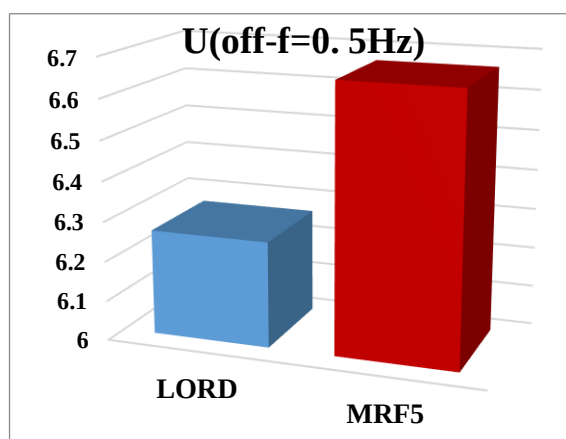
(د)



(ج)



(هـ)



(و)

شکل ۵-۳۳: اثر جنس سیال بر انرژی دمپینگ و ضریب میرایی

فصل ششم

طراحی، ساخت و تستهای نیرویی دمپر مگنتورئولوژیکال

۱-۶ طراحی

یکی از معیارهای مهم در طراحی دمپرهای مگنتورئولوژیکال، این است که نسبت نیروی دمپینگ کل در حالتی که دمپر تحت میدان مغناطیسی است، به نیروی کل در حالتی که دمپر تحت میدان مغناطیسی نمی‌باشد تا حد امکان بزرگ باشد. همان‌طور که در فصل ۳ بیان شد، روابط موجود برای محاسبه این نیروها مبتنی بر فرض شبه استاتیک و بدون در نظر گرفتن اثر ترم اینرسی، نیروی ناشی از تنش برشی دیواره، اثر میدان مغناطیسی بر لزجت پلاستیک و همچنین اثرات دمایی می‌باشد. در این پژوهش، با استفاده از مدل غیرنیوتونی ارائه‌شده برای سیال ساخته‌شده در این پژوهش به صورت تابعی از میدان و دما و حل عددی و در نتیجه با در نظر گرفتن تمامی اثرات مذکور، نسبت دونیرو به عنوان تابع هدف در محدوده عرض شیار و نیروی موردنظر، در نظر گرفته می‌شود. در حالت کلی و بنا بر فرمول‌های موجود، با کاهش اندازه شیار هر دونیرو افزایش می‌یابند. باین حال ممکن است با کاهش بیشتر عرض شیار از یک مقدار مشخص، نیروی دمپینگ در حالت بدون میدان با سرعت بیشتری نسبت به نیروی دمپینگ در حالت تحت میدان مغناطیسی افزایش یابد و نسبت دونیرو کاهش یابد. در نتیجه، عرض شیار می‌تواند پارامتر مؤثر در این نسبت باشد.

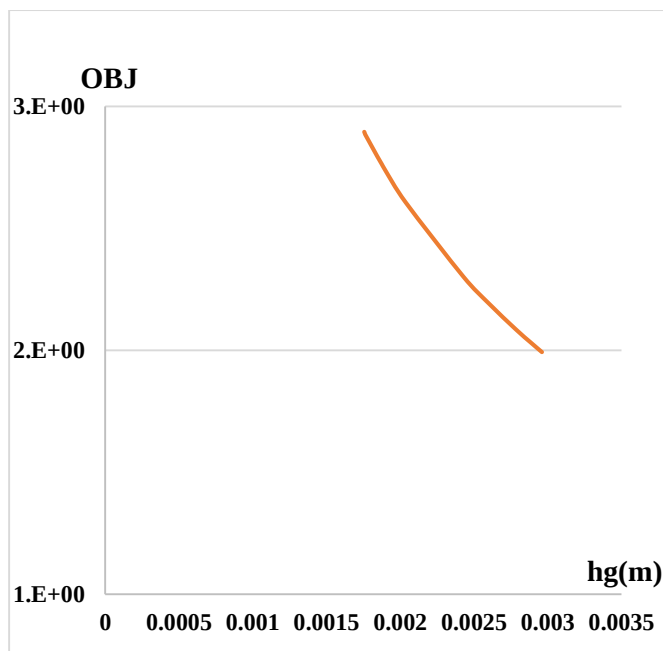
به این منظور با استفاده و نرم‌افزار کامسول دو حل تعریف می‌شود. به گونه‌ای در یک حل، اثر میدان مغناطیسی اعمال شده و لزجت ظاهری به صورت تابع دما در شرایط اشباع مغناطیسی استفاده می‌شود؛ و در حل دیگر لزجت ظاهری به صورت تابعی از دما در شرایط بدون میدان مغناطیسی وارد می‌شود. سپس با استفاده از الگوریتم مونت کارلو و تعریف نسبت نیروی دمپینگ به دست آمده از این دو حل به عنوان تابع هدف، عرض شیار که در آن حداکثر این نسبت در محدوده نیرویی و عرض شیار موردنظر به دست می‌آید جستجو می‌شود. تابع و محدوده موردنظر در روابط (۱-۶) نشان داده شده‌اند.

$$OBJ = \frac{F_{maxon}}{F_{maxoff}} \quad (1-6)$$

$$1.5\text{mm} < hg < 3\text{mm} \quad (2-6)$$

$$300 < F_{on} < 500 \quad (3-6)$$

مقادیر عرض شیار به دست آمده از حل انجام شده در محدوده عرض شیار مورد نظر و با در نظر گرفتن محدوده نیرویی مشخص شده، در شکل ۶-۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، در این محدوده بیشترین مقدار به دست آمده با در نظر گرفتن محدوده نیرویی مشخص شده، مربوط به عرض شیار $h=1.8 \text{ mm}$ می باشد.



شکل ۶-۱: تغییرات محدوده دینامیکی با عرض شیار

۶-۲ ساخت

مدار الکترومغناطیسی این دمپر، متشکل از پیستون آهنی است که خود، متشکل از هسته، نگه دارنده، سیم پیچ و استوانه فلزی دور هسته می باشد. در این مدار ۴۹۰ دور سیم به قطر ۰,۴ میلی متر استفاده شده است. همچنین جنس پیستون و قطعه ای که مدار مغناطیسی توسط آن بسته می شود آهن ST37 می باشد. طول هر یک از فلنج ها ۸ میلی متر و عرض شیار نهایی استفاده شده با توجه به محدودیت های ساخت موجود $h=2.1 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است. طول و قطر پیستون به ترتیب ۵ و ۳ سانتی متر می باشند. نقشه های مربوط به دمپر مگنتورئولوژیکال ساخته شده در پیوست ضمیمه شده اند.

مراحل ساخت و سیم‌پیچی مدار مغناطیسی در شکل ۶-۲ قابل مشاهده است. جهت ساخت قطعات مربوطه از دستگاه‌های فرزکاری و تراشکاری استفاده شده است. شیارهای نگهدارنده ها با استفاده از دستگاه فرز تعبیه شده و هسته و پوسته به وسیله دستگاه تراش مطابق شکل ۶-۲-الف و ب ساخته می شوند. قطعات ساخته شده در شکل ۶-۲-ج قابل مشاهده است.

سیم‌پیچ به دور شیار ماشین‌کاری شده پیرامون هسته پیستون مطابق شکل ۶-۲-د پیچیده شده است. پس از اینکه سیم‌پیچ‌ها پیچیده شدند، سیم‌پیچ با چسب پوشانده می شود. دو دلیل برای استفاده از چسب وجود دارد. اولین دلیل، محافظت کردن از سیم‌پیچ‌ها است تا از پارگی و اتصال کوتاه شدن آن‌ها جلوگیری شود. دومین دلیل، فراهم کردن یک مسیر صاف و بدون ناپیوستگی برای سیال در طول سیم‌پیچ است.

همچنین نمای انفجاری از دمپر، پیستون و دمپر مونتاژ شده در شکل ۶-۳ نشان داده شده است.

۶-۳ تست‌های نیرویی دمپر

در این پژوهش، تست‌های نیرویی دمپر مگنتورئولوژیکال ساخته شده، در آزمایشگاه تشخیص خواص مکانیکی دانشگاه صنعتی شاهرود و به کمک دستگاه اینسترون^۱، شکل ۶-۴، انجام می شود. شکل شماتیک دستگاه اینسترون و ابعاد هندسی آن در شکل ۶-۷ و جدول ۶-۱ نشان داده شده است. تست‌ها در فرکانس‌های ۰٫۵، هرتز و ۰٫۱۵، هرتز و طول کورس ۵۰ میلی‌متر، تحت میدان‌های مختلف برای سیال مگنتورئولوژیکال MRF5 ساخته شده در آزمایشگاه که روش ساخت و ترکیبات آن در فصول گذشته توضیح داده شده، انجام می شود. قبل از انجام تست، اپراتور دستگاه، فایل تنظیمات مربوط به این تست را آماده می کند. دمپر را در قاب دستگاه و بین گیره‌ی آن قرار می دهیم.

۶-۴ نتایج تست‌های نیرویی

در مرحله اول در فرکانس ۰٫۵ هرتز و دامنه نوسان ۰٫۰۲۵ متر، بدون اعمال جریان الکتریکی به سیم‌پیچ پیستون، میزان نیروی دمپر را در حالتی که هیچ میدان مغناطیسی اعمال نمی شود به دست آوریم. منحنی تغییرات نیرو برحسب جابجایی برای سیال MRF5 ساخته شده، در شکل ۶-۶ نشان داده شده است.

¹.Instron



(ب)



(الف)

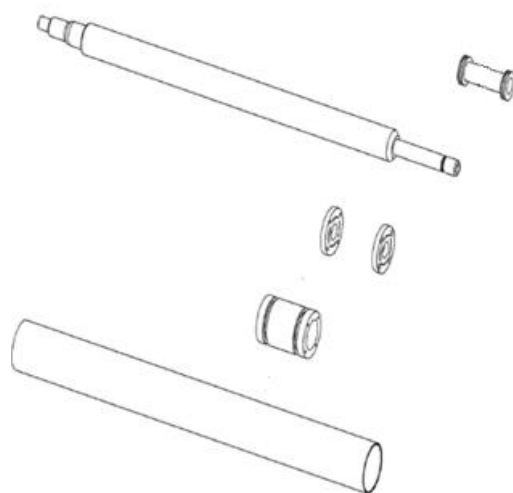


(د)



(ج)

شکل ۶-۲: مراحل ساخت (الف) فرزکاری (ب) تراشکاری (ج) قطعات ساخته شده پیستون (د) سیم پیچی



(الف)

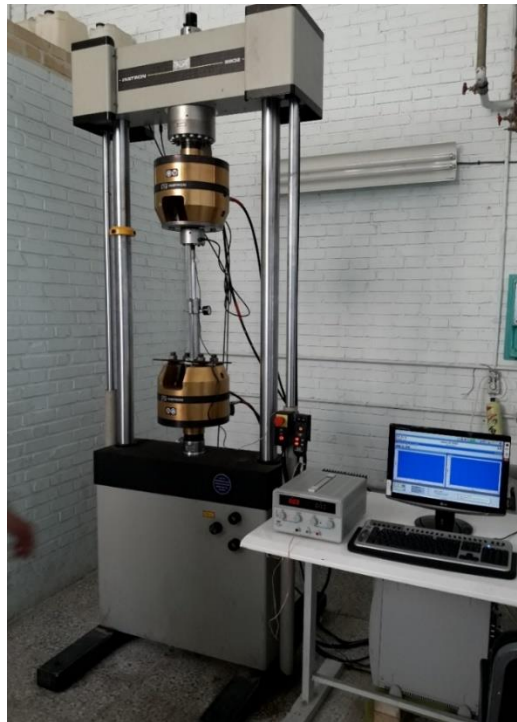


(ب)

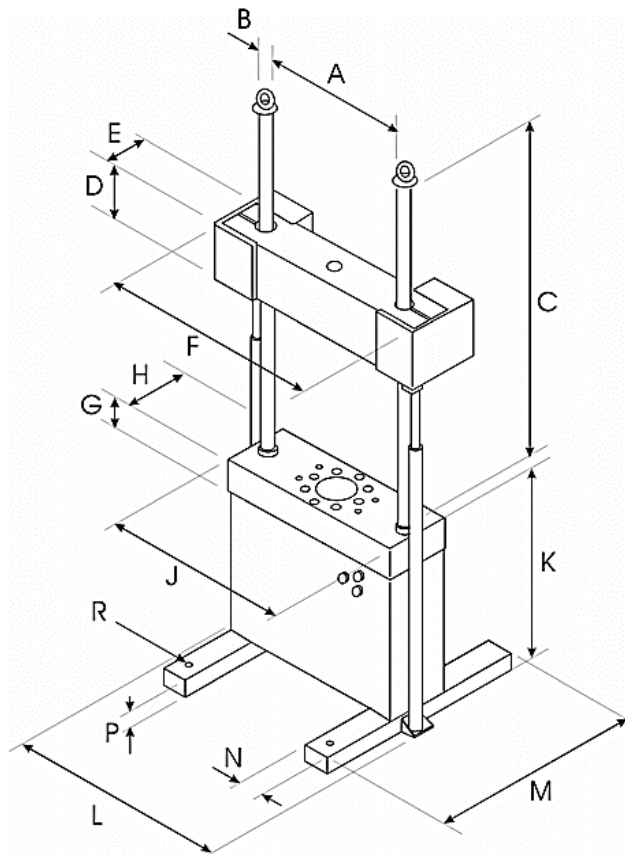


(ج)

شکل ۶-۳-الف) نمای انفجاری از دمپر MR (ب) پیستون دمپر MR (ج) دمپر MR مونتاژ شده



شکل ۴-۶ دستگاه اینسترون



شکل ۵-۶: نمای شماتیک و مشخصات هندسی دستگاه اینسترون

جدول ۶-۱: ابعاد هندسی دستگاه اینسترون mm(in)

Dimension	Description	Frame Type			
		8802 B1	8802 B2	8803 B1	8803 B2
A	Column Spacing	664 (26)	664 (26)	778 (31)	788 (31)
B	Column Diameter	76 (3)	76 (3)	101 (4)	101 (4)
C	Column Length	1780 (70)	2240 (88)	2240 (88)	1680 (106)
D	Crosshead Depth	275 (11)	275 (11)	350 (14)	350 (14)
E	Crosshead Length	200 (8)	200 (8)	275 (11)	275 (11)
F	Crosshead Width	1030 (41)	1030 (41)	1230 (48)	1230 (48)
G	Table Depth	150 (6)	150 (6)	200 (8)	200 (8)
H	Table Length	300 (12)	300 (12)	380 (15)	380 (15)
J	Table Width	870 (34)	870 (34)	1030 (41)	1030 (41)
K	Table Height	910 (36)	1115 (44)	1015 (40)	1220 (48)
L	Overall Width	1060 (42)	1060 (42)	1270 (50)	1270 (50)
M	Overall Length	1120 (44)	1120 (44)	1220 (48)	1220 (48)
N	Base Width	120 (5)	120 (5)	150 (6)	150 (6)
P	Base Depth	80 (3)	80 (3)	100 (4)	100 (4)
R	Hole Diameter	14 (0.6)	14 (0.6)	18 (0.7)	18 (0.7)

در مرحله ی بعدی، در همین فرکانس و دامنه، به سیم پیچ پیستون دمپر مگنتورئولوژیکال ساخته شده، جریان ۱ آمپر اعمال می کنیم. مطابق نتایج به دست آمده، میدان مغناطیسی ایجاد شده بر اثر اعمال جریان ۱ آمپر، باعث افزایش قابل توجه نیرو و انرژی دمپینگ شده و با افزایش جریان به ۲ و ۳ آمپر، به تدریج میدان مغناطیسی به حالت اشباع رسیده و حداکثر افزایش تنش تسلیم و لزجت ناشی از میدان مغناطیسی در سیال و در نتیجه نیروی دمپینگ در دمپر ایجاد می شود. افزایش میدان مغناطیس تا رسیدن به شرایط اشباع مغناطیسی، باعث می شود حداکثر نیروی دمپینگ در مکش تا بیش از سه برابر افزایش یابد. به عبارت دیگر، اثر MR بر مبنای نیروی دمپینگ، در مکش ۳ می شود. همچنین بر مبنای انرژی، اثر MR^۱، به صورت نسبت

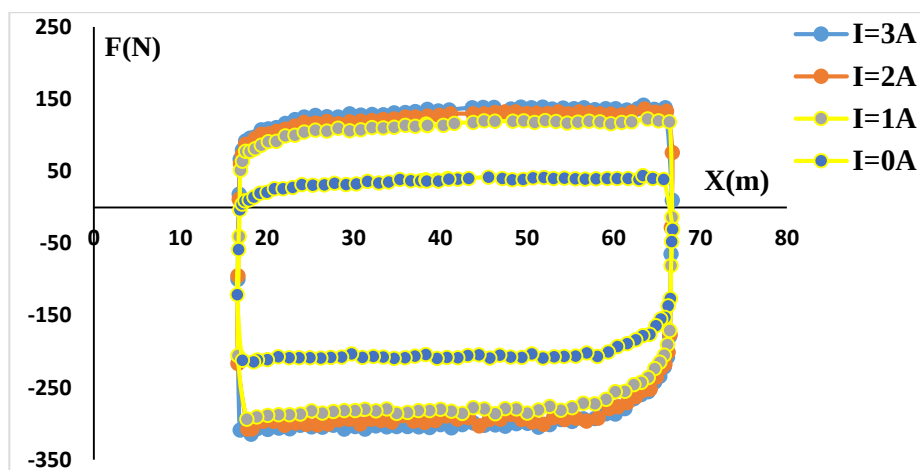
^۱ MR Effect

مساحت محصور به سیکل در حالت اشباع، به مساحت محصور به سیکل در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی تعریف می‌شود و در این نمونه $1/8$ به دست می‌آید.

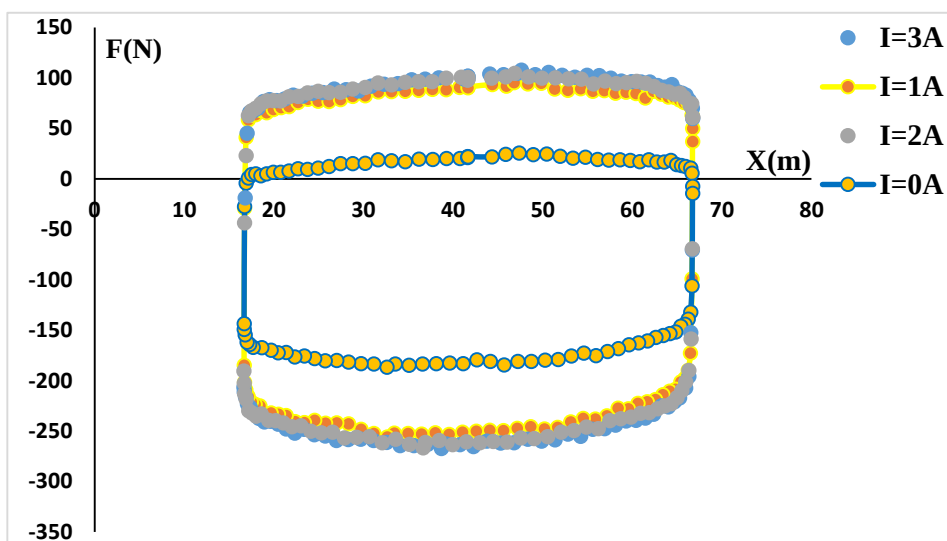
در مرحله بعد، به‌طور مشابه، در فرکانس 0.15 هرتز و دامنه نوسان 0.025 متر، ابتدا، بدون اعمال جریان الکتریکی به سیم‌پیچ پیستون و سپس با اعمال جریان $1-3$ آمپر، منحنی تغییرات نیرو برحسب جابجایی برای سیال MRF5 ساخته‌شده را، مطابق شکل $6-6$ به دست می‌آوریم. مقایسه نتایج مربوط به حداکثر نیروی دمپینگ و اثر MR نشان می‌دهد، افزایش میدان مغناطیس تا رسیدن به شرایط اشباع مغناطیسی، باعث می‌شود حداکثر نیروی دمپینگ درمکش تا 4 برابر افزایش یابد. همچنین بر مبنای انرژی، اثر MR¹، به‌صورت نسبت مساحت محصور به سیکل در حالت MR اشباع، به مساحت محصور به سیکل در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی تعریف می‌شود و در این نمونه نیز تقریباً $1/8$ به دست می‌آید.

اثر کاهش فرکانس بر منحنی‌های نیرو جابجایی با استفاده از هر دو روش آزمایشگاهی و عددی در شکل در شکل $6-7$ نشان داده‌شده است. همانطور که نشان داده‌شده است، هر دو روش روند مشابهی را در تغییر لوپ های نیرو جابجایی با تغییر فرکانس نشان می‌دهند.

همچنین نتایج آزمایشگاهی با روش عددی، در شرایط اشباع مغناطیسی، در شکل $6-8$ مقایسه شده‌اند. حداکثر نیروی دمپینگ حاصل شده، یکی از پارامترهای مهم در طراحی دمپر ها می باشد. مطابق نتایج نشان داده‌شده، حداکثر نیروی دمپینگ به‌دست‌آمده از روش آزمایشگاهی در هر دوفرکانس، بیش از هشتاد درصد نیروی دمپینگ به‌دست‌آمده از روش عددی می‌باشد.

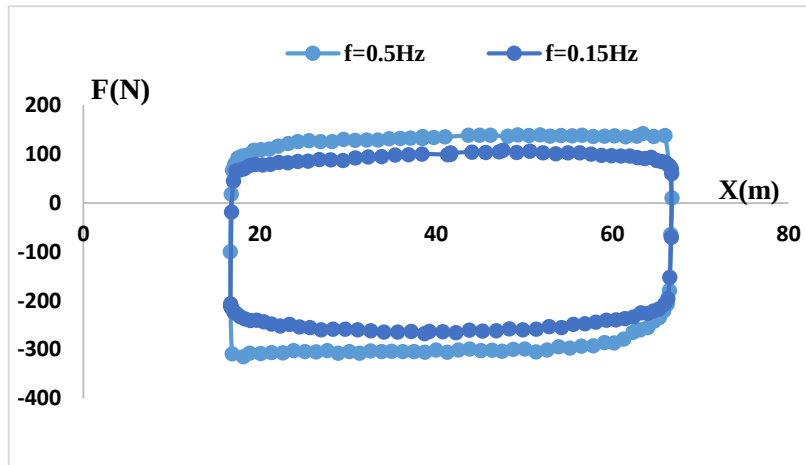


(الف)

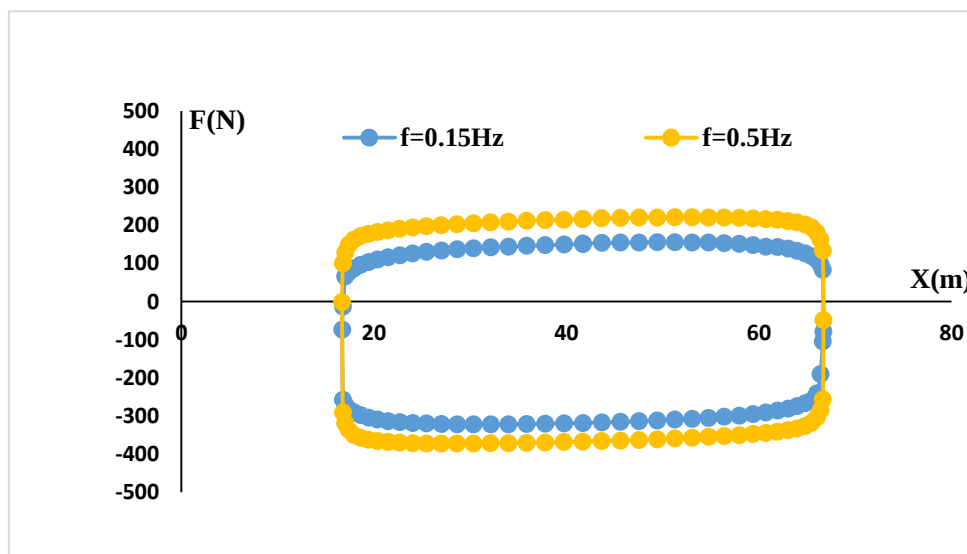


(ب)

شکل ۶-۶: منحنی نیرو-جابجایی آزمایشگاهی برای الف) $f=0.5Hz$ ب) $f=0.15Hz$

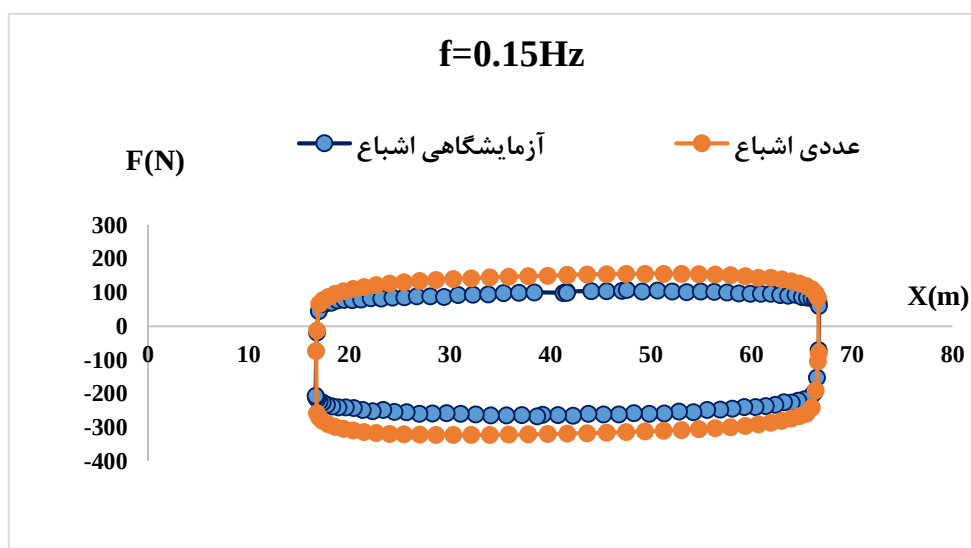
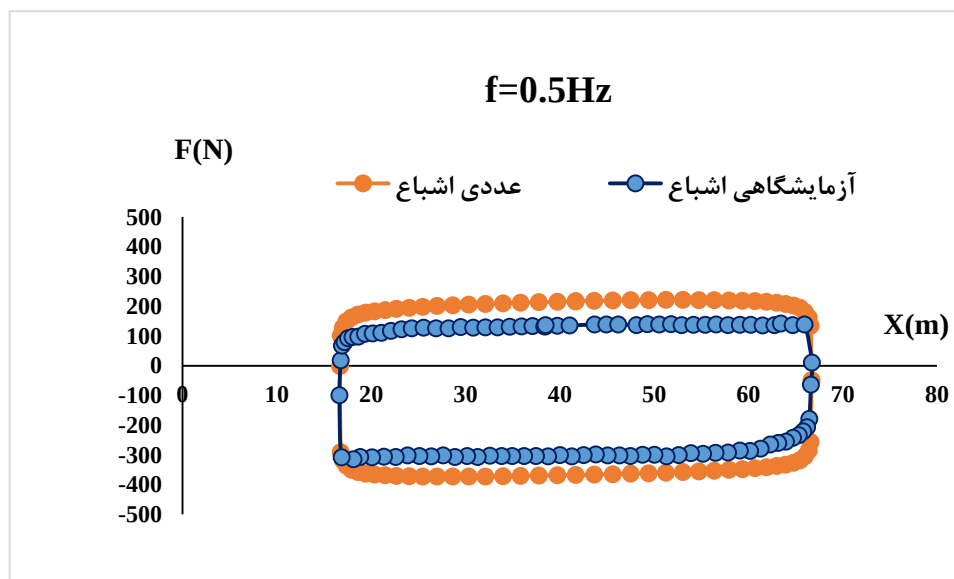


(الف)



(ب)

شکل ۶-۷: اثر فرکانس بر منحنی نیرو-جابجایی (الف) آزمایشگاهی (ب) عددی



شکل ۶-۸: مقایسه نتایج آزمایشگاهی با کار حاضر الف) $f=0.5\text{Hz}$

ب) $f=0.15\text{Hz}$

• نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا بر طبق نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های SEM و EDX روی سه نمونه پودر آهن کربونیل، پودر با اندازه ذرات و خلوص مناسب انتخاب شد. سپس با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از تست‌های پایداری انجام‌شده روی ۵ نمونه سیال مگنتورئولوژیکال ساخته‌شده با ترکیب‌های مختلف پودر آهن (۶۵٪، ۷۵٪ و ۸۵٪) و ماده نگه‌دارنده (۱٪، ۲٪ و ۳٪)، سیال بهینه با پایداری و غلظت مناسب (۸۵٪ وزنی پودر آهن و ۱٪ وزنی اسید استئاریک) جهت انجام تست‌های رئومتری انتخاب شد. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از تست‌های رئومتری در نرخ برش، دما و میدان‌های مختلف، یک مدل غیر نیوتونی اصلاح‌شده جدید جهت مدل‌سازی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال بهینه، ارائه و با نتایج مدل بینگهام پلاستیک که به‌طور متداول و در فرمول‌های طراحی برای مدل‌سازی رفتار جریان سیال و دمپر مگنتورئولوژیکال مورد استفاده قرار می‌گیرد مقایسه شد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، مدل بینگهام پلاستیک، بخصوص در نرخ برش‌های پایین خطای قابل‌توجهی نسبت به مدل اصلاح‌شده پیشنهادی در این پژوهش در پیش‌بینی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال دارد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش میدان مغناطیسی و دما این خطا افزایش می‌یابد. نتایج تست‌های رئومتری به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، علاوه بر تنش تسلیم، رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم و در نتیجه لزجت پلاستیک، تابع میدان مغناطیسی می‌باشد که این پدیده به‌طور معمول در پژوهش‌ها و فرمول‌های متداول مربوط به محاسبه نیروی دمپینگ در نظر گرفته نشده است. بر طبق نتایج تست‌های رئومتری انجام‌شده در میدان‌های مغناطیسی مختلف، تغییرات پارامترهای مربوط به این مدل‌ها با افزایش میدان مغناطیسی به‌تدریج به حالت اشباع می‌رسد. از مزایای دیگر مدل اصلاح‌شده جدید امکان استفاده از آن در مدل‌سازی عددی می‌باشد، بطوریکه نامحدود شدن در حل اتفاق نمی‌افتد و با وجود رفتار دوگانه سیال در ناحیه پس از تسلیم، این مدل رفتار سیال را به‌صورت تک ضابطه‌ای پیش‌بینی می‌کند. اثر جنس سیال، درصد ماده نگه‌دارنده بر رفتار سیال نیز مورد بررسی قرار گرفت و طبق نتایج به‌دست‌آمده این دو فاکتور بر رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم تأثیر می‌گذارد در حالیکه تنش تسلیم تنها تابع درصد پودر آهن و خلوص آن می‌باشد. نتایج تست رئومتری سیال بهینه ساخته‌شده با ۸۵٪ وزنی پودر آهن با نتایج روغن لرد مگنتورئولوژیکال لرد سی جی ۱۴۰

مشابه و حتی در نرخ برش‌های پایین بهتر می‌باشد که با توجه به قیمت قابل‌توجه این روغن، ساخت روغن مشابه آن در این پژوهش حائز اهمیت ویژه می‌باشد.

در مرحله بعد با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های حرارتی، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه سیال ساخته‌شده در آزمایشگاه، جهت استفاده در مدل‌سازی عددی به‌صورت توابعی از دما اندازه‌گیری و برازش شد.

مطابق نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی‌های تحلیلی شبه استاتیک، تحلیلی ناپایا و عددی و مدل‌های بینگهام پلاستیک و مدل اصلاح‌شده جدید، میدان جریان و فشار سیال مگنتورئولوژیکال، همچنین تنش برشی دیواره و شار حرارتی در نواحی تحت میدان مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای با یکدیگر دارند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، استفاده از مدل متداول بینگهام پلاستیک، بخصوص در نرخ برش‌های پایین، باعث خطای قابل‌توجه در محاسبه نیروی دمپینگ، نسبت به مدل اصلاح‌شده جدید ارائه‌شده در این پژوهش، می‌شود. همچنین نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، صرف‌نظر کردن از تنش برشی روی دیواره در فرمول‌های شبه استاتیک متداول در محاسبه نیروی دمپینگ، باعث خطای قابل‌توجه نسبت به نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی‌های جدید انجام‌شده در این پژوهش می‌شود که این خطا با افزایش عرض شیار و میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. همچنین، بررسی تأثیر ترم اینرسی در مدل‌سازی‌های انجام‌شده، نشان می‌دهد، با افزایش اثر ترم اینرسی، استفاده از روش شبه استاتیک منجر به خطای قابل‌توجهی در محاسبه میدان جریان، ضخامت ناحیه پلاگ و نیروی دمپینگ، نسبت به حل تحلیلی ناپایای انجام‌شده، بخصوص در نواحی انتهایی کورس، می‌شود. دلیل این پدیده، صرف‌نظر کردن از ترم اینرسی در روش شبه استاتیک می‌باشد که در نواحی نزدیک به انتهای کورس بیشترین مقدار را دارد؛ بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده استفاده از مدل‌ها و روش‌های ارائه‌شده در این پژوهش، نسبت به نتایج روش‌های پیشین و فرمول متداول برای دمپر مود جریان‌ی دقیق‌تر بوده و می‌توان از آن برای طراحی دقیق‌تر استفاده کرد.

نتایج به‌دست‌آمده از روش عددی و مدل‌سازی حرارتی نشان می‌دهد، تغییر میدان مغناطیسی، دامنه، فرکانس و تغییرات دمای ناشی از آن‌ها، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر میدان جریان، ضخامت ناحیه پلاگ، تنش

تسلیم، تنش برشی روی دیواره، شار حرارتی روی دیواره شیار، نیروی دمپینگ، انرژی دمپ شده و ضریب میرایی معادل دمپر مورد ارزیابی دارند. بطوریکه افزایش میدان مغناطیسی باعث کاهش سرعت در ناحیه پلاگ، بزرگ شدن ضخامت ناحیه پلاگ، افزایش گرادیان سرعت و در نتیجه تنش در ناحیه پس از تسلیم، تنش برشی و شار حرارتی روی دیواره، دما، نیروی دمپینگ، انرژی دمپ شده و ضریب میرایی معادل دمپر می‌شود. از طرف دیگر، افزایش دامن و فرکانس باعث افزایش سرعت، تنش در ناحیه پس از تسلیم، دما، تنش و شار حرارتی روی دیواره، نیرو و انرژی دمپینگ می‌شود. همچنین ضخامت ناحیه پلاگ، تنش تسلیم و ضریب میرایی معادل با افزایش فرکانس و دامن کاهش می‌یابد.

جهت بررسی رژیم جریان، عدد رینولدز در شیار پیستون، نیز محاسبه شد که طبق نتایج به دست آمده امکان مغشوش شدن جریان در محدوده سرعت مورد نظر وجود ندارد. همچنین، با هدف رسیدن به حداکثر نسبت ممکن، بین نیروی کل دمپر در حالت اشباع مغناطیسی به حالت بدون میدان مغناطیسی و با استفاده از الگوریتم مونت کارلو در نرم افزار کامسول، عرض شیار بهینه در محدوده نیرویی و عرض شیار مورد نظر جستجو شد. مطابق نتایج به دست آمده نسبت مورد نظر در محدوده عرض شیار تعیین شده، با کاهش عرض شیار روندی صعودی دارد که نهایتاً با توجه به محدودیت‌های نیرویی و ساخت موجود عرض شیار مطلوب انتخاب می‌شود. در مرحله بعد قطعات مربوط به پیستون با استفاده از روش‌های تراشکاری و فرزکاری ساخته شده و پس از سیم‌پیچی مونتاژ می‌شود. نهایتاً دمپر مونتاژ شده با استفاده از دستگاه اینسترون مورد تست‌های نیرویی در میدان‌های مختلف قرار می‌گیرد. نتایج به دست آمده، افزایش نیرو و انرژی دمپینگ با افزایش میدان مغناطیسی تا رسیدن به شرایط اشباع را به خوبی نشان داد و نسبت MR به دست آمده در دو فرکانس مختلف بر مبنای انرژی و نیروی دمپینگ، کارایی مناسب دمپر ساخته شده را نشان می‌دهد.

در ادامه، بررسی اثر جنس ماده نگهدارنده و سیالهای پایه گوناگون بر خصوصیات رئولوژیکی و حرارتی سیال و همچنین عملکرد دمپر دو مخزنه می‌تواند مورد مطالعه قرار گیرد. بدست آوردن پارامترهای مدل غیرنیوتونی ارائه شده در این پژوهش برای سیالهای مگنتورئولوژیکال با درصد پودر، ماده نگهدارنده و سیال پایه متفاوت از دیگر موضوعات قابل بررسی در پژوهش‌های آینده می‌تواند باشد.

ضمیمه ۱: نتایج آنالیز EDX

آنالیز SEM و EDX جهت تشخیص میزان خلوص پودر آهن‌های نمونه، توسط شرکت آریا الکترون اپتیک انجام شده است.

Analysis Conditions(Sample 1)

Accelerating Voltage (kV):	15.0	
Beam Current (nA):		10.000
Magnification:		25000
Live Time (s):		30
Preset Time (s)	30	
Nb Channels	1024	
Ev / Channel	20	
Offset (keV)	0	
Width (keV)	20	

Geometry

Tilt Angle (deg):	0.0
Azimuth Angle (deg):	0.0
Take Off Angle (deg):	35.0

Window

Window Type:	Moxtek AP1.3	
Window Thickness (um):		0.30
Contamination Layer (nm):		0.00

Detector

Dead Layer (um)	0.10	
Gold Layer (um)		20.00
Active Area (mm2)		10.00
Crystal:		Si
Crystal Thickness		3.00
Coating Type		Al
Coating Thickness (nm)		15.00

XmEdsPrnFoilTitle

TEM_THICK_SAMPLE _TITLE	TEM_THICK_S AMPLE	
TEM_REFERENCE_EL EMENT_TITLE	TEM_REFERE NCE_ELEMENT	
TEM_THICKNESS_TIT LE		TEM_THICKNESS
TEM_DENSITY_TITLE		TEM_DENSITY

Analysis

Correction Method:	PAP	
Analysis Type:	StdLess	
Number of oxygens:		0
χ^2		342.76

Standards

Elt	Standard Name	Elements in Standard	W%	A%
C				
O				
Fe				

Sample

Coating Thickness (nm):	0.00
Density:	0.00

Quantitative Results

El t	Li ne	Int	Erro r	K	Kr	W %	A%	ZA F	For mul a	Ox %	Pk/ Bg	Clas s	LC onf	HC onf	Cat #
C	Ka	66.1	236.5801	0.0134	0.0124	4.45	16.10	0.2782		0.00	37.88	A	4.25	4.65	0.00
O	Ka	158.3	1413.5282	0.0326	0.0301	4.91	13.34	0.6139		0.00	44.81	A	4.77	5.05	0.00
Fe	Ka	3348.7	2.6860	0.9540	0.8812	90.64	70.56	0.9721		0.00	51.13	A	90.07	91.22	0.00
				1.0000	0.9237	100.00	100.00			0.00					0.00

Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
Fe	Ka1	3386.6	6.420	100
Al	Ka1	60.2	3.641	0

Analysis Conditions (Sample 2)

Accelerating Voltage (kV):	15.0	
Beam Current (nA):		10.000
Magnification:		25000
Live Time (s):		30
Preset Time (s)	30	
Nb Channels	1024	
Ev / Channel	20	
Offset (keV)	0	
Width (keV)	20	

Geometry

Tilt Angle (deg):	0.0
Azimuth Angle (deg):	0.0
Take Off Angle (deg):	35.0

Window

Window Type:	Moxtek AP1.3	
Window Thickness (um):		0.30
Contamination Layer (nm):		0.00

<i>Detector</i>	
Dead Layer (um)	0.10
Gold Layer (um)	20.00
Active Area (mm2)	10.00
Crystal:	Si
Crystal Thickness	3.00
Coating Type	Al
Coating Thickness (nm)	15.00

<i>XmEdsPrnFoilTitle</i>	
TEM_THICK_SAMPLE _TITLE	TEM_THICK_S AMPLE
TEM_REFERENCE_EL EMENT_TITLE	TEM_REFERE NCE_ELEMENT
TEM_THICKNESS_TIT LE	TEM_THICKNESS
TEM_DENSITY_TITLE	TEM_DENSITY

<i>Analysis</i>	
Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
χ^2	135.01

<i>Standards</i>				
Elt	Standard Name	Elements in Standard	W%	A%
C				
O				
Fe				

<i>Sample</i>	
Coating Thickness (nm):	0.00
Density:	0.00

Quantitative Results

El t	Li ne	Int	Err or	K	Kr	W %	A%	ZA F	For mul a	Ox %	Pk/ Bg	Cla ss	LC onf	HC onf	Cat #
C	K a	64.1	186. 718 3	0.01 23	0.01 14	4.11	15.0 8	0.27 74		0.00	46.5 4	A	3.92	4.29	0.00
O	K a	160. 0	496. 837 6	0.03 11	0.02 89	4.68	12.8 9	0.61 79		0.00	40.8 2	A	4.54	4.81	0.00
Fe	K a	355 7.0	2.09 41	0.95 66	0.88 83	91.2 2	72.0 3	0.97 38		0.00	51.6 8	A	90.6 6	91.7 7	0.00
				1.00 00	0.92 86	100. 00	100. 00			0.00					0.00

Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
Fe	Ka1	3577.6	6.420	100
Dy	La1	11.9	6.500	100

Analysis Conditions(Sample 3)

Accelerating Voltage (kV):	15.0	
Beam Current (nA):		10.000
Magnification:		12500
Live Time (s):		45
Preset Time (s)	45	
Nb Channels	1024	
Ev / Channel	20	
Offset (keV)	0	
Width (keV)	20	

Geometry

Tilt Angle (deg):		0.0
Azimuth Angle (deg):		0.0
Take Off Angle (deg):		35.0

Window

Window Type:	Moxtek AP1.3	
Window Thickness (um):		0.30
Contamination Layer (nm):		0.00

Detector

Dead Layer (um)	0.10	
Gold Layer (um)		20.00
Active Area (mm2)		10.00
Crystal:		Si
Crystal Thickness		3.00
Coating Type		Al
Coating Thickness (nm)		15.00

XmEdsPrnFoilTitle

TEM_THICK_SAMPLE _TITLE	TEM_THICK_S AMPLE	
TEM_REFERENCE_EL EMENT_TITLE	TEM_REFERE NCE_ELEMENT	
TEM_THICKNESS_TIT LE		TEM_THICKNESS
TEM_DENSITY_TITLE		TEM_DENSITY

Analysis

Correction Method:	PAP	
Analysis Type:	StdLess	
Number of oxygens:		0
χ^2		229.43

Standards

Elt	Standard Name	Elements in Standard	W%	A%
C				
O				
Fe				

Sample

Coating Thickness (nm):	0.00
Density:	0.00

El t	Li ne	Int	Err or	K	Kr	W %	A% F	ZA F	For mul a	Ox %	Pk/ Bg	Clas s	LC onf	HC onf	Cat #	
C	K a	34.	133	0.0	0.0	2.6	10.	0.2		0.0	28.	A	2.5	2.8	0.0	
		3	.52	079	074	9	07	761		0	74		5	3	0	
			51													
O	K a	167	871	0.0	0.0	5.7	16.	0.6		0.0	44.	A	5.6	5.8	0.0	
		.2	.68	392	368	6	20	380		0	03		3	9	0	
			33													
Fe	K a	293	3.0	0.9	0.8	91.	73.	0.9		0.0	52.	A	91.	92.	0.0	
		7.8	343	529	930	55	73	755		0	93		05	05	0	
				1.0	0.9	100	100			0.0						0.0
				000	372	.00	.00			0						0

Quantitative Results

Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
Br	La1	8.8	1.530	100
Dy	La1	14.5	6.490	2
Fe	Ka1	2949.9	6.420	2
Am	Ma1	8.4	3.370	1

ضمیمه ۲: حل شبه استاتیک

حل‌های شبه استاتیک و ناپایای ارائه شده، در محیط نرم‌افزار متلب و جهت به دست آوردن، نیروی دمپینگ ($f_{dtotalnew}$)، تنش برشی روی دیواره در هر دو ناحیه تحت میدان مغناطیسی، ($twallon$) و بدون میدان مغناطیسی ($twalloff$)، اختلاف فشار بین دو سر پیستون ($dptotalnew$) و ضخامت ناحیه پلاگ ($plug$)، انجام شده است. همچنین ورودی‌های کد مربوطه در ابتدای کد معرفی شده‌اند. ورودی و خروجی‌های حل تحلیلی ناپایا نیز مشابه حل شبه استاتیک می‌باشد با این تفاوت که در حل ناپایا با در نظر گرفتن ترم اینرسی، دستگاه سه معادله سه مجهول غیرخطی حل می‌شود. در حل میدان جریان به هر دو روش تحلیلی و شبه استاتیک، با استفاده از مختصات ناحیه پلاگ و اختلاف فشار به دست آمده از حل دستگاه سه معادله سه مجهول غیرخطی، خروجی اصلی موردنظر، پروفیل‌های سرعت ناپایا $uu(i)$ و شبه استاتیک $u(i)$ در عرض شیار می‌باشند. همچنین با استفاده از حل ناپایا ترم اینرسی ($inr(i)$) در عرض شیار و طول کورس قابل و اختلاف فاز سرعت و فشار $phaz(i)$ قابل محاسبه است.

```
rho=3500;(چگالی)
w=.5;(فرکانس)
hg=0.0015;(عرض شیار)
ys=43000;(تنش تسلیم اشباع); ys3=115;(تنش تسلیم بدون میدان)
a=.025;(دامنه نوسان)
dpvalver1=.01;(قطر ولو)
dpvalver2=.003;
dpvalvec=.005;
nn=1; rh=(0.5*rho)^(1/(1+2*nn));
yd=0;
d=0.0181;
Rave=d/2+hg/2;
dp=0.030;(قطر پیستون)
dr=0.021;(قطر میل پیستون)
mu=0.7178;(لزجت پلاستیک اشباع)
mu32=2.276; mu3=0.7178;(لزجت پلاستیک بدون میدان)
zk=10; zkk=10;
Lt=0.042;(طول پیستون)
Lactive=0.008;(طول ناحیه تحت میدان مغناطیسی)
Linactive=0.034;(طول ناحی موازی سیم پیچ)
A=.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg;(مساحت مقطع پیستون)
hb=10^-3;
P0=341538.46;
pi=3.1415926;
```

```

Q:=.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg;
A:=.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg;
Agv:=.25*pi*((dr)^2);

```

```

n:=1;

```

```

stepsize:=0.0025/(w);

```

```

for t from 0 to 0.25/(w) step stepsize do

```

```

ss:=sign(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t));
ss:=1;

```

```

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);
dpinactive(n):=ss*(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))/((12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)))+(4*(hg)^2*ss*ys3*2*pi*Rave))))*ys3*Linactive/hg)+((12*mu3*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Linactive)/(2*pi*Rave*(hg)^3));

```

```

kk:=zkk*(abs(dpinactive(n)));

```

```

dd:=((2*pi*Rave*hg^3*(dpp))/(12*mu3*Linactive))*((1-((2*Linactive*ss*ys3*((abs(dpp))^1)/hg))^2*(1+.5*((2*Linactive*ss*ys3*((abs(dpp))^1)/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);

```

```

eqs:=[dd=0];

```

```

So:=numeric::fsolve(dd, dpp=-kk..kk);

```

```

dpp1Sol := dpp | So[1];

```

```

p1(n):=dpp1Sol;
plug1(n):=2*Linactive*ys3/abs(p1(n));
Q11(n):=((2*pi*Rave*hg^3*(p1(n)))/(12*mu3*Linactive))*((1-((2*Linactive*ss*ys3*((abs(p1(n)))^1)/hg))^2*(1+.5*((2*Linactive*ss*ys3*((abs(p1(n)))^1)/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);
ypi1(n):=(hg/2)*(1-(plug1(n))/hg);
ypo2(n):=(hg/2)*(1+(plug1(n))/hg);

```

```

dpactive(n):=ss*(((2.07+(12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))/((12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)))+(4*(hg)^2*ss*ys3*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+((12*mu*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Lactive)/(2*pi*Rave*(hg)^3));

```

```

kk:=zk*(abs(dpactive(n)));

```

```

dd:=((2*pi*Rave*hg^3*(dpp))/(12*mu*Lactive))*((1-((2*Lactive*ss*ys*((abs(dpp))^1)/hg))^2*(1+.5*((2*Lactive*ss*ys*((abs(dpp))^1)/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);

```

```

eqs:=[dd=0];

```

```

So:=numeric::fsolve(dd, dpp=-kk..kk);

```

```

dppSol := dpp | So[1];

```

```

p(n):=dppSol;
plug(n):=2*Lactive*ys/abs(p(n));
Q1(n):=((2*pi*Rave*hg^3*(p(n)))/(12*mu*Lactive))*((1-((2*Lactive*ss*ys*((abs(p(n)))^1)/hg))^2*(1+.5*((2*Lactive*ss*ys*((abs(p(n)))^1)/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);
ypi(n):=(hg/2)*(1-(plug(n))/hg);

```

```

ypo(n):=(hg/2)*(1+(plug(n))/hg);
if abs(Q1(n))<hb and ypi(n)>0 and ypi(n)<hg/2 and ypo(n)>hg/2 and ypi(n)<hg and Q11(n)<hb and
ypi1(n)>0 and ypi1(n)<hg/2 and ypo2(n)>hg/2 and ypi1(n)<hg then

```

```

tt(n):=t/(1.0/w);

```

```

xx(n):=a*sin(2*pi*w*t);

```

```

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);

```

```

p(n):=dppSol;

```

```

plug(n):=2*Lactive*ys/abs(p(n));

```

```

tt(n):=t/(1.0/w);

```

```

xx(n):=a*sin(2*pi*w*t);

```

```

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);

```

```

p1(n):=dpp1Sol;

```

```

plug1(n):=2*Linactive*ys3/abs(p1(n));

```

```

gamadatong(n):=(p(n)*(2*ypi(n)-2*yd))/(2*Lactive*mu);
gamadatoffq(n):=(p1(n)*(2*ypi1(n)-2*yd))/(2*Linactive*mu3);
Fs(n):=10;

```

```

QQ(n):=0.25*(.25*(pi*dr^2)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)); QQmax:=0.25*(.25*(pi*dr^2)*a*2*pi*w);
AA2(n):=(.25*pi*((dpvalvec))^2);
Vv(n):=QQ(n)/AA2(n); Vvmax:=QQmax/AA2(n);
cd(n):=0.7;
dpvalve(n):=((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^(2)); dpvalvevmax:=((1/2)*(rho)*(Vvmax^2)*(cd(n))^(2));
Fvalve(n):=((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^(2))*Agv;
m:=2/(1+2*nn); mm:=(1+2*nn);
cp:=(AA2(n))/(dpvalvevmax)^nn;
dpv(n):=( rh*((QQ(n))/(cd(n)*cp))^(m) );
AA(n):=cp*(dpv(n))^nn;

```

```

if AA(n)<=AA2(n) then

```

```

dpv(n):=( rh*((QQ(n))/(cd(n)*cp))^(m) );

```

```

else

```

```

dpv(n):=dpvalve(n);

```

```

end;

```

```

Fv(n):=dpv(n)*Agv;

```

```

Pgasrel :=(P0*(.000065/(.000065-.25*pi*dr^2*a*sin(2*pi*w*t)))^1.3)-10^5;
Fgasrel :=((P0*(.000065/(.000065-.25*pi*dr^2*a*sin(2*pi*w*t)))^1.3)-10^5)*((Agv));

```

```

ff(n):=ss*Fs(n);

```

```

F3 := Fgasrel +Fv(n) +ss*Fs(n) ;

```

```

F4(n):=((ss*ys+mu*gamadatong(n))*2*pi*2*Rave*Lactive+(ss*ys3+mu3*gamadatoffq(n))*2*pi*2*Rave*
Linactive);
twallon(n):=(ss*ys+mu*gamadatong(n)); twalloff(n):=(ss*ys3+mu3*gamadatoffq(n));
fdtotalformulnew(n):=A*(ss*(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))/(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos
(2*pi*w*t))+.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+ss*(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi
*w*t))/(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))+.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys3*Linactive/hg)+((12
*mu3*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt)/(2*pi*Rave*(hg)^3))+F3 ;
fdtotalformul(n):=A*(ss*(((2.07+(12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))/(12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(
2*pi*w*t))+.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+((12*mu32*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt)/(
2*pi*Rave*(hg)^3))+F3 ;
fdtotalsimniotoni(n) := A*((p(n))+
(mu32*((12*A*Linactive)/(2*pi*Rave*hg^3))*(vp(n)*Q+vp(n)*2*pi*Rave*hg)))+F3+F4(n);
fdtotalnew(n):= A*((p(n))+ (p1(n)))+F3+F4(n);
fdtotalnew0(n):= A*((p(n))+ (p1(n)))+F3;
dpttotalformul(n):=(ss*(((2.07+(12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))/(12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*
pi*w*t))+.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+((12*mu32*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt)/(2*
pi*Rave*(hg)^3)) ;
dpttotalsimniotoni(n) := ((p(n))+
(mu32*((12*A*Linactive)/(2*pi*Rave*hg^3))*(vp(n)*Q+vp(n)*2*pi*Rave*hg)));
dpttotalnew(n):= ((p(n))+ (p1(n)));

n:=n+1; end_if;
end_for;

n:=n;

for t from 0.25/(w) to 0.75/(w) step stepsize do

ss:=1;

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);
dpinactive(n):=ss*(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))/(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0
)))+.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys3*Linactive/hg)+((12*mu3*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Linactive)/
(2*pi*Rave*(hg)^3)) ;

kk:=zkk*(abs(dpinactive(n)));

dd:=((2*pi*Rave*hg^3*(dpp))/(12*mu3*Linactive))*((1-((2*Linactive*ss*ys3*((abs(dpp))^(-
1))/hg))^2*(1+.5*((2*Linactive*ss*ys3*((abs(dpp))^(-1))/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);

eqs:=[dd=0];

So:=numeric::fsolve(dd, dpp=-kk..kk);

dpp1Sol := dpp | So[1];

p1(n):=dpp1Sol;
plug1(n):=2*Linactive*ys3/abs(p1(n));
Q11(n):=((2*pi*Rave*hg^3*(p1(n)))/(12*mu3*Linactive))*((1-((2*Linactive*ss*ys3*((abs(p1(n)))^(-
1))/hg))^2*(1+.5*((2*Linactive*ss*ys3*((abs(p1(n)))^(-1))/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);
ypi1(n):=(hg/2)*(1-(plug1(n))/hg);
ypo2(n):=(hg/2)*(1+(plug1(n))/hg);

dpactive(n):=ss*(((2.07+(12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))/(12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))+.
4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+((12*mu*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Lactive)/(2*pi*Rave
*(hg)^3)) ;

kk:=zk*(abs(dpactive(n)));

```

```

dd:=((2*pi*Rave*hg^3*(dpp))/(12*mu*Lactive))*((1-((2*Lactive*ss*ys*((abs(dpp))^1)/hg))^2*(1+.5*((2*Lactive*ss*ys*((abs(dpp))^1)/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n));

eqs:=[dd=0];

So:=numeric::fsolve(dd, dpp=-kk..kk);

dppSol := dpp | So[1];

p(n):=dppSol;
plug(n):=2*Lactive*ys/abs(p(n));
Q1(n):=((2*pi*Rave*hg^3*(p(n)))/(12*mu*Lactive))*((1-((2*Lactive*ss*ys*((abs(p(n)))^1)/hg))^2*(1+.5*((2*Lactive*ss*ys*((abs(p(n)))^1)/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n));
ypi(n):=(hg/2)*(1-(plug(n))/hg);
ypo(n):=(hg/2)*(1+(plug(n))/hg);
if abs(Q1(n))<hb and ypi(n)>0 and ypi(n)<hg/2 and ypo(n)>hg/2 and ypi(n)<hg and Q1(n)<hb and ypi1(n)>0 and ypi1(n)<hg/2 and ypo2(n)>hg/2 and ypi1(n)<hg then

tt(n):=t/(1.0/w);

xx(n):=a*sin(2*pi*w*t);

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);

p(n):=dppSol;

plug(n):=2*Lactive*ys/abs(p(n));

tt(n):=t/(1.0/w);

xx(n):=a*sin(2*pi*w*t);

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);

p1(n):=dpp1Sol;

plug1(n):=2*Linactive*ys3/abs(p1(n));

gamadatongq(n):=(p(n) *(2*ypi(n) - 2*yd))/(2*Lactive*mu);
gamatatoqq(n):=(p1(n) *(2*ypi1(n) - 2*yd))/(2*Linactive*mu3);
Fs(n) :=10;

QQ(n):=.25*(.25*(pi*dr^2)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t));QQmax:=0.25*(.25*(pi*dr^2)*a*2*pi*w);
AA2(n):=(dpvalver2*dpvalver1);
Vv(n):=QQ(n)/AA2(n);Vvmax:=QQmax/AA2(n);
cd(n):=0.7;

dpvalve(n):=-((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^2);dpvalvevmax:=(((1/2)*(rho)*(Vvmax^2)*(cd(n))^2);
Fvalve(n):=(((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^2)*Agy;

m:=2/(1+2*nn);mm:=(1+2*nn);
cp:=(AA2(n))/(dpvalvevmax)^nn;
dpv(n):=( rh*( abs(QQ(n))/(cd(n)*cp) )^(m) );

AA(n):=cp*(dpv(n))^nn;

```

if AA(n)<=AA2(n) then

dpv(n):=-(rh*(abs(QQ(n))/(cd(n)*cp))^(m));

else

dpv(n):=dpvalve(n);

end;

Fv(n):=dpv(n)*Agv;

Pgasrel :=(P0*(.000065/(.000065-.25*pi*dr^2*a*sin(2*pi*w*t)))^1.3)-10^5;

Fgasrel :=((P0*(.000065/(.000065-.25*pi*dr^2*a*sin(2*pi*w*t)))^1.3)-10^5)*((Agv));

ss:= sign(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t));

ff(n):=ss*Fs(n);

F3 := Fgasrel +Fv(n) +ss*Fs(n) ;

F4(n):=((ss*ys+mu*gamadatonq(n))*2*pi*2*Rave*Lactive+(ss*ys3+mu3*gamadatoffq(n))*2*pi*2*Rave*Linactive);

twallon(n):=(ss*ys+mu*gamadatonq(n)); twalloff(n):=(ss*ys3+mu3*gamadatoffq(n));

fdtotalformulnew(n):=A*(ss*(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))/((12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))+(.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+ss*(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))/((12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))+(.4*(hg)^2*ss*ys3*2*pi*Rave))))*ys3*Linactive/hg)+((12*mu3*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt)/(2*pi*Rave*(hg)^3))+F3 ;

fdtotalformul(n):=A*(ss*(((2.07+(12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))/((12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))+(.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+((12*mu32*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt)/(2*pi*Rave*(hg)^3))+F3 ;

fdtotalsimniotoni(n) := A*((p(n))+

(mu32*((12*A*Linactive)/(2*pi*Rave*hg^3))*(vp(n)*Q+vp(n)*2*pi*Rave*hg))+F3+F4(n);

fdtotalnew(n):= A*((p(n))+ (p1(n)))+F3+F4(n);

fdtotalnew0(n):= A*((p(n))+ (p1(n)))+F3;

dptotalformul(n):=(ss*(((2.07+(12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))/((12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))+(.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+((12*mu32*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt)/(2*pi*Rave*(hg)^3))) ;

dptotalsimniotoni(n) := ((p(n))+

(mu32*((12*A*Linactive)/(2*pi*Rave*hg^3))*(vp(n)*Q+vp(n)*2*pi*Rave*hg)));

dptotalnew(n):= ((p(n))+ (p1(n)));

n:=n+1;end_if;

end_for;

n:=n;

for t from 0.75/(w) to 1.0/(w) step stepsize do

ss:= sign(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t));

ss:=1;

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);

dpinactive(n):=ss*(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))/((12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))+(.4*(hg)^2*ss*ys3*2*pi*Rave))))*ys3*Linactive/hg)+((12*mu3*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Linactive)/(2*pi*Rave*(hg)^3)) ;

kk:=zkk*(abs(dpinactive(n)));

```

dd:=((2*pi*Rave*hg^3*(dpp))/(12*mu3*Linactive))*((1-((2*Linactive*ss*ys3*((abs(dpp))^1)/hg))^2*(1+.5*((2*Linactive*ss*ys3*((abs(dpp))^1)/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);

eqs:=[dd=0];

So:=numeric::fsolve(dd, dpp=-kk..kk);

dpp1Sol := dpp | So[1];

p1(n):=dpp1Sol;
plug1(n):=2*Linactive*ys3/abs(p1(n));
Q11(n):=((2*pi*Rave*hg^3*(p1(n)))/(12*mu3*Linactive))*((1-((2*Linactive*ss*ys3*((abs(p1(n)))^1)/hg))^2*(1+.5*((2*Linactive*ss*ys3*((abs(p1(n)))^1)/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);
ypi1(n):=(hg/2)*(1-(plug1(n))/hg);
ypo2(n):=(hg/2)*(1+(plug1(n))/hg);

dpactive(n):=ss*(((2.07+(12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))/((12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))+(.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+((12*mu*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Lactive)/(2*pi*Rave*(hg)^3)) ;

kk:=zk*(abs(dpactive(n)));

dd:=((2*pi*Rave*hg^3*(dpp))/(12*mu*Lactive))*((1-((2*Lactive*ss*ys*((abs(dpp))^1)/hg))^2*(1+.5*((2*Lactive*ss*ys*((abs(dpp))^1)/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);

eqs:=[dd=0];

So:=numeric::fsolve(dd, dpp=-kk..kk);

dppSol := dpp | So[1];

p(n):=dppSol;
plug(n):=2*Lactive*ys/abs(p(n));
Q1(n):=((2*pi*Rave*hg^3*(p(n)))/(12*mu*Lactive))*((1-((2*Lactive*ss*ys*((abs(p(n)))^1)/hg))^2*(1+.5*((2*Lactive*ss*ys*((abs(p(n)))^1)/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);
ypi(n):=(hg/2)*(1-(plug(n))/hg);
ypo(n):=(hg/2)*(1+(plug(n))/hg);
if abs(Q1(n))<hb and ypi(n)>0 and ypi(n)<hg/2 and ypo(n)>hg/2 and ypi(n)<hg and Q11(n)<hb and ypi1(n)>0 and ypi1(n)<hg/2 and ypo2(n)>hg/2 and ypi1(n)<hg then

tt(n):=t/(1.0/w);

xx(n):=a*sin(2*pi*w*t);

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);

p(n):=dppSol;

plug(n):=2*Lactive*ys/abs(p(n));

tt(n):=t/(1.0/w);

xx(n):=a*sin(2*pi*w*t);

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);

p1(n):=dpp1Sol;

plug1(n):=2*Linactive*ys3/abs(p1(n));

```

```

gamadatonq(n):=(p(n) *(2*ypi(n) - 2*yd))/(2*Lactive*mu);
gamadatoffq(n):=(p1(n) *(2*ypi1(n) - 2*yd))/(2*Linactive*mu3);

Fs(n) :=10;

QQ(n):=0.25*(.25*(pi*dr^2)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t));QQmax:=0.25*(.25*(pi*dr^2)*a*2*pi*w);
AA2(n):=(.25*pi*((dpvalvec))^2);
Vv(n):=QQ(n)/AA2(n);Vvmax:=QQmax/AA2(n);
cd(n):=0.7;

dpvalve(n):=((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^-2);dpvalvevmax:=((1/2)*(rho)*(Vvmax^2)*(cd(n))^-2);
Fvalve(n):((((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^-2))*Agv;
m:=2/(1+2*nn);mm:=(1+2*nn);
cp:=(AA2(n))/(dpvalvevmax)^nn;

dpv(n):=( rh*( abs(QQ(n))/(cd(n)*cp) )^(m) );

AA(n):=cp*(dpv(n))^nn;

if AA(n)<=AA2(n) then

dpv(n):=( rh*( abs(QQ(n))/(cd(n)*cp) )^(m) );

else
dpv(n):=dpvalve(n);

end;

Fv(n):=dpv(n)*Agv;

Pgasrel :=(P0*(.000065/(.000065-.25*pi*dr^2*a*sin(2*pi*w*t)))^1.3)-10^5;
Fgasrel :=((((P0*(.000065/(.000065-.25*pi*dr^2*a*sin(2*pi*w*t)))^1.3)-10^5)*((Agv)));
ff(n):=ss*Fs(n);
F3 := Fgasrel +Fv(n) +ss*Fs(n)
;F4(n):=((ss*ys+mu*gamadatonq(n))*2*pi*2*Rave*Lactive+(ss*ys3+mu3*gamadatoffq(n))*2*pi*2*Rave
*Linactive);
twallon(n):=(ss*ys+mu*gamadatonq(n)); twalloff(n):=(ss*ys3+mu3*gamadatoffq(n));
fdtotalformulnew(n):=A*(ss*(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)))/((12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos
(2*pi*w*t))+(.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+ss*(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi
*w*t)))/((12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))+(.4*(hg)^2*ss*ys3*2*pi*Rave))))*ys3*Linactive/hg)+((12
*mu3*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt)/(2*pi*Rave*(hg^3)))+F3 ;
fdtotalformul(n):=A*(ss*(((2.07+(12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)))/((12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(
2*pi*w*t))+(.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+((12*mu32*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt)/(
2*pi*Rave*(hg^3)))+F3 ;
fdtotalsimnotoni(n) := A*((p(n))+
(mu32*((12*A*Linactive)/(2*pi*Rave*hg^3))*(vp(n)*Q+vp(n)*2*pi*Rave*hg)))+F3+F4(n);
fdtotalnew(n):= A*((p(n))+ (p1(n)))+F3+F4(n);
fdtotalnew0(n):= A*((p(n))+ (p1(n)))+F3;
dptotalformul(n):=(ss*(((2.07+(12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)))/((12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*
pi*w*t))+(.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+((12*mu32*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt)/(2*
pi*Rave*(hg^3))) ;
dptotalsimnotoni(n) := ((p(n))+
(mu32*((12*A*Linactive)/(2*pi*Rave*hg^3))*(vp(n)*Q+vp(n)*2*pi*Rave*hg)));
dptotalnew(n):= ((p(n))+ (p1(n)));

n:=n+1;end_if;

end_for:

```

```

t:=1.0/w;
ss:= sign(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t));
ss:=1;

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);
dpinactive(n):=ss*(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))/((12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)))+(4*(hg)^2*ss*ys3*2*pi*Rave))))*ys3*Linactive/hg)+((12*mu3*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Linactive)/(2*pi*Rave*(hg)^3)) ;

kk:=zkk*(abs(dpinactive(n)));

dd:=((2*pi*Rave*hg^3*(dpp))/(12*mu3*Linactive))*((1-((2*Linactive*ss*ys3*((abs(dpp))^1)/hg))^2*(1+.5*((2*Linactive*ss*ys3*((abs(dpp))^1)/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);

eqs:=[dd=0];

So:=numeric::fsolve(dd, dpp=-kk..kk);

dpp1Sol := dpp | So[1];

p1(n):=dpp1Sol;
plug1(n):=2*Linactive*ys3/abs(p1(n));
Q11(n):=((2*pi*Rave*hg^3*(p1(n)))/(12*mu3*Linactive))*((1-((2*Linactive*ss*ys3*((abs(p1(n)))^1)/hg))^2*(1+.5*((2*Linactive*ss*ys3*((abs(p1(n)))^1)/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);
ypi1(n):=(hg/2)*(1-(plug1(n))/hg);
ypo2(n):=(hg/2)*(1+(plug1(n))/hg);

dpactive(n):=ss*(((2.07+(12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))/((12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)))+(4*(hg)^2*ss*ys3*2*pi*Rave))))*ys3*Lactive/hg)+((12*mu*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Lactive)/(2*pi*Rave*(hg)^3)) ;

kk:=zk*(abs(dpactive(n)));

dd:=((2*pi*Rave*hg^3*(dpp))/(12*mu*Lactive))*((1-((2*Lactive*ss*ys3*((abs(dpp))^1)/hg))^2*(1+.5*((2*Lactive*ss*ys3*((abs(dpp))^1)/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);

eqs:=[dd=0];

So:=numeric::fsolve(dd, dpp=-kk..kk);

dppSol := dpp | So[1];

p(n):=dppSol;
plug(n):=2*Lactive*ys/abs(p(n));
Q1(n):=((2*pi*Rave*hg^3*(p(n)))/(12*mu*Lactive))*((1-((2*Lactive*ss*ys3*((abs(p(n)))^1)/hg))^2*(1+.5*((2*Lactive*ss*ys3*((abs(p(n)))^1)/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);
ypi(n):=(hg/2)*(1-(plug(n))/hg);
ypo(n):=(hg/2)*(1+(plug(n))/hg);
if abs(Q1(n))<hb and ypi(n)>0 and ypi(n)<hg/2 and ypo(n)>hg/2 and ypi(n)<hg and Q11(n)<hb and ypi1(n)>0 and ypi1(n)<hg/2 and ypo2(n)>hg/2 and ypi1(n)<hg then

tt(n):=t/(1.0/w);

xx(n):=a*sin(2*pi*w*t);

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);

p(n):=dppSol;

```

```

plug(n):=2*Lactive*ys/abs(p(n));

tt(n):=t/(1.0/w);

xx(n):=a*sin(2*pi*w*t);

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);

p1(n):=dpp1Sol;

plug1(n):=2*Linactive*ys3/abs(p1(n));

gamadatonq(n):=(p(n) *(2*ypi(n) - 2*yd))/(2*Lactive*mu);
gamadatoffq(n):=(p1(n) *(2*ypi1(n) - 2*yd))/(2*Linactive*mu3);

Fs(n) :=10;

QQ(n):=0.25*(.25*(pi*dr^2)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t));QQmax:=0.25*(.25*(pi*dr^2)*a*2*pi*w);
AA2(n):=(.25*pi*((dpvalvec))^2);
Vv(n):=QQ(n)/AA2(n);Vvmax:=QQmax/AA2(n);
cd(n):=0.7;
dpvalve(n):=((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^-2);dpvalvevmax:=((1/2)*(rho)*(Vvmax^2)*(cd(n))^-2);
Fvalve(n):((((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^-2))*Agv;
m:=2/(1+2*nn); mm:=(1+2*nn);
cp:=(AA2(n))/(dpvalvevmax)^nn;
dpv(n):=( rh*( (QQ(n))/(cd(n)*cp) )^(m) );
AA(n):=cp*(dpv(n))^nn;

if AA(n)<=AA2(n) then

dpv(n):=( rh*( (QQ(n))/(cd(n)*cp) )^(m) );

else
dpv(n):=dpvalve(n);

end;

Fv(n):=dpv(n)*Agv;

Pgasrel :=(P0*(.000065/(.000065-.25*pi*dr^2*a*sin(2*pi*w*t)))^1.3)-10^5;
Fgasrel :=(((P0*(.000065/(.000065-.25*pi*dr^2*a*sin(2*pi*w*t)))^1.3)-10^5)*((Agv)));

F3 := Fgasrel(n) +Fv(n) +ss*Fs(n) ;
F4(n):=ss*((ss*ys+mu*gamadatonq(n))*2*pi*2*Rave*Lactive+(ss*ys3+mu3*gamadatoffq(n))*2*pi*2*Ra
ve*Linactive);

fdg(n) :=real(rho*Lactive* (zz(n) )*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t)) ;
fdtotalsimniotoni(n):=A*(real(rho*Lactive* (zz(n) )*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive*
(pSol)*exp(I*2*pi*w*t)))+F3+F4(n);
fdtotalnew(n):=A*(real(rho*Lactive* (zz(n) )*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (zz1(n)
)*exp(I*2*pi*w*t)))+F3+F4(n);

ff(n):=ss*Fs(n);
F3 := Fgasrel +Fv(n) +ss*Fs(n) ;
F4(n):=((ss*ys+mu*gamadatonq(n))*2*pi*2*Rave*Lactive+(ss*ys3+mu3*gamadatoffq(n))*2*pi*2*Rave*
Linactive);
twallon(n):=(ss*ys+mu*gamadatonq(n)); twalloff(n):=(ss*ys3+mu3*gamadatoffq(n));
fdtotalformulnew(n):=A*(ss*(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)))/(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*co
s(2*pi*w*t)))+(4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+ss*(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi

```

```

*w*t))/((12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))+(.4*(hg)^2*ss*ys3*2*pi*Rave))))*ys3*Linactive/hg)+((12
*mu3*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt)/(2*pi*Rave*(hg)^3))+F3 ;
fdtotalformul(n):=A*(ss*(((2.07+(12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))/((12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(
2*pi*w*t))+(.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+((12*mu32*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt)/(
2*pi*Rave*(hg)^3))+F3 ;
fdtotalsimniotoni(n) := A*((p(n))+
(mu32*((12*A*Linactive)/(2*pi*Rave*hg^3))*(vp(n)*Q+vp(n)*2*pi*Rave*hg)))+F3+F4(n);
fdtotalnew(n):= A*((p(n))+ (p1(n)))+F3+F4(n);
fdtotalnew0(n):= A*((p(n))+ (p1(n)))+F3;
dptotalformul(n):=(ss*(((2.07+(12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))/((12*mu32*(Q)*a*2*pi*w*cos(2
pi*w*t))+(.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+((12*mu32*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt)/(2*
pi*Rave*(hg)^3))) ;
dptotalsimniotoni(n) := ((p(n))+
(mu32*((12*A*Linactive)/(2*pi*Rave*hg^3))*(vp(n)*Q+vp(n)*2*pi*Rave*hg)));
dptotalnew(n):= ((p(n))+ (p1(n)));

```

```

end_if;

```

```

print("##### t
#####");
print("t= ");
A := matrix(1, n);
for i from 0 to n do A[1, i]:=tt(i): end_for:
print(A);

```

```

print("##### xx
#####");
print("xx= ");
A := matrix(1, n);
for i from 0 to n do A[1, i]:=xx(i): end_for:
print(A);
print("##### vp
#####");
print("vp= ");
A := matrix(1, n);
for i from 0 to n do A[1, i]:=vp(i): end_for:
print(A);
print("##### twallon#####");
print( Unquoted,"(twallon)= ");

```

```

for i from 1 to n do A[1, i]:=twallon(i): end_for:
print(A);
print("##### twalloff#####");
print( Unquoted,"(twallon)= ");

```

```

for i from 1 to n do A[1, i]:=twalloff(i): end_for:
print(A);print("##### fdwalltotal
#####");
print( Unquoted,"(fdwalltotal)= ");

```

```

for i from 1 to n do A[1, i]:=F4(i): end_for:
print(A); print("##### fdtotalnew
#####");
print( Unquoted,"(fdt)= ");

```

```

for i from 1 to n do A[1, i]:=-fdtotalnew(i): end_for:

```

```

print(A);print("#####
fdtotalformul#####");
print( Unquoted,"(fdtformul)= ");

for i from 1 to n do A[1, i]:=-fdtotalformul(i): end_for:
print(A); print("#####
fdtotalformulnew#####");
print( Unquoted,"(fdtformulnew)= ");

for i from 1 to n do A[1, i]:=-fdtotalformulnew(i): end_for:
print(A);print("##### fdttotalnew0
#####");
print( Unquoted,"(fdt)= ");

for i from 1 to n do A[1, i]:=-fdtotalnew0(i): end_for:
print(A); print("##### dpttotalnew
#####");
print( Unquoted,"(dpt)= ");

for i from 1 to n do A[1, i]:=-dpttotalnew(i): end_for:
print(A);      print("##### dpactive
#####");
print( Unquoted,"(dpt)= ");

for i from 1 to n do A[1, i]:=-p(i): end_for:
print(A); print("##### plug(n)
#####");
print("plug= ");
A := matrix(1, n):
for i from 0 to n do A[1, i]:=plug(i)/hg: end_for:
print(A); print("##### ff(n)
#####");
print("ff= ");
A := matrix(1, n):
for i from 0 to n do A[1, i]:=ff(i): end_for:
print(A);

```

ضمیمه ۳: حل میدان سرعت شبه استاتیکی

```
rho:=3500;  
w:=0.5;  
hg:=0.0015;  
ys:=60440;  
a:=.025;  
t:=1/(5*w);  
dpvalver1:=.01;  
dpvalver2:=.003;  
dpvalvec:=0.005;  
rh:=7.6059049215227832370934709476974;
```

```
d:=0.0181;  
Rave:=d/2+hg/2;  
dp:=0.03;  
dr:=0.021;  
mu:=7.1;
```

```
zk:=1;  
Lt:=.042;  
Lactive:=0.008;  
Linactive:=0.034;  
hb:=10^-8;  
P0:=341538.46;  
pi:=3.1415926535897932384626433832795;  
Q:=.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg;  
A:=.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg;  
Agv:=.25*pi*((dr)^2);
```

```
n:=1;
```

```
stepsize:=hg/200;
```

```
ss:= sign(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t));  
ss:=1;
```

```
vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);
```

```
dpactive(n):=ss*(((2.07+(12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)))/((12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)))+(.
```

```
4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+((12*mu*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Lactive)/(2*pi*Rave
*(hg)^3)) ;
```

```
kk:=zk*(abs(dpactive(n)));
```

```
dd:=((2*pi*Rave*hg^3*(dpp))/(12*mu*Lactive))*((1-((2*Lactive*ss*ys*((abs(dpp))^-
1))/hg))^2*(1+.5*((2*Lactive*ss*ys*((abs(dpp))^-1))/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);
```

```
eqs:=[dd=0];
```

```
So:=numeric::fsolve(dd, dpp=-kk..kk);
```

```
dppSol := dpp | So[1];
```

```
p(n):=dppSol;
```

```
plug(n):=2*Lactive*ys/abs(p(n));
```

```
Q1(n):=((2*pi*Rave*hg^3*(p(n)))/(12*mu*Lactive))*((1-((2*Lactive*ss*ys*((abs(p(n)))^-
1))/hg))^2*(1+.5*((2*Lactive*ss*ys*((abs(p(n)))^-1))/hg))+(-vp(n)*hg*2*pi*Rave)-Q*vp(n);
```

```
ypi(n):=(hg/2)*(1-(plug(n))/hg);
```

```
ypo(n):=(hg/2)*(1+(plug(n))/hg);
```

```
x1:=ypi(n); x2:=ypo(n); x3:=p(n);
```

```
for y from 0 to real(x1) step stepsize do
```

```
  vpp:=vp(n);
```

```
  by(n):=y;
```

```
  u(n):=-(x3/(2*mu*Lactive))*(y^2-2*x1*y)-a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);
```

```
  n:=n+1;
```

```
end_for:
```

```
for y from real(x1) to real(x2) step stepsize do
```

```
  by(n):=y;
```

```
  u(n):=-(x3/(2*mu*Lactive))*(x1^2-2*x1*x1)-a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);
```

```
  n:=n+1;
```

```
end_for:
```

```
for y from real(x2) to real(hg) step stepsize do
```

```
  by(n):=y;
```

```
  u(n):=-(x3/(2*mu*Lactive))*(y^2-hg^2+2*x2*(hg-y))-a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);
```

```
  n:=n+1;
```

```
end_for: y:=hg; by(n):=y; u(n):=-(x3/(2*mu*Lactive))*(y^2-hg^2+2*x2*(hg-y))-
```

```
a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t); A := matrix(1, n):
```

```
print("##### abs z
```

```
#####");
print( Unquoted,"(U)= ");
for i from 1 to n do A[1,i]:=u(i): end_for- print(A);

print("##### phaz z
#####");
print( Unquoted,"(y)= ");

for i from 1 to n do A[1,i]:=by(i)/hg: end_for- print(A); print(x1,x2,x3);
```

```

rho:=3500;
w:=.5;
hg:=0.0015;
ys:=60440;ys3:=1488;
a:=.025;
dpvalver1:=.01;
dpvalver2:=.003;
dpvalvec:=0.005;
nn:=1; rh:=(0.5*rho)^(1/(1+2*nn));
yd:=0;
d:=0.0181;
Rave:=d/2+hg/2;
dp:=0.030;
dr:=0.021;

mu:=7.1;
mu323:=2.276; mu3:=0.7178; zk3:=1.5;
zk:=4; zkk:=4;
Lt:=0.042;
Lactive:=0.008;
Linactive:=0.034;
hb:=10^-3;hb3:=10^-3;
P0:=341538.46;
pi:=3.1415926;
Q:=.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-(2*pi*Rave*hg);
A:=.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-(2*pi*Rave*hg);
Agv:=.25*pi*((dr)^2);

va:=.000065;
n:=1;

stepsize:=0.0025/(w);

for t from 0 to 0.25/(w) step stepsize do
ss:= sign(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)); vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t); if vp(n)=0 then
ss:=sign(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*(t-10*stepsize)))end_if;
dpn:=((12*mu323*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Lt*(A))/(2*pi*Rave*(hg)^3));
b:=numeric::fsolve((2*pi*Rave*((p)/(I*(2*pi*w)))*(hg) + (((a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w)))-
((((a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w))))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))))))*(exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg)) -
1)/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))) - (((((a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w))))*(1-

```

exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))))*(1/exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg))-1)/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))-(a)*(2*pi*w)*(.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg),p=dpn);

pSol := p | b[1];

QN(n):=(2*pi*Rave*((pSol)/(I*(2*pi*w)))*(hg) + ((-(a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))-(((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w))))*(1-exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))))*(exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg)) - 1))/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))) - (((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w))))*(1-exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))))*(1/exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg))-1))/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))-(a)*(2*pi*w)*(.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg));

pp(n):=pSol;

tt(n):=t;

xx(n):= a*sin(2*pi*w*t);

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);

ap(n):=-a*(2*pi*w)^2*sin(2*pi*w*t);

dpinactive(n):=ss(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))/((12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)))+(4*(hg)^2*ss*ys3*2*pi*Rave)))*ys3*Linactive/hg)+((12*mu3*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Linactive)/(2*pi*Rave*(hg)^3)) ;

kk:=zkk*(abs(dpinactive(n))/(rho*Linactive)+(abs(dpinactive(n))/(rho*Linactive))*I);

S:=numeric::fsolve([2*(pi)*Rave*((((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho))))+1)))*(exp((sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho))))*y1) - 1))/(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))) - (((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho))))+1)))*(exp(-(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho))))*y1) - 1))/(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))) + (y1*z)/(I*(2*(pi)*w)*I)) + (-y1 - y2)*((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho))))+1)))*exp((sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho))))*y1) + (-((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho))))+1)))*exp(-(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho))))*y1) + z/(I*(2*(pi)*w)*I)) + (((exp(-2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))))-2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))))+exp(-hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))))))*(exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))) - exp((sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho))))*y2))/(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))) - ((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))))-2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))))+exp(-hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))))))*(exp(-

$$\begin{aligned} & \text{hg} * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) - \exp(- \\ & (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) * y_2)) / (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + (z * (\text{hg} - y_2)) / ((2 * (\pi) * w) * I)) \\ & - (a) * (2 * (\pi) * w) * (.25 * \pi * ((dp)^2 - (dr)^2) - 2 * \pi * \text{Rave} * \text{hg}) , \quad (((\exp(- \\ & 2 * y_1 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) * (-((a) * (2 * (\pi) * w) + z / (I * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(- \\ & 2 * y_1 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + 1))) * \exp(y_1 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) + (- \\ & ((a) * (2 * (\pi) * w) + z / (I * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(-2 * y_1 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + 1))) * \exp(- \\ & y_1 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + z / (I * (2 * (\pi) * w)))) - (((\exp(- \\ & 2 * y_2 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) * (- \\ & ((a) * (2 * (\pi) * w) + z / (I * (2 * (\pi) * w))) / (\exp((\text{hg} * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) - \\ & 2 * y_2 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + \exp(- \\ & (\text{hg} * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) * \exp(y_2 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + (- \\ & ((a) * (2 * (\pi) * w) + z / (I * (2 * (\pi) * w))) / (\exp((\text{hg} * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) - \\ & 2 * y_2 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + \exp(-(\text{hg} * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) * \exp(- \\ & y_2 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + z / (I * (2 * (\pi) * w)))) , \quad (y_2 - y_1) - \\ & 2 * y_3 * \text{sign}(\cos(2 * (\pi) * (w) * t)) / (\rho * z * \exp(I * (2 * (\pi) * w) * t) - \rho * I * (2 * (\pi) * w) * \exp(I * (2 * (\pi) * w) * t) \\ & * (((\exp(-2 * y_1 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) * (-((a) * (2 * (\pi) * w) + z / (I * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(- \\ & 2 * y_1 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + 1))) * \exp(y_1 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + (- \\ & ((a) * (2 * (\pi) * w) + z / (I * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(-2 * y_1 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + 1))) * \exp(- \\ & y_1 * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + z / (I * (2 * (\pi) * w))))], [y_1 = 0..hg, y_2 = 0..hg, z = - \\ & \text{kk}..\text{kk}], \text{UnrestrictedSearch}; \end{aligned}$$

y11Sol := y1 | S[1];

y22Sol := y2 | S[2];

z1Sol := z | S[3]; oo1(n):=z1Sol*rho;

$$\begin{aligned} \text{QN}(n) &:= 2 * \pi * \text{Rave} * ((pSol) / (1 * (2 * \pi * w)) * (\text{hg}) + ((-(a) * (2 * \pi * w) + (pSol) / (1 * (2 * \pi * w))) - \\ & (((a) * (2 * \pi * w) + (pSol) / (1 * (2 * \pi * w))) * (1 - \\ & \exp((\text{hg} * (\text{sqrt}(1 * (2 * \pi * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) / (\exp((\text{hg} * (\text{sqrt}(1 * (2 * \pi * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) - \exp(- \\ & (\text{hg} * (\text{sqrt}(1 * (2 * \pi * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) * (\exp((\text{sqrt}(1 * (2 * \pi * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) * (\text{hg}) - \\ & 1) / (\text{sqrt}(1 * (2 * \pi * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) - (((a) * (2 * \pi * w) + (pSol) / (1 * (2 * \pi * w))) * (1 - \\ & \exp((\text{hg} * (\text{sqrt}(1 * (2 * \pi * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) / (\exp((\text{hg} * (\text{sqrt}(1 * (2 * \pi * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) - \exp(- \\ & (\text{hg} * (\text{sqrt}(1 * (2 * \pi * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) * (1 / \exp((\text{sqrt}(1 * (2 * \pi * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) * (\text{hg}) - \\ & 1) / (\text{sqrt}(1 * (2 * \pi * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) - (a) * (2 * \pi * w) * ((Q)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Qinactive1} &:= 2 * (\pi) * \text{Rave} * (\\ & (((\exp(-2 * y_{11}\text{Sol} * (\text{sqrt}(1 * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) * (- \\ & ((a) * (2 * (\pi) * w) + z_{11}\text{Sol} / (1 * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(- \\ & 2 * y_{11}\text{Sol} * (\text{sqrt}(1 * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + 1))) * (\exp((\text{sqrt}(1 * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) * y_{11}\text{Sol}) - \\ & 1) / (\text{sqrt}(1 * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) - ((-(a) * (2 * (\pi) * w) + z_{11}\text{Sol} / (1 * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(- \\ & 2 * y_{11}\text{Sol} * (\text{sqrt}(1 * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + 1))) * (\exp(-(\text{sqrt}(1 * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) * y_{11}\text{Sol}) - \\ & 1) / (\text{sqrt}(1 * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + (y_{11}\text{Sol} * z_{11}\text{Sol}) / ((2 * (\pi) * w) * 1)) + (- (y_{11}\text{Sol} - y_{22}\text{Sol}) * (((\exp(- \\ & 2 * y_{11}\text{Sol} * (\text{sqrt}(1 * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) * (-((a) * (2 * (\pi) * w) + z_{11}\text{Sol} / (1 * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(- \\ & 2 * y_{11}\text{Sol} * (\text{sqrt}(1 * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + 1))) * \exp((\text{sqrt}(1 * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) * y_{11}\text{Sol}) + (- \\ & ((a) * (2 * (\pi) * w) + z_{11}\text{Sol} / (1 * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(-2 * y_{11}\text{Sol} * (\text{sqrt}(1 * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) + 1))) * \exp(- \\ & (\text{sqrt}(1 * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))) * y_{11}\text{Sol}) + z_{11}\text{Sol} / ((2 * (\pi) * w) * 1))) + (((\exp(- \\ & 2 * y_{22}\text{Sol} * (\text{sqrt}(1 * ((2 * (\pi) * w)) / ((\mu_3 / \rho)))))) * (- \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & ((a)^{(2*(\pi)*w)} + z1Sol/(1i^{(2*(\pi)*w)})) / (\exp(hg*(\sqrt{1i^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) - \\ & 2*y22Sol*(\sqrt{1i^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) + \exp(- \\ & hg*(\sqrt{1i^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) * (\exp(hg*(\sqrt{1i^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) - \\ & \exp((\sqrt{1i^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) * y22Sol)) / (\sqrt{1i^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho))) - ((- \\ & ((a)^{(2*(\pi)*w)} + z1Sol/(1i^{(2*(\pi)*w)})) / (\exp(hg*(\sqrt{1i^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) - \\ & 2*y22Sol*(\sqrt{1i^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) + \exp(-hg*(\sqrt{1i^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) * (\exp(- \\ & hg*(\sqrt{1i^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) - \exp(- \\ & (\sqrt{1i^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) * y22Sol)) / (\sqrt{1i^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho))) + (z1Sol*(hg - \\ & y22Sol)) / ((2*(\pi)*w)*1i)) - (a)^{(2*(\pi)*w)}*(Q); \\ & momentum11 := (y22Sol - y11Sol) - 2*ys3*sign(\cos(2*(\pi)*w)*t) / (\rho*z1Sol*\exp(I^{(2*(\pi)*w)}*t) - \\ & \rho*I^{(2*(\pi)*w)}*\exp(I^{(2*(\pi)*w)}*t) * (((\exp(-2*y11Sol*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) * (- \\ & ((a)^{(2*(\pi)*w)} + z1Sol/(I^{(2*(\pi)*w)})) / (\exp(- \\ & 2*y11Sol*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) + 1))) * \exp(y11Sol*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) + (- \\ & ((a)^{(2*(\pi)*w)} + z1Sol/(I^{(2*(\pi)*w)})) / (\exp(-2*y11Sol*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) + 1))) * \exp(- \\ & y11Sol*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu3/\rho)))) + z1Sol/(I^{(2*(\pi)*w)})); \end{aligned}$$

bond11(n):=y11Sol;

bond22(n):=y22Sol;

$$\begin{aligned} dpactive(n) := & ss(((2.07 + (12*\mu*(Q)*a^{2*\pi*w*\cos(2*\pi*w*0)}) / ((12*\mu*(Q)*a^{2*\pi*w*\cos(2*\pi*w*0)}) + (\\ & 4*(hg)^{2*ss*ys*2*\pi*Rave}))) * ys*Lactive/hg) + ((12*\mu*Q*a^{2*\pi*w*\cos(2*\pi*w*0)}*Lactive) / (2*\pi*Rave \\ & *(hg)^3)); \end{aligned}$$

kk:=zk*(abs(dpactive(n))/(rho*Lactive)+(abs(dpactive(n))/(rho*Lactive))*I);

$$\begin{aligned} S := & numeric::fsolve([2*(\pi)*Rave*((((\exp(-2*y1*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) * (- \\ & ((a)^{(2*(\pi)*w)} + z/(I^{(2*(\pi)*w)})) / (\exp(- \\ & 2*y1*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) + 1))) * (\exp((\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) * y1 - \\ & 1)) / (\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho))) - (((a)^{(2*(\pi)*w)} + z/(I^{(2*(\pi)*w)})) / (\exp(- \\ & 2*y1*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) + 1)) * (\exp(-(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) * y1 - \\ & 1)) / (\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho))) + (y1*z)/((2*(\pi)*w)*I) + (-y1 - y2) * (((\exp(- \\ & 2*y1*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) * (-((a)^{(2*(\pi)*w)} + z/(I^{(2*(\pi)*w)})) / (\exp(- \\ & 2*y1*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) + 1))) * \exp((\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) * y1 + (- \\ & ((a)^{(2*(\pi)*w)} + z/(I^{(2*(\pi)*w)})) / (\exp(-2*y1*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) + 1))) * \exp(- \\ & (\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) * y1 + z/((2*(\pi)*w)*I) + (((\exp(- \\ & 2*y2*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) * (- \\ & ((a)^{(2*(\pi)*w)} + z/(I^{(2*(\pi)*w)})) / (\exp(hg*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) - \\ & 2*y2*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) + \exp(- \\ & hg*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) * (\exp(hg*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) - \\ & \exp((\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) * y2)) / (\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho))) - (((- \\ & ((a)^{(2*(\pi)*w)} + z/(I^{(2*(\pi)*w)})) / (\exp(hg*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) - \\ & 2*y2*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) + \exp(-hg*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) * (\exp(- \\ & hg*(\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) - \exp(- \\ & (\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho)))) * y2)) / (\sqrt{I^{(2*(\pi)*w)}}/((\mu/\rho))) + (z*(hg - y2)) / ((2*(\pi)*w)*I)) \end{aligned}$$

$$-(a)^{(2\pi w)} \cdot (.25\pi((dp)^2 - (dr)^2) - 2\pi Rave \cdot hg) , \quad (((\exp(-2y_1 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) - ((a)^{(2\pi w)} + z/I(2\pi w)))/(\exp(-2y_1 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) + 1)) \cdot \exp(y_1 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) + (-((a)^{(2\pi w)} + z/I(2\pi w))/(\exp(-2y_1 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) + 1)) \cdot \exp(-y_1 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) + z/I(2\pi w)) - (((\exp(-2y_2 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) - ((a)^{(2\pi w)} + z/I(2\pi w)))/(\exp((hg) \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) - 2y_2 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) + \exp(-hg) \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))})) \cdot \exp(y_2 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) + (-((a)^{(2\pi w)} + z/I(2\pi w))/(\exp((hg) \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) - 2y_2 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) + \exp(-hg) \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))})) \cdot \exp(-y_2 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) + z/I(2\pi w)) , \quad (y_2 - y_1) - 2ys \cdot \text{sign}(\cos(2\pi w \cdot t) / (\rho \cdot z \cdot \exp(I(2\pi w \cdot t) - \rho \cdot I(2\pi w) \cdot \exp(I(2\pi w \cdot t) \cdot ((\exp(-2y_1 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) - ((a)^{(2\pi w)} + z/I(2\pi w)))/(\exp(-2y_1 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) + 1)) \cdot \exp(y_1 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) + (-((a)^{(2\pi w)} + z/I(2\pi w))/(\exp(-2y_1 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) + 1)) \cdot \exp(-y_1 \sqrt{I((2\pi w)/(\mu/\rho))}) + z/I(2\pi w)) , [y_1=0..hg, y_2=0..hg, z=-kk..kk], \text{UnrestrictedSearch});$$

y1Sol := y1 | S[1];

y2Sol := y2 | S[2];

zSol := z | S[3]; oo(n):=zSol*rho;

$$QN(n) := 2\pi Rave \cdot ((pSol)/(1i(2\pi w)) \cdot (hg) + ((-((a)^{(2\pi w)} + (pSol)/(1i(2\pi w))) - (((a)^{(2\pi w)} + (pSol)/(1i(2\pi w))) \cdot (1 - \exp((hg) \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu 323/\rho)})))/(\exp((hg) \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu 323/\rho)})) - \exp(-hg) \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu 323/\rho)})) \cdot \exp((\sqrt{1i(2\pi w)/(\mu 323/\rho)}) \cdot (hg) - 1))/(\sqrt{1i(2\pi w)/(\mu 323/\rho)}) - (((((a)^{(2\pi w)} + (pSol)/(1i(2\pi w))) \cdot (1 - \exp((hg) \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu 323/\rho)})))/(\exp((hg) \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu 323/\rho)})) - \exp(-hg) \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu 323/\rho)})) \cdot (1/\exp((\sqrt{1i(2\pi w)/(\mu 323/\rho)}) \cdot (hg) - 1))/(\sqrt{1i(2\pi w)/(\mu 323/\rho)})) - (a)^{(2\pi w)} \cdot (Q));$$

$$Qmr1 := 2\pi Rave \cdot ((((\exp(-2y_1Sol \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)})) - ((a)^{(2\pi w)} + zSol/(1i(2\pi w)))/(\exp(-2y_1Sol \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)})) + 1)) \cdot \exp((\sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)}) \cdot y_1Sol - 1))/(\sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)}) - (((a)^{(2\pi w)} + zSol/(1i(2\pi w)))/(\exp(-2y_1Sol \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)})) + 1)) \cdot \exp(-(\sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)}) \cdot y_1Sol - 1))/(\sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)}) + (y_1Sol \cdot zSol)/(2\pi w \cdot 1i) + (-y_1Sol - y_2Sol) \cdot (((\exp(-2y_1Sol \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)})) - ((a)^{(2\pi w)} + zSol/(1i(2\pi w)))/(\exp(-2y_1Sol \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)})) + 1)) \cdot \exp((\sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)}) \cdot y_1Sol) + (-((a)^{(2\pi w)} + zSol/(1i(2\pi w)))/(\exp(-2y_1Sol \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)})) + 1)) \cdot \exp(-(\sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)}) \cdot y_1Sol) + zSol/(2\pi w \cdot 1i) + (((\exp(-2y_2Sol \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)})) - ((a)^{(2\pi w)} + zSol/(1i(2\pi w)))/(\exp(hg \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)})) - 2y_2Sol \sqrt{1i(2\pi w)/(\mu/\rho)})) \cdot \exp(-$$

```

hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))))))*(exp(hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))))) -
exp((sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))*y2Sol))/(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))) - ((-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))))-
2*y2Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))))+exp(-hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))))))*(exp(-
hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))))) - exp(-
(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))*y2Sol))/(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))) + (zSol*(hg -
y2Sol))/((2*(pi)*w)*1i))) - (a)*(2*(pi)*w)*(Q);
momentum1:= (y2Sol-y1Sol)- 2*ys*sign(cos(2*(pi)*(w)*t) )/ (rho*zSol*exp(I*(2*(pi)*w)*t) -
rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t)  *((exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))+1)))*exp(y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))))+zSol/(I*(2*(pi)*w))));

```

```

bond1(n):=y1Sol;

```

```

bond2(n):=y2Sol;

```

```

if real(bond1(n))>0 and real(bond2(n))>0 and real(bond1(n))< hg/2 and real(bond2(n)) < hg and
real(bond2(n)) > hg/2 and abs(Qmr1)<hb and abs(momentum1)< hb and real(bond11(n))< hg/2 and
real(bond22(n)) < hg and real(bond22(n)) > hg/2 and abs(Qinactive1)<hb and abs(momentum11)< hb
and real(bond11(n))>0 and real(bond22(n))>0 then

```

```

plug(n):=real(y2Sol -y1Sol );

```

```

gg(n):=pSol*rho*exp(I*2*pi*w*t);oo(n):=zSol*rho*exp(I*2*pi*w*t);

```

```

phaz(n):=arg(zSol );

```

```

zz(n):=zSol;

```

```

abz(n):=abs(zSol );

```

```

phazb(n):=arg(pSol );

```

```

xx(n):= a*sin(2*pi*w*t); vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t); Qmr(n):=Qmr1; momentum(n):=momentum1;

```

```

QN(n):=(2*pi*Rave*((pSol)/(I*(2*pi*w)))*(hg) + ((-((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))-
((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))))*exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg)) -
1))/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))) - (((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))))*1/exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg))-
1))/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))-(a)*(2*pi*w)*(.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg));

```

```

plug1(n):=real(bond22(n) -bond11(n) );

```

```

gg(n):=pSol*rho*exp(I*2*pi*w*t);oo1(n):=z1Sol*rho*exp(I*2*pi*w*t);

```

```

phaz1(n):=arg(z1Sol );

```

```

zz1(n):=z1Sol;

```

```

abz1(n):=abs(z1Sol );

```

```

phazb(n):=arg(pSol );

```

```

xx(n):= a*sin(2*pi*w*t); vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t); Qinactive(n):=Qinactive1;

```

```

momentuminactive(n):=momentum11;

```

```

tt(n):=t/(1.0/w);

```

```

Fs :=10;

```

```

gamadaton(n):=-real(exp(2*pi*t*w*I)*((1.41*exp(-1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w +
(zSol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))/(exp(-2*1.41*y1Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) + 1) -
(1.41*exp(-2*1.41*y1Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*exp(1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w +
(zSol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))/(exp(-2*1.41*y1Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) + 1)));
gamadatoff(n):=-real(exp(2*pi*t*w*I)*((1.41*exp(-1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))*(- 2*a*pi*w +
(z1Sol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))/(exp(-2*1.41*y11Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)) + 1) -
(1.41*exp(-2*1.41*y11Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))*exp(1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))*(- 2*a*pi*w +
(z1Sol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))/(exp(-2*1.41*y11Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)) + 1)));
inr(n):=rho*real(I*((2*(pi)*w))*((((exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+zSol/(I*(2*(pi)*w)))))*exp(I*2*(pi)*w*t));

```

```

QQ(n):=0.25*(.25*(pi*dr^2)*a^2*pi*w*cos(2*pi*w*t)); QQmax:=0.25*(.25*(pi*dr^2)*a^2*pi*w);
AA2(n):=(.25*pi*((dpvalvec)^2);
Vv(n):=QQ(n)/AA2(n); Vvmax:=QQmax/AA2(n);
cd(n):=0.7;
dpvalve(n):=((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^-2); dpvalvevmax:=((1/2)*(rho)*(Vvmax^2)*(cd(n))^-2);
Fvalve(n):=(((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^-2))*Agv;
m:=2/(1+2*nn); mm:=(1+2*nn);
cp:=(AA2(n))/(dpvalvevmax)^nn;
dpv(n):=( rh*( QQ(n))/(cd(n)*cp ) )^(m) );
AA(n):=cp*(dpv(n))^nn;

```

```

if AA(n)<=AA2(n) then

```

```

    dpv(n):=( rh*( QQ(n))/(cd(n)*cp ) )^(m) );

```

```

else

```

```

    dpv(n):=dpvalve(n);

```

```

end;

```

```

Fv(n):=dpv(n)*Agv;

```

```

Pgasrel :=(P0*(va/(va-.25*pi*dr^2*a*sin(2*pi*w*t)))^1.3)-10^5;

```

```

Fgasrel(n) :=((P0*(va/(va-.25*pi*dr^2*a*sin(2*pi*w*t)))^1.3)-10^5)*((Agv));

```

```

twallon(n):=(ss*ys+mu*gamadaton(n)); twalloff(n):=(ss*ys3+mu3*gamadatoff(n));

```

```

F3 := Fgasrel(n) +Fv(n) +ss*Fs ;

```

```

F4(n):=((ss*ys+mu*gamadaton(n))*2*pi*2*Rave*Lactive+(ss*ys3+mu3*gamadatoff(n))*2*pi*2*Rave*Li

```

nactive);

```
fdg(n):=real(rho*Lactive*(zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive*(pSol)*exp(I*2*pi*w*t));
fdtotalsimniotoni(n):=A*(real(rho*Lactive*(zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive*
(pSol)*exp(I*2*pi*w*t)))+F3+F4(n);
fdtotalnew(n):=A*(real(rho*Lactive*(zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive*(zz1(n)
)*exp(I*2*pi*w*t)))+F3+F4(n);
dptotalsimniotoni(n):=(real(rho*Lactive*(zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive*
(pSol)*exp(I*2*pi*w*t)));
dptotalnew(n):=(real(rho*Lactive*(zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive*(zz1(n)
)*exp(I*2*pi*w*t)));
dpactive(n):=real(rho*(zSol)*exp(I*2*pi*w*t))*Lactive;
dpinactivebingham(n):=real(rho*Linactive*(zz1(n))*exp(I*2*pi*w*t));
dpinactivesimniotoni(n):=real(rho*Linactive*(pSol)*exp(I*2*pi*w*t));
forceniotoniq(n)
:=((12*mu*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lactive*(A))/(2*pi*Rave*(hg)^3))+((12*mu323*Q*a*2*pi*w*cos(
2*pi*w*t)*Linactive*(A))/(2*pi*Rave*(hg)^3))+F3;
forceniotonis(n):=real(rho*Lt*(A)*(pSol)*exp(I*2*pi*w*t))+F3;
forcemrquasi(n):=
((12*mu323*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Linactive*(A))/(2*pi*Rave*(hg)^3))+((12*mu*Q*a*2*pi*w*cos(
2*pi*w*t)*Lactive*(A))/(2*pi*Rave*(hg)^3))+
ss*((A)*((2.07+(12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))/((12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))+(.4*(hg)^2
*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+F3;
```

```
dpactive(n):=abs((rho*(zSol)*exp(I*2*pi*w*t))*Lactive)*cos(2*pi*w*t+arg((rho*(zSol))*Lactive));
dupt(n):=rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t) *(((exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+zSol/(I*(2*(pi)*w))));
```

```
dupt(n):=rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t) *(((exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+zSol/(I*(2*(pi)*w))));
n:=n+1; end_if;
end_for;
```

n:=n;

for t from 0.25/(w) to 0.75/(w) step stepsize do

ss:= sign(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)); vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t); if vp(n)=0 then
ss:=sign(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*(t-10*stepsize)))end_if;

dpn:=((12*mu323*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Lt*(A))/(2*pi*Rave*(hg)^3));
b:=numeric::fsolve((2*pi*Rave*((p)/(I*(2*pi*w)))*(hg) + (((a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w)))-
((((a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))))))*(exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg)) -
1))/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))) - (((((a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))))))*(1/exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg))-
1))/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-(a)*(2*pi*w)*(0.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg)),p=dpn);

pSol := p | b[1];
QN(n):=(2*pi*Rave*((pSol)/(I*(2*pi*w)))*(hg) + (((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))-
((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))))))*(exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg)) -
1))/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))) - (((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))))))*(1/exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg))-
1))/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-(a)*(2*pi*w)*(0.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg));

pp(n):=pSol;
tt(n):=t;

xx(n):= a*sin(2*pi*w*t);

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);
ap(n):=-a*(2*pi*w)^2*sin(2*pi*w*t);
dpinactive(n):=ss*((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))/((12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0
)))+(4*(hg)^2*ss*ys3*2*pi*Rave))))*ys3*Linactive/hg)+((12*mu3*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Linactive)/
(2*pi*Rave*(hg)^3)) ;

kk:=zkk*(abs(dpinactive(n))/(rho*Linactive)+(abs(dpinactive(n))/(rho*Linactive))*I);

S:=numeric::fsolve(I 2*(pi)*Rave*((((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))))+1)))*(exp((sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho))))*y1) -
1))/(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))) - (((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))))+1))*(exp(-(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho))))*y1) -
1))/(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))) + (y1*z)/(2*(pi)*w)*I) + (-y1 - y2)*(((exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))))+1))*exp((sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho))))*y1) + (-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu3/rho)))))+1))*exp(-

$(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2*y1 + z/((2*(\pi)*w)*I)) + ((((\exp(-$
 $2*y2*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)*(-$
 $((a)*(2*(\pi)*w)+z/(I*(2*(\pi)*w)))/(\exp(hg*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})-$
 $2*y2*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+\exp(-$
 $hg*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2))*(\exp(hg*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2) -$
 $\exp((\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2*y2))/(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))}) - ((-$
 $((a)*(2*(\pi)*w)+z/(I*(2*(\pi)*w)))/(\exp(hg*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})-$
 $2*y2*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+\exp(-hg*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2))*(\exp(-$
 $hg*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2) - \exp(-$
 $(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2*y2))/(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))}) + (z*(hg - y2))/((2*(\pi)*w)*I))$
 $-(a)*(2*(\pi)*w)*(0.25*\pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*\pi*Rave*hg) , \quad ((((\exp(-$
 $2*y1*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)*(-(a)*(2*(\pi)*w)+z/(I*(2*(\pi)*w)))/(\exp(-$
 $2*y1*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+1))*\exp(y1*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+(-$
 $((a)*(2*(\pi)*w)+z/(I*(2*(\pi)*w)))/(\exp(-2*y1*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+1))*\exp(-$
 $y1*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+z/(I*(2*(\pi)*w))) - \quad ((((\exp(-$
 $2*y2*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)*(-$
 $((a)*(2*(\pi)*w)+z/(I*(2*(\pi)*w)))/(\exp((hg*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)-$
 $2*y2*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+\exp(-$
 $(hg*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2))*\exp(y2*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+(-$
 $((a)*(2*(\pi)*w)+z/(I*(2*(\pi)*w)))/(\exp((hg*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)-$
 $2*y2*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+\exp(-(hg*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2))*\exp(-$
 $y2*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+z/(I*(2*(\pi)*w))) , \quad (y2-y1)-$
 $2*ys3*\text{sign}(\cos(2*(\pi)*(w)*t) / (\rho*z*\exp(I*(2*(\pi)*w)*t) - \rho*I*(2*(\pi)*w)*\exp(I*(2*(\pi)*w)*t)$
 $*(((\exp(-2*y1*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)*(-(a)*(2*(\pi)*w)+z/(I*(2*(\pi)*w)))/(\exp(-$
 $2*y1*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+1))*\exp(y1*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+(-$
 $((a)*(2*(\pi)*w)+z/(I*(2*(\pi)*w)))/(\exp(-2*y1*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+1))*\exp(-$
 $y1*(\sqrt{I*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+z/(I*(2*(\pi)*w))) \quad], [y1=0..hg,y2=0..hg,z=-$
 $kk..kk], \text{UnrestrictedSearch});$

y11Sol := y1 | S[1];

y22Sol := y2 | S[2];

z1Sol := z | S[3]; oo1(n):=z1Sol*rho;

$QN(n):=2*\pi*Rave*((pSol)/(1i*(2*\pi*w))*(hg) + (((-(a)*(2*\pi*w)+(pSol)/(1i*(2*\pi*w)))-$
 $((((a)*(2*\pi*w)+(pSol)/(1i*(2*\pi*w)))^2*(1-$
 $\exp((hg*(\sqrt{1i*(2*\pi*w))/((\mu_3323/\rho))})^2))/(\exp((hg*(\sqrt{1i*(2*\pi*w))/((\mu_3323/\rho))})^2)-\exp(-$
 $(hg*(\sqrt{1i*(2*\pi*w))/((\mu_3323/\rho))})^2))))*(\exp((\sqrt{1i*(2*\pi*w))/((\mu_3323/\rho))})^2*(hg) -$
 $1))/(\sqrt{1i*(2*\pi*w))/((\mu_3323/\rho))}) - (((((a)*(2*\pi*w)+(pSol)/(1i*(2*\pi*w)))^2*(1-$
 $\exp((hg*(\sqrt{1i*(2*\pi*w))/((\mu_3323/\rho))})^2))/(\exp((hg*(\sqrt{1i*(2*\pi*w))/((\mu_3323/\rho))})^2)-\exp(-$
 $(hg*(\sqrt{1i*(2*\pi*w))/((\mu_3323/\rho))})^2))))*(1/\exp((\sqrt{1i*(2*\pi*w))/((\mu_3323/\rho))})^2*(hg)-$
 $1))/(\sqrt{1i*(2*\pi*w))/((\mu_3323/\rho))})-(a)*(2*\pi*w)*((Q));$

$Qinactive1:= 2*(\pi)*Rave*(\quad ((((\exp(-2*y11Sol*(\sqrt{1i*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2))*(-$
 $((a)*(2*(\pi)*w)+z1Sol/(1i*(2*(\pi)*w)))/(\exp(-$
 $2*y11Sol*(\sqrt{1i*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)+1))*(\exp((\sqrt{1i*((2*(\pi)*w))/((\mu_3/\rho))})^2)*y11Sol) -$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}}) - \left(\frac{(a)^2 (2\pi)^2 w + z_1 \text{Sol}}{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}} \right) \frac{1}{\exp(-2\pi y_{11} \text{Sol} \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) + 1} \left(\exp\left(-\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}\right) y_{11} \text{Sol} - 1 \right) \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}}) + \frac{y_{11} \text{Sol} z_1 \text{Sol}}{(2\pi)^2 w} + (-y_{11} \text{Sol} - y_{22} \text{Sol}) \left(\exp(-2\pi y_{11} \text{Sol} \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) \right) \left(\frac{(a)^2 (2\pi)^2 w + z_1 \text{Sol}}{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}} \right) \frac{1}{\exp(-2\pi y_{11} \text{Sol} \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) + 1} \left(\exp\left(\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}\right) y_{11} \text{Sol} + (-((a)^2 (2\pi)^2 w + z_1 \text{Sol}) / (1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho})) \frac{1}{\exp(-2\pi y_{11} \text{Sol} \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) + 1} \right) \exp(-\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) y_{11} \text{Sol} + z_1 \text{Sol} / ((2\pi)^2 w) + (((\exp(-2\pi y_{22} \text{Sol} \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) - ((a)^2 (2\pi)^2 w + z_1 \text{Sol}) / (1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho})) \frac{1}{\exp(hg \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) - \exp((\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) y_{22} \text{Sol})) / \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) - ((a)^2 (2\pi)^2 w + z_1 \text{Sol}) / (1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho})) \frac{1}{\exp(hg \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) - \exp(-2\pi y_{22} \text{Sol} \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) + \exp(-hg \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) \right) \exp(-hg \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) - \exp(-\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) y_{22} \text{Sol} \right) / \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}} + (z_1 \text{Sol} (hg - y_{22} \text{Sol})) / ((2\pi)^2 w) - (a)^2 (2\pi)^2 w (Q);$$

$$\text{momentum}_{11} := (y_{22} \text{Sol} - y_{11} \text{Sol}) - 2\pi y_3 \text{sign}(\cos(2\pi (w)^t)) / (\rho z_1 \text{Sol} \exp(I^2 (2\pi)^2 w^t) - \rho I^2 (2\pi)^2 w \exp(I^2 (2\pi)^2 w^t) \left(\exp(-2\pi y_{11} \text{Sol} \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) \right) \left(\frac{(a)^2 (2\pi)^2 w + z_1 \text{Sol}}{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}} \right) \frac{1}{\exp(-2\pi y_{11} \text{Sol} \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) + 1} \exp(y_{11} \text{Sol} \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) + (-((a)^2 (2\pi)^2 w + z_1 \text{Sol}) / (1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho})) \frac{1}{\exp(-2\pi y_{11} \text{Sol} \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) + 1} \exp(-y_{11} \text{Sol} \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) + z_1 \text{Sol} / (I^2 (2\pi)^2 w));$$

bond11(n):=y11Sol;

bond22(n):=y22Sol;

$$\text{dpactive}(n) := \text{ss} \left(\frac{(2.07 + (12\mu(Q)^2 a^2 \pi^2 w \cos(2\pi^2 w^0)) / ((12\mu(Q)^2 a^2 \pi^2 w \cos(2\pi^2 w^0)) + (4(hg)^2 \text{ss} y_3^2 \pi^2 \text{Rave}))) y_3 \text{Lactive} / hg}{(12\mu(Q)^2 a^2 \pi^2 w \cos(2\pi^2 w^0) \text{Lactive}) / (2\pi^2 \text{Rave} (hg)^3)} \right);$$

kk:=zk*(abs(dpactive(n))/(rho*Lactive)+(abs(dpactive(n))/(rho*Lactive))*I);

$$\text{S} := \text{numeric}::\text{fsolve} \left(\frac{2\pi (2\pi)^2 \text{Rave} \left(\frac{((\exp(-2\pi y_1 \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}})) - ((a)^2 (2\pi)^2 w + z / (1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho})) \frac{1}{\exp(-2\pi y_1 \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) + 1} \right) \exp(\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) y_1 - 1}{\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}} - \left(\frac{(a)^2 (2\pi)^2 w + z / (1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho})) \frac{1}{\exp(-2\pi y_1 \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) + 1} \right) \exp(-\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) y_1 - 1}{\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}} + \frac{y_1 z}{(2\pi)^2 w} + (-y_1 - y_2) \left(\exp(-2\pi y_1 \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) \right) \left(\frac{(a)^2 (2\pi)^2 w + z / (1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho})) \frac{1}{\exp(-2\pi y_1 \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) + 1} \right) \exp((\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) y_1 + (-((a)^2 (2\pi)^2 w + z / (1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho})) \frac{1}{\exp(-2\pi y_1 \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) + 1} \right) \exp(-\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) y_1 + z / ((2\pi)^2 w) + (((\exp(-2\pi y_2 \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) - ((a)^2 (2\pi)^2 w + z / (1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho})) \frac{1}{\exp(hg \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) - \exp((\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) y_2 \text{Sol})) / \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) - ((a)^2 (2\pi)^2 w + z_1 \text{Sol}) / (1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho})) \frac{1}{\exp(hg \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) - \exp(-2\pi y_{22} \text{Sol} \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) + \exp(-hg \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) \right) \exp(-hg \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) - \exp(-\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}}) y_{22} \text{Sol} \right) / \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 w}{\mu_3/\rho}} + (z_1 \text{Sol} (hg - y_{22} \text{Sol})) / ((2\pi)^2 w) - (a)^2 (2\pi)^2 w (Q);$$

$$\begin{aligned} & ((a)^*(2*(\pi)*w)+z/(I^*(2*(\pi)*w)))/(\exp(hg*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))/((\mu/\rho))))- \\ & 2*y2*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))})+ \exp(- \\ & hg*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) * (\exp(hg*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))/((\mu/\rho)))) - \\ & \exp((\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))})*y2))/(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}) - ((- \\ & ((a)^*(2*(\pi)*w)+z/(I^*(2*(\pi)*w)))/(\exp(hg*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))/((\mu/\rho))))- \\ & 2*y2*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))})+ \exp(-hg*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) * (\exp(- \\ & hg*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) - \exp(- \\ & (\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))})*y2))/(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}) + (z*(hg - y2))/((2*(\pi)*w)*I))) \\ & -(a)^*(2*(\pi)*w)*(.25*\pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*\pi*Rave*hg) , \quad (((\exp(- \\ & 2*y1*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) * (-((a)^*(2*(\pi)*w)+z/(I^*(2*(\pi)*w)))/(\exp(- \\ & 2*y1*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) + 1))) * \exp(y1*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) + (- \\ & ((a)^*(2*(\pi)*w)+z/(I^*(2*(\pi)*w)))/(\exp(-2*y1*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) + 1)) * \exp(- \\ & y1*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) + z/(I^*(2*(\pi)*w))) \quad - \quad (((\exp(- \\ & 2*y2*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) * (- \\ & ((a)^*(2*(\pi)*w)+z/(I^*(2*(\pi)*w)))/(\exp((hg)*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))/((\mu/\rho))))- \\ & 2*y2*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))})+ \exp(- \\ & (hg)*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))})))) * \exp(y2*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) + (- \\ & ((a)^*(2*(\pi)*w)+z/(I^*(2*(\pi)*w)))/(\exp((hg)*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))/((\mu/\rho))))- \\ & 2*y2*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))})+ \exp(- (hg)*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))})))) * \exp(- \\ & y2*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) + z/(I^*(2*(\pi)*w))) \quad , \quad (y2-y1)- \\ & 2*ys*\text{sign}(\cos(2*(\pi)*(w)*t))/ (\rho*z*\exp(I^*(2*(\pi)*w)*t) \quad -\rho*I^*(2*(\pi)*w)*\exp(I^*(2*(\pi)*w)*t) \\ & *(((\exp(-2*y1*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) * (-((a)^*(2*(\pi)*w)+z/(I^*(2*(\pi)*w)))/(\exp(- \\ & 2*y1*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) + 1))) * \exp(y1*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) + (- \\ & ((a)^*(2*(\pi)*w)+z/(I^*(2*(\pi)*w)))/(\exp(-2*y1*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) + 1)) * \exp(- \\ & y1*(\sqrt{I^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) + z/(I^*(2*(\pi)*w))) \quad] , [y1=0..hg,y2=0..hg,z=- \\ & kk..kk], \text{UnrestrictedSearch}); \end{aligned}$$

y1Sol := y1 | S[1];

y2Sol := y2 | S[2];

zSol := z | S[3]; oo(n):=zSol*rho;

$$\begin{aligned} \text{QN}(n) := & 2*\pi*Rave*((pSol)/(1i^*(2*\pi*w)))*(hg) + (((a)^*(2*\pi*w)+(pSol)/(1i^*(2*\pi*w)))- \\ & (((a)^*(2*\pi*w)+(pSol)/(1i^*(2*\pi*w))))*(1- \\ & \exp((hg)*(\sqrt{1i^*(2*\pi*w))/((\mu323/\rho))}))/(\exp((hg)*(\sqrt{1i^*(2*\pi*w))/((\mu323/\rho))}))) - \exp(- \\ & (hg)*(\sqrt{1i^*(2*\pi*w))/((\mu323/\rho))})))) * (\exp((\sqrt{1i^*(2*\pi*w))/((\mu323/\rho))})*(hg)) - \\ & 1))/(\sqrt{1i^*(2*\pi*w))/((\mu323/\rho))}) - (((((a)^*(2*\pi*w)+(pSol)/(1i^*(2*\pi*w)))*(1- \\ & \exp((hg)*(\sqrt{1i^*(2*\pi*w))/((\mu323/\rho))}))/(\exp((hg)*(\sqrt{1i^*(2*\pi*w))/((\mu323/\rho))}))) - \exp(- \\ & (hg)*(\sqrt{1i^*(2*\pi*w))/((\mu323/\rho))})))) * (1/\exp((\sqrt{1i^*(2*\pi*w))/((\mu323/\rho))})*(hg)) - \\ & 1))/(\sqrt{1i^*(2*\pi*w))/((\mu323/\rho))}))) - (a)^*(2*\pi*w)*((Q)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Qmr1} := & 2*(\pi)*Rave*(\quad (((\exp(-2*y1Sol*(\sqrt{1i^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) * (- \\ & ((a)^*(2*(\pi)*w)+zSol/(1i^*(2*(\pi)*w)))/(\exp(- \\ & 2*y1Sol*(\sqrt{1i^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) + 1))) * (\exp((\sqrt{1i^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))*y1Sol) - \\ & 1))/(\sqrt{1i^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) - (((a)^*(2*(\pi)*w)+zSol/(1i^*(2*(\pi)*w)))/(\exp(- \\ & 2*y1Sol*(\sqrt{1i^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))) + 1)) * (\exp(-(\sqrt{1i^*((2*(\pi)*w))/((\mu/\rho))}))*y1Sol) - \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)}} + (y1Sol * zSol) / ((2\pi)^2 w^2 * 1i) + (- (y1Sol - y2Sol) * ((\exp(-2 * y1Sol * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)})) * (-((a) * (2\pi)^2 w^2 + zSol / (1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho))) / (\exp(-2 * y1Sol * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)})) + 1)) * \exp(\sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)} * y1Sol) + (-((a) * (2\pi)^2 w^2 + zSol / (1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho))) / (\exp(-2 * y1Sol * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)})) + 1)) * \exp(-\sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)} * y1Sol) + zSol / ((2\pi)^2 w^2 * 1i) + (((\exp(-2 * y2Sol * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)})) * (-((a) * (2\pi)^2 w^2 + zSol / (1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho))) / (\exp(hg * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)})) - 2 * y2Sol * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)})) + \exp(-hg * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)})) * (\exp(hg * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)}) - \exp(\sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)} * y2Sol)) / (\sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)}) - ((a) * (2\pi)^2 w^2 + zSol / (1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho))) / (\exp(hg * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)})) - 2 * y2Sol * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)})) + \exp(-hg * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)})) * (\exp(-hg * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)}) - \exp(\sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)} * y2Sol)) / (\sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)}) + (zSol * (hg - y2Sol) / ((2\pi)^2 w^2 * 1i)) - (a) * (2\pi)^2 w^2 * (Q);$$

$$\text{momentum1} := (y2Sol - y1Sol) - 2 * yS * \text{sign}(\cos(2 * (\pi) * w * t)) / (\rho * zSol * \exp(I * (2 * (\pi) * w * t)) - \rho * I * (2 * (\pi) * w^2) * \exp(I * (2 * (\pi) * w * t)) * ((\exp(-2 * y1Sol * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)})) * (-((a) * (2\pi)^2 w^2 + zSol / (1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho))) / (\exp(-2 * y1Sol * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)})) + 1)) * \exp(y1Sol * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)})) + (-((a) * (2\pi)^2 w^2 + zSol / (1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho))) / (\exp(-2 * y1Sol * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)})) + 1)) * \exp(-y1Sol * \sqrt{1 + ((2\pi)^2 w^2)/(\mu/\rho)}) + zSol / (I * (2 * (\pi) * w^2));$$

bond1(n):=y1Sol;

bond2(n):=y2Sol;

if real(bond1(n))>0 and real(bond2(n))>0 and real(bond1(n))< hg/2 and real(bond2(n)) < hg and
 real(bond2(n)) > hg/2 and abs(Qmr1)<hb and abs(momentum1)< hb and real(bond11(n))< hg/2 and
 real(bond22(n)) < hg and real(bond22(n)) > hg/2 and abs(Qinactive1)<hb and abs(momentum11)< hb
 and real(bond11(n))>0 and real(bond22(n))>0 then

plug(n):=real(y2Sol - y1Sol);

gg(n):=pSol*rho*exp(I*2*pi*w*t);oo(n):=zSol*rho*exp(I*2*pi*w*t);

phaz(n):=arg(zSol);

zz(n):=zSol;

abz(n):=abs(zSol);

phazb(n):=arg(pSol);

xx(n):= a*sin(2*pi*w*t); vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t); Qmr(n):=Qmr1; momentum(n):=momentum1;

QN(n):=(2*pi*Rave*((pSol)/(I*(2*pi*w))*(hg) + ((-((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))-

((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))*(1-

exp((hg*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/exp((hg*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-

(hg*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))))*(exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg) -

1))/sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))) - (((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))*(1-

exp((hg*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/exp((hg*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-

(hg*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))))*(1/exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg))-

1))/sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))-(a)*(2*pi*w)*(0.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg));

plug1(n):=real(bond22(n) - bond11(n));

gg(n):=pSol*rho*exp(I*2*pi*w*t);oo1(n):=z1Sol*rho*exp(I*2*pi*w*t);

```

phaz1(n):=arg(z1Sol );
zz1(n):=z1Sol;
abz1(n):=abs(z1Sol );
phazb(n):=arg(pSol );
xx(n):= a*sin(2*pi*w*t); vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t); Qinactive(n):=Qinactive1;
momentuminactive(n):=momentum11;
gamadaton(n):=-real(exp(2*pi*t*w*I)*((1.41*exp(-1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu))))*(- 2*a*pi*w +
(zSol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))/(exp(-2*1.41*y1Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) + 1) -
(1.41*exp(-2*1.41*y1Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu))))*exp(1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w +
(zSol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))/(exp(-2*1.41*y1Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) + 1)));
gamadatoff(n):=-real(exp(2*pi*t*w*I)*((1.41*exp(-1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3))))*(- 2*a*pi*w +
(z1Sol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))/(exp(-2*1.41*y11Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)) + 1) -
(1.41*exp(-2*1.41*y11Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3))))*exp(1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))*(- 2*a*pi*w +
(z1Sol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))/(exp(-2*1.41*y11Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)) + 1)));
inr(n):=rho*real(I*((2*(pi)*w))*((((exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+zSol/(I*(2*(pi)*w))))*exp(I*2*(pi)*w*t)));

tt(n):=t/(1.0/w); ; Fs:=10;
QQ(n):=.25*(.25*(pi*dr^2)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)); QQmax:=0.25*(.25*(pi*dr^2)*a*2*pi*w);
AA2(n):=(dpvalver2*dpvalver1);
Vv(n):=QQ(n)/AA2(n); Vvmax:=QQmax/AA2(n);
cd(n):=0.7;

dpvalve(n):=-((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^-2); dpvalvevmax:=((1/2)*(rho)*(Vvmax^2)*(cd(n))^-2);
Fvalve(n):=-(((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^-2))*Agv;

m:=2/(1+2*nn); mm:=(1+2*nn);
cp:=(AA2(n))/(dpvalvevmax)^nn;

dpv(n):=( rh*( abs(QQ(n))/(cd(n)*cp) )^(m) );

AA(n):=cp*(dpv(n))^nn;

if AA(n)<=AA2(n) then

dpv(n):=- ( rh*( abs(QQ(n))/(cd(n)*cp) )^(m) );

else
dpv(n):=dpvalve(n);

```

end;

Fv(n):=dpv(n)*Agv;

Pgasrel :=(P0*(va/(va-.25*pi*dr^2*a*sin(2*pi*w*t)))^1.3)-10^5;

Fgasrel(n) :=((P0*(va/(va-.25*pi*dr^2*a*sin(2*pi*w*t)))^1.3)-10^5)*((Agv));

twallon(n):=(ss*ys+mu*gamadaton(n)); twalloff(n):=(ss*ys3+mu3*gamadatoff(n));

F3 := Fgasrel(n) +Fv(n) +ss*Fs ;

F4(n):=((ss*ys+mu*gamadaton(n))*2*pi*2*Rave*Lactive+(ss*ys3+mu3*gamadatoff(n))*2*pi*2*Rave*Linactive);

fdg(n) :=real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t)) ;

fdtotalsimniotoni(n):=A*(real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t)))+F3+F4(n);

fdtotalnew(n):=A*(real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (zz1(n))*exp(I*2*pi*w*t)))+F3+F4(n);

dptotalsimniotoni(n):=(real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t)));

dptotalnew(n):=(real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (zz1(n))*exp(I*2*pi*w*t))) ;

dpactive(n):=real(rho*(zSol)*exp(I*2*pi*w*t))*Lactive;

dpinactivebingham(n):=real(rho*Linactive* (zz1(n))*exp(I*2*pi*w*t));

dpinactivesimniotoni(n):=real(rho*Linactive* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t));

forceniotonis(n) :=real(rho*Lt*(A)* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t))+F3 ;

forcemrquasi(n) :=

((12*mu323*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Linactive*(A))/(2*pi*Rave*(hg)^3))+((12*mu*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lactive*(A))/(2*pi*Rave*(hg)^3))+

ss*((A)*((2.07+(12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)))/((12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))+(.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+F3 ;

forceniotoniq(n) :=((12*mu323*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt*(A))/(2*pi*Rave*(hg)^3))+F3 ;

dpactive(n):=abs((rho*(zSol)*exp(I*2*pi*w*t))*Lactive)*cos(2*pi*w*t+arg((rho*(zSol))*Lactive));

dupt(n):=rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t) *(((exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+zSol/(I*(2*(pi)*w))));

dupt(n):=rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t) *(((exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+zSol/(I*(2*(pi)*w))));

```

((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+zSol/(I*(2*(pi)*w)));
n:=n+1; end_if;
end_for:

```

```

n:=n;

```

```

for t from 0.75/(w) to 1.0/(w) step stepsize do

```

```

ss:= sign(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)); vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t); if vp(n)=0 then
ss:=sign(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*(t-10*stepsize)))end_if;

```

```

dpn:=((12*mu323*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Lt*(A))/(2*pi*Rave*(hg)^3));
b:=numeric::solve((2*pi*Rave*((p)/(I*(2*pi*w)))*(hg) + ((-(a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w)))-
((((a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))))*(exp((sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho))))*(hg)) -
1))/(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))) - (((((a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))))*(1/exp((sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho))))*(hg))-
1))/(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho))))-(a)*(2*pi*w)*(.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg)),p=dpn);

```

```

pSol := p | b[1];

```

```

QN(n):=(2*pi*Rave*((pSol)/(I*(2*pi*w)))*(hg) + ((-(a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))-
((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))))*(exp((sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho))))*(hg)) -
1))/(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))) - (((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))))*(1/exp((sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho))))*(hg))-
1))/(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho))))-(a)*(2*pi*w)*(.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg));
pp(n):=pSol;
tt(n):=t;

```

```

xx(n):= a*sin(2*pi*w*t);

```

```

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);
ap(n):=-a*(2*pi*w)^2*sin(2*pi*w*t);

```

```

dpinactive(n):=ss*(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))/((12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)
))+(.4*(hg)^2*ss*ys3*2*pi*Rave))))*ys3*Linactive/hg)+((12*mu3*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Linactive)/
(2*pi*Rave*(hg)^3)) ;

```

kk:=zkk*(abs(dpinactive(n))/(rho*Linactive)+(abs(dpinactive(n))/(rho*Linactive))*I);

S:=numeric::fsolve([2*(pi)*Rave*((((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+1))*exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y1 -
1)/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) - ((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+1))*exp(-(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y1 -
1)/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) + (y1*z)/(I*(2*(pi)*w)*I) +(-(y1 - y2)*(((exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+1))*exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y1 + (-
(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+1))*exp(-
(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y1 + z/(I*(2*(pi)*w)*I)) +(((exp(-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*(-
(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+exp(-
hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) -
exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y2))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) - ((-
(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+exp(-hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*exp(-
hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) - exp(-
(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y2))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) + (z*(hg - y2))/((2*(pi)*w)*I))
-(a)*(2*(pi)*w)*(0.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg) , (((exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+1))*exp(y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+(-
(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+1))*exp(-
y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w)))) - (((exp(-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*(-
(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+exp(-
(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*exp(y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+(-
(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+exp(-(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*exp(-
y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w)))) , (y2-y1)-
2*y3*sign(cos(2*(pi)*(w)*t))/ (rho*z*exp(I*(2*(pi)*w)*t) -rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t)
*(((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+1))*exp(y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+(-
(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+1))*exp(-
y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w))))], [y1=0..hg,y2=0..hg,z=-
kk..kk],UnrestrictedSearch);

y11Sol := y1 | S[1];

y22Sol := y2 | S[2];

z1Sol := z | S[3]; oo1(n):=z1Sol*rho;

$$\begin{aligned} \text{QN}(n) = & 2 * \pi * \text{Rave} * ((\text{pSol}) / (1i * (2 * \pi * w)) * (\text{hg}) + ((-((a) * (2 * \pi * w) + (\text{pSol}) / (1i * (2 * \pi * w))) - \\ & (((((a) * (2 * \pi * w) + (\text{pSol}) / (1i * (2 * \pi * w))) * (1 - \\ & \exp((\text{hg}) * (\text{sqrt}(1i * (2 * \pi * w) / ((\text{mu}323 / \text{rho})))))) / (\exp((\text{hg}) * (\text{sqrt}(1i * (2 * \pi * w) / ((\text{mu}323 / \text{rho})))))) - \exp(- \\ & (\text{hg}) * (\text{sqrt}(1i * (2 * \pi * w) / ((\text{mu}323 / \text{rho}))))))))) * (\exp((\text{sqrt}(1i * (2 * \pi * w) / ((\text{mu}323 / \text{rho})))) * (\text{hg})) - \\ & 1) / (\text{sqrt}(1i * (2 * \pi * w) / ((\text{mu}323 / \text{rho})))) - (((((a) * (2 * \pi * w) + (\text{pSol}) / (1i * (2 * \pi * w))) * (1 - \\ & \exp((\text{hg}) * (\text{sqrt}(1i * (2 * \pi * w) / ((\text{mu}323 / \text{rho})))))) / (\exp((\text{hg}) * (\text{sqrt}(1i * (2 * \pi * w) / ((\text{mu}323 / \text{rho})))))) - \exp(- \\ & (\text{hg}) * (\text{sqrt}(1i * (2 * \pi * w) / ((\text{mu}323 / \text{rho}))))))))) * (1 / \exp((\text{sqrt}(1i * (2 * \pi * w) / ((\text{mu}323 / \text{rho})))) * (\text{hg})) - \\ & 1) / (\text{sqrt}(1i * (2 * \pi * w) / ((\text{mu}323 / \text{rho})))) - (a) * (2 * \pi * w) * ((Q)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Qinactive1} = & 2 * (\pi) * \text{Rave} * (((\exp(-2 * y11\text{Sol} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))))) * (- \\ & ((a) * (2 * (\pi) * w) + z1\text{Sol} / (1i * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(- \\ & 2 * y11\text{Sol} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) + 1))) * (\exp((\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) * y11\text{Sol} - \\ & 1) / (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) - ((-((a) * (2 * (\pi) * w) + z1\text{Sol} / (1i * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(- \\ & 2 * y11\text{Sol} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) + 1))) * (\exp(-(\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) * y11\text{Sol} - \\ & 1) / (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) + (y11\text{Sol} * z1\text{Sol}) / ((2 * (\pi) * w) * 1i)) + (- (y11\text{Sol} - y22\text{Sol}) * (((\exp(- \\ & 2 * y11\text{Sol} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))))) * (-((a) * (2 * (\pi) * w) + z1\text{Sol} / (1i * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(- \\ & 2 * y11\text{Sol} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) + 1))) * \exp((\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) * y11\text{Sol} + (- \\ & ((a) * (2 * (\pi) * w) + z1\text{Sol} / (1i * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(-2 * y11\text{Sol} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) + 1))) * \exp(- \\ & (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) * y11\text{Sol} + z1\text{Sol} / ((2 * (\pi) * w) * 1i)) + (((\exp(- \\ & 2 * y22\text{Sol} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))))) * (- \\ & ((a) * (2 * (\pi) * w) + z1\text{Sol} / (1i * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(\text{hg} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) - \\ & 2 * y22\text{Sol} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) + \exp(- \\ & \text{hg} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))))) * (\exp(\text{hg} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) - \\ & \exp((\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) * y22\text{Sol})) / (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) - ((- \\ & ((a) * (2 * (\pi) * w) + z1\text{Sol} / (1i * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(\text{hg} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) - \\ & 2 * y22\text{Sol} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) + \exp(-\text{hg} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))))) * (\exp(- \\ & \text{hg} * (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) - \exp(- \\ & (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) * y22\text{Sol})) / (\text{sqrt}(1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) + (z1\text{Sol} * (\text{hg} - \\ & y22\text{Sol}) / ((2 * (\pi) * w) * 1i)) - (a) * (2 * (\pi) * w) * ((Q); \\ \text{momentum11} = & (y22\text{Sol} - y11\text{Sol}) - 2 * y3 * \text{sign}(\cos(2 * (\pi) * (w) * t)) / (\text{rho} * z1\text{Sol} * \exp(I * (2 * (\pi) * w) * t) - \\ & \text{rho} * I * (2 * (\pi) * w) * \exp(I * (2 * (\pi) * w) * t) * (((\exp(-2 * y11\text{Sol} * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))))) * (- \\ & ((a) * (2 * (\pi) * w) + z1\text{Sol} / (I * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(- \\ & 2 * y11\text{Sol} * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) + 1))) * \exp(y11\text{Sol} * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) + (- \\ & ((a) * (2 * (\pi) * w) + z1\text{Sol} / (I * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(-2 * y11\text{Sol} * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) + 1))) * \exp(- \\ & y11\text{Sol} * (\text{sqrt}(I * ((2 * (\pi) * w) / ((\text{mu}3 / \text{rho})))) + z1\text{Sol} / (I * (2 * (\pi) * w))))); \end{aligned}$$

$$\text{bond11}(n) = y11\text{Sol};$$

$$\text{bond22}(n) = y22\text{Sol};$$

$$\begin{aligned} \text{dpactive}(n) = & \text{ss} * (((2.07 + (12 * \text{mu} * (Q) * a^2 * \pi * w * \cos(2 * \pi * w * 0)) / ((12 * \text{mu} * (Q) * a^2 * \pi * w * \cos(2 * \pi * w * 0)) + (\\ & 4 * (\text{hg})^2 * \text{ss} * y3 * 2 * \pi * \text{Rave})))) * y3 * \text{Lactive} / \text{hg} + ((12 * \text{mu} * Q * a^2 * \pi * w * \cos(2 * \pi * w * 0) * \text{Lactive}) / (2 * \pi * \text{Rave} \\ & * (\text{hg})^3)); \end{aligned}$$

$$\text{kk} = z_k * (\text{abs}(\text{dpactive}(n)) / (\text{rho} * \text{Lactive}) + (\text{abs}(\text{dpactive}(n)) / (\text{rho} * \text{Lactive})) * I);$$

```

S:=numeric::fsolve([ 2*(pi)*Rave*(      (((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1)))*(exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1 -
1))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) - ((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*(exp(-(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1 -
1))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) + (y1*z)/((2*(pi)*w)*I)      +(-(y1 - y2)*(((exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1) + (-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1) + z/(2*(pi)*w)*I))      +((((exp(-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+exp(-
hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))))*(exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) -
exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y2))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) - ((-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+exp(-hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))))*(exp(-
hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) - exp(-
(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y2))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) + (z*(hg - y2))/((2*(pi)*w)*I))
-(a)*(2*(pi)*w)*(25*pi*((dp)^2-(dr)^2-2*pi*Rave*hg) ,      (((exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1)))*exp(y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w)))      -      (((exp(-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+exp(-
(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))))*exp(y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+exp(-(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(-
y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w)))      ,      (y2-y1)-
2*ys*sign(cos(2*(pi)*(w)*t) )/ (rho*z*exp(I*(2*(pi)*w)*t) -rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t)
*(((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1)))*exp(y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w))) l, [y1=0..hg,y2=0..hg,z=-
kk..kk],UnrestrictedSearch);

```

```

y1Sol := y1 | S[1];

```

```

y2Sol := y2 | S[2];

```

```

zSol := z | S[3]; oo(n):=zSol*rho;

```

```

QN(n):=2*pi*Rave*((pSol)/(1i*(2*pi*w))*(hg) + ((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(1i*(2*pi*w)))-
((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(1i*(2*pi*w))))*(1-

```

$$\exp((hg)*(\sqrt{1i*(2*pi*w)/((mu323/rho))}))/(\exp((hg)*(\sqrt{1i*(2*pi*w)/((mu323/rho))}))- \exp(- (hg)*(\sqrt{1i*(2*pi*w)/((mu323/rho))}))))*(\exp((\sqrt{1i*(2*pi*w)/((mu323/rho))})*(hg)) - 1)/(\sqrt{1i*(2*pi*w)/((mu323/rho))}) - (((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(1i*(2*pi*w)))*(1 - \exp((hg)*(\sqrt{1i*(2*pi*w)/((mu323/rho))}))/(\exp((hg)*(\sqrt{1i*(2*pi*w)/((mu323/rho))}))- \exp(- (hg)*(\sqrt{1i*(2*pi*w)/((mu323/rho))}))))*(1/\exp((\sqrt{1i*(2*pi*w)/((mu323/rho))})*(hg))- 1))/(\sqrt{1i*(2*pi*w)/((mu323/rho))})-(a)*(2*pi*w)*((Q));$$

$$\begin{aligned} Qmr1:= & 2*(pi)*Rave*((((\exp(-2*y1Sol*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))))*(- (a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(\exp(- 2*y1Sol*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))+1))*(\exp((\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))*y1Sol) - 1)/(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}) - ((-(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(\exp(- 2*y1Sol*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))+1))*(\exp(-(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))*y1Sol) - 1)/(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}) + (y1Sol*zSol)/((2*(pi)*w)*1i)) + (-y1Sol - y2Sol)*((\exp(- 2*y1Sol*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(\exp(- 2*y1Sol*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))+1))*\exp((\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))*y1Sol) + (- (a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(\exp(-2*y1Sol*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))+1))*\exp(- (\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))*y1Sol) + zSol/((2*(pi)*w)*1i)) + (((\exp(- 2*y2Sol*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))))*(- (a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(\exp(hg*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))- 2*y2Sol*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))))+\exp(- hg*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))))*(\exp(hg*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))) - \exp((\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))*y2Sol))/(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}) - ((-(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(\exp(hg*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))- 2*y2Sol*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))))+\exp(-hg*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))))*(\exp(- hg*(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))) - \exp(- (\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))*y2Sol))/(\sqrt{1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}) + (zSol*(hg - y2Sol))/((2*(pi)*w)*1i)) - (a)*(2*(pi)*w)*((Q); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} momentum1:= & (y2Sol-y1Sol)- 2*ys*sign(cos(2*(pi)*(w)*t))/(rho*zSol*\exp(I*(2*(pi)*w)*t) - rho*I*(2*(pi)*w)*\exp(I*(2*(pi)*w)*t) *(((\exp(-2*y1Sol*(\sqrt{I*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))))*(- (a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(\exp(- 2*y1Sol*(\sqrt{I*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))+1))*\exp(y1Sol*(\sqrt{I*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))) + (- (a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(\exp(-2*y1Sol*(\sqrt{I*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))+1))*\exp(- y1Sol*(\sqrt{I*((2*(pi)*w)/((mu/rho))}))+zSol/(I*(2*(pi)*w)))); \end{aligned}$$

bond1(n):=y1Sol;

bond2(n):=y2Sol;

if real(bond1(n))>0 and real(bond2(n))>0 and real(bond1(n))< hg/2 and real(bond2(n)) < hg and
 real(bond2(n)) > hg/2 and abs(Qmr1)<hb and abs(momentum1)< hb and real(bond11(n))< hg/2 and
 real(bond22(n)) < hg and real(bond22(n)) > hg/2 and abs(Qinactive1)<hb and abs(momentum11)< hb
 and real(bond11(n))>0 and real(bond22(n))>0 then

plug(n):=real(y2Sol -y1Sol);

gg(n):=pSol*rho*exp(I*2*pi*w*t);oo(n):=zSol*rho*exp(I*2*pi*w*t);

phaz(n):=arg(zSol);

zz(n):=zSol;

abz(n):=abs(zSol);

phazb(n):=arg(pSol);

```

xx(n):= a*sin(2*pi*w*t); vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t); Qmr(n):=Qmr1; momentum(n):=momentum1;
QN(n):=(2*pi*Rave*((pSol)/(I*(2*pi*w))*(hg) + (((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))-
((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))))*exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg)) -
1)/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))) - (((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))))*(1/exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg))-
1)/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-(a)*(2*pi*w)*(25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg));
plug1(n):=real(bond22(n) -bond11(n) );
gg(n):=pSol*rho*exp(I*2*pi*w*t);oo1(n):=z1Sol*rho*exp(I*2*pi*w*t);
phaz1(n):=arg(z1Sol );
zz1(n):=z1Sol;
abz1(n):=abs(z1Sol );
phazb(n):=arg(pSol );
xx(n):= a*sin(2*pi*w*t); vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t); Qinactive(n):=Qinactive1;
momentuminactive(n):=momentum11;
tt(n):=t/(1.0/w);
Fs :=10;
gamadaton(n):=-real(exp(2*pi*t*w*I)*((1.41*exp(-1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w +
(zSol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))/(exp(-2*1.41*y1Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) + 1) -
(1.41*exp(-2*1.41*y1Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*exp(1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w +
(zSol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))/(exp(-2*1.41*y1Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) + 1)));
gamadatoff(n):=-real(exp(2*pi*t*w*I)*((1.41*exp(-1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))*(- 2*a*pi*w +
(z1Sol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))/(exp(-2*1.41*y11Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)) + 1) -
(1.41*exp(-2*1.41*y11Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))*exp(1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))*(- 2*a*pi*w +
(z1Sol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))/(exp(-2*1.41*y11Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)) + 1)));
inr(n):=rho*real(I*((2*(pi)*w))*((((exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+zSol/(I*(2*(pi)*w)))))*exp(I*2*(pi)*w*t));

QQ(n):=0.25*(.25*(pi*dr^2)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t));QQmax:=0.25*(.25*(pi*dr^2)*a*2*pi*w);
AA2(n):=(.25*pi*((dpvalvec)^2);
Vv(n):=QQ(n)/AA2(n);Vvmax:=QQmax/AA2(n);
cd(n):=0.7;

dpvalve(n):=((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^(2));dpvalvevmax:=((1/2)*(rho)*(Vvmax^2)*(cd(n))^(2));
Fvalve(n):=((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^(2))*Agv;
m:=2/(1+2*nn);mm:=(1+2*nn);
cp:=(AA2(n))/(dpvalvevmax)^nn;

dpv(n):=( rh*( abs(QQ(n))/(cd(n)*cp) )^(m) );

```

AA(n):=cp*(dpv(n))ⁿⁿ;

if AA(n)<=AA2(n) then

dpv(n):=(rh*(abs(QQ(n))/(cd(n)*cp))^(m));

else

dpv(n):=dpvalve(n);

end;

Fv(n):=dpv(n)*Agv;

Pgasrel :=(P0*(va/(va-.25*pi*dr²*a*sin(2*pi*w*t)))^{1.3})-10⁵;

Fgasrel(n) :=((P0*(va/(va-.25*pi*dr²*a*sin(2*pi*w*t)))^{1.3})-10⁵)*((Agv)));

twallon(n):=(ss*ys+mu*gamadaton(n)); twalloff(n):=(ss*ys3+mu3*gamadatoff(n));

F3 := Fgasrel(n) +Fv(n) +ss*Fs ;

F4(n):=((ss*ys+mu*gamadaton(n))*2*pi*2*Rave*Lactive+(ss*ys3+mu3*gamadatoff(n))*2*pi*2*Rave*Linactive);

fdg(n) :=real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t)) ;

fdtotalsimniotoni(n):=A*(real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t)))+F3+F4(n);

fdtotalnew(n):=A*(real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (zz1(n))*exp(I*2*pi*w*t)))+F3+F4(n);

dptotalsimniotoni(n):=(real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t)));

dptotalnew(n):=(real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (zz1(n))*exp(I*2*pi*w*t))) ;

dpactive(n):=real(rho*(zSol)*exp(I*2*pi*w*t))*Lactive;

dpinactivebingham(n):=real(rho*Linactive* (zz1(n))*exp(I*2*pi*w*t));

dpinactivesimniotoni(n):=real(rho*Linactive* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t));

forceniotonis(n) :=real(rho*Lt*(A)* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t))+F3 ;

forcemrquasi(n) :=

((12*mu323*Q*a²*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Linactive*(A))/(2*pi*Rave*(hg)³))+((12*mu*Q*a²*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lactive*(A))/(2*pi*Rave*(hg)³))+
ss*((A)*((2.07+(12*mu*(Q)*a²*pi*w*cos(2*pi*w*t))/(12*mu*(Q)*a²*pi*w*cos(2*pi*w*t))+(.4*(hg)²*ss*ys*2*pi*Rave)))*ys*Lactive/hg)+F3 ;

forceniotoniq(n) :=((12*mu323*Q*a²*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt*(A))/(2*pi*Rave*(hg)³))+F3 ;

```

dpactive(n):=abs((rho*(zSol )*exp(I*2*pi*w*t))*Lactive)*cos(2*pi*w*t+arg((rho*(zSol))*Lactive));
dupt(n):=rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t)  *(((exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1)))exp(y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+zSol/(I*(2*(pi)*w)));
dupt(n):=rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t)  *(((exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1)))exp(y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+zSol/(I*(2*(pi)*w)));
n:=n+1; end_if;
end_for;

t:=1.0/w;
ss:= sign(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)); vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t); if vp(n)=0 then
ss:=sign(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*(t-10*stepsize)))end_if;
dpactive(n):=ss*(((2.07+(12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))/((12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))+
(4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+((12*mu*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Lactive)/(2*pi*Rave
*(hg)^3)) ;

dpn:=((12*mu323*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Lt*(A))/(2*pi*Rave*(hg)^3));
b:=numeric::fsolve((2*pi*Rave*((p)/(I*(2*pi*w)))*(hg) + (((a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w)))-
((((a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w))))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))))*(exp((sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho))))*(hg) -
1))/(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))) - (((((a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w))))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))))*(1/exp((sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho))))*(hg))-
1))/(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho))))-(a)*(2*pi*w)*(0.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg)),p=dpn);

pSol := p | b[1];
QN(n):=(2*pi*Rave*((pSol)/(I*(2*pi*w)))*(hg) + (((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))-
((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w))))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))))*(exp((sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho))))*(hg) -
1))/(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))) - (((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w))))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))))*(1/exp((sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho))))*(hg))-
1))/(sqrt(I*(2*pi*w))/((mu323/rho))))-(a)*(2*pi*w)*(0.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg));

pp(n):=pSol;
dpinactive(n):=ss*(((2.07+(12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))/((12*mu3*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0
)))+(4*(hg)^2*ss*ys3*2*pi*Rave))))*ys3*Linactive/hg)+((12*mu3*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Linactive)/
(2*pi*Rave*(hg)^3)) ;

```

kk:=zkk*(abs(dpinactive(n))/(rho*Linactive)+(abs(dpinactive(n))/(rho*Linactive))*I);

S:=numeric::fsolve([2*(pi)*Rave*((((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+1)))*(exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y1 -
1))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) - (((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+1))*(exp(-(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y1 -
1))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) + (y1*z)/((2*(pi)*w)*I)) +(-(y1 - y2)*(((exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+1)))*exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y1) + (-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+1))*exp(-
(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y1) + z/((2*(pi)*w)*I)) +((((exp(-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+exp(-
hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) -
exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y2))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) - ((-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+exp(-hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*exp(-
hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) - exp(-
(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y2))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) + (z*(hg - y2))/((2*(pi)*w)*I))
-(a)*(2*(pi)*w)*(0.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg) , (((exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+1)))*exp(y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+1))*exp(-
y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w)))) - (((exp(-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+exp(-
(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*exp(y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+exp(-(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*exp(-
y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w)))) , (y2-y1)-
2*ys3*sign(cos(2*(pi)*(w)*t))/(rho*z*exp(I*(2*(pi)*w)*t) -rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t)
*(((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+1)))*exp(y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+1))*exp(-
y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w))))], [y1=0..hg,y2=0..hg,z=-
kk..kk],UnrestrictedSearch);

y11Sol := y1 | S[1];

y22Sol := y2 | S[2];

z1Sol := z | S[3]; oo1(n):=z1Sol*rho;

QN(n):=2*pi*Rave*((pSol)/(1i*(2*pi*w))*(hg) + (((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(1i*(2*pi*w)))-

```

Qinactive1:= 2*(pi)*Rave*(
((((exp(-2*y11Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+z1Sol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y11Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+1)))*(exp((sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y11Sol -
1))/(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) - (((a)*(2*(pi)*w)+z1Sol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y11Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+1))*(exp(-(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y11Sol -
1))/(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) + (y11Sol*z1Sol)/((2*(pi)*w)*1i)) +(-(y11Sol - y22Sol)*((exp(-
2*y11Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z1Sol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y11Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+1)))*exp((sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y11Sol) + (-
((a)*(2*(pi)*w)+z1Sol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y11Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+1))*exp(-
(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y11Sol) + z1Sol/((2*(pi)*w)*1i)) +((((exp(-
2*y22Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+z1Sol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))-
2*y22Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+exp(-
hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*exp(hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) -
exp((sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y22Sol))/(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) - ((
((a)*(2*(pi)*w)+z1Sol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))-
2*y22Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+exp(-hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*exp(-
hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) - exp(-
(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))*y22Sol))/(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))) + (z1Sol*(hg -
y22Sol))/((2*(pi)*w)*1i)) - (a)*(2*(pi)*w)*(Q);
momentum11:= (y22Sol-y11Sol)- 2*ys3*sign(cos(2*(pi)*(w)*t) / (rho*z1Sol*exp(I*(2*(pi)*w)*t) -
rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t) *(((exp(-2*y11Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+z1Sol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y11Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+1)))*exp(y11Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+z1Sol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y11Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho)))))+1))*exp(-
y11Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu3/rho))))+z1Sol/(I*(2*(pi)*w))));

```

```
bond11(n):=y11Sol;  
bond22(n):=y22Sol;
```

$$\text{dpactive}(n) := \text{ss}(((2.07 + (12 * \mu * (Q) * a^2 * \pi * w * \cos(2 * \pi * w * 0)) / ((12 * \mu * (Q) * a^2 * \pi * w * \cos(2 * \pi * w * 0)) + (4 * (hg)^2 * \text{ss} * y_s^2 * \pi * \text{Rave})))) * y_s * \text{Lactive} / hg) + ((12 * \mu * Q * a^2 * \pi * w * \cos(2 * \pi * w * 0) * \text{Lactive}) / (2 * \pi * \text{Rave} * (hg)^3)) ;$$

$$\mathbf{k} \mathbf{k} := \mathbf{z} \mathbf{k} * (\text{abs}(\text{dpactive}(\mathbf{n})) / (\text{rho} * \text{Lactive})) + (\text{abs}(\text{dpactive}(\mathbf{n})) / (\text{rho} * \text{Lactive})) * \mathbf{I};$$

```

S:=numeric::fsolve([ 2*(pi)*Rave*(      (((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1)))*(exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1 -
1))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) - ((-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*(exp(-(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1 -
1))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) + (y1*z)/((2*(pi)*w)*I))      +(-(y1 - y2)*(((exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1) + (-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1) + z/((2*(pi)*w)*I))      +((((exp(-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+exp(-
hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) -
exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y2))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) - ((-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+exp(-hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(-
hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) - exp(-
(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y2))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) + (z*(hg - y2))/((2*(pi)*w)*I))
-(a)*(2*(pi)*w)*(.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg) ,      (((exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1)))*exp(y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w))))      -      (((exp(-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+exp(-
(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))-
2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+exp(-(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(-
y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w))))      ,      (y2-y1)-
2*ys*sign(cos(2*(pi)*(w)*t) )/ (rho*z*exp(I*(2*(pi)*w)*t) -rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t)
*(((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1)))*exp(y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w)))) ], [y1=0..hg,y2=0..hg,z=-
kk..kk],UnrestrictedSearch);

```

y1Sol := y1 | S[1];

y2Sol := y2 | S[2];

zSol := z | S[3]; oo(n):=zSol*rho;

```

QN(n):=2*pi*Rave*((pSol)/(1i*(2*pi*w)))*(hg) + ((-(a)*(2*pi*w)+(pSol)/(1i*(2*pi*w)))-
((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(1i*(2*pi*w))))*(1-
exp((hg)*(sqrt(1i*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(1i*(2*pi*w))/((mu323/rho)))))-exp(-

```

$$\begin{aligned} & (hg) * (\sqrt{1i * (2 * \pi * w) / ((\mu_{323} / \rho))}) * (\exp((\sqrt{1i * (2 * \pi * w) / ((\mu_{323} / \rho))}) * (hg)) - \\ & 1) / (\sqrt{1i * (2 * \pi * w) / ((\mu_{323} / \rho))}) - (((a * (2 * \pi * w) + pSol) / (1i * (2 * \pi * w))) * (1 - \\ & \exp((hg) * (\sqrt{1i * (2 * \pi * w) / ((\mu_{323} / \rho))})) / (\exp((hg) * (\sqrt{1i * (2 * \pi * w) / ((\mu_{323} / \rho))})) - \exp(- \\ & (hg) * (\sqrt{1i * (2 * \pi * w) / ((\mu_{323} / \rho))})) * (1 / \exp((\sqrt{1i * (2 * \pi * w) / ((\mu_{323} / \rho))}) * (hg)) - \\ & 1) / (\sqrt{1i * (2 * \pi * w) / ((\mu_{323} / \rho))})) - (a * (2 * \pi * w) * (Q)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Qmr1 := & 2 * (\pi) * Rave * ((((\exp(-2 * y1Sol * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))))) * (- \\ & ((a * (2 * (\pi) * w) + zSol / (1i * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(- \\ & 2 * y1Sol * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))))) + 1))) * (\exp((\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))})) * y1Sol) - \\ & 1) / (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))})) - (((a * (2 * (\pi) * w) + zSol / (1i * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(- \\ & 2 * y1Sol * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))))) + 1))) * (\exp(-(\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))})) * y1Sol) - \\ & 1) / (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))})) + (y1Sol * zSol) / ((2 * (\pi) * w) * 1i) + (- (y1Sol - y2Sol) * (((\exp(- \\ & 2 * y1Sol * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))))) * (-((a * (2 * (\pi) * w) + zSol / (1i * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(- \\ & 2 * y1Sol * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))))) + 1))) * \exp((\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))})) * y1Sol) + (- \\ & ((a * (2 * (\pi) * w) + zSol / (1i * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(-2 * y1Sol * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))))) + 1))) * \exp(- \\ & (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))})) * y1Sol) + zSol / ((2 * (\pi) * w) * 1i))) + (((\exp(- \\ & 2 * y2Sol * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))))) * (- \\ & ((a * (2 * (\pi) * w) + zSol / (1i * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(hg * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))})) - \\ & 2 * y2Sol * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))))) + \exp(- \\ & hg * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))}))) * (\exp(hg * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))}))) - \\ & \exp((\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))})) * y2Sol)) / (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))})) - ((- \\ & ((a * (2 * (\pi) * w) + zSol / (1i * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(hg * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))}))) - \\ & 2 * y2Sol * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))}))) + \exp(-hg * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))}))) * (\exp(- \\ & hg * (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))}))) - \exp(- \\ & (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))})) * y2Sol)) / (\sqrt{1i * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))})) + (zSol * (hg - \\ & y2Sol) / ((2 * (\pi) * w) * 1i))) - (a * (2 * (\pi) * w) * (Q); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} momentum1 := & (y2Sol - y1Sol) - 2 * ys * \text{sign}(\cos(2 * (\pi) * w * t) / (\rho * zSol * \exp(I * (2 * (\pi) * w) * t) - \\ & \rho * I * (2 * (\pi) * w) * \exp(I * (2 * (\pi) * w) * t) * (((\exp(-2 * y1Sol * (\sqrt{I * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))))) * (- \\ & ((a * (2 * (\pi) * w) + zSol / (I * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(- \\ & 2 * y1Sol * (\sqrt{I * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))))) + 1))) * \exp(y1Sol * (\sqrt{I * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))}))) + (- \\ & ((a * (2 * (\pi) * w) + zSol / (I * (2 * (\pi) * w))) / (\exp(-2 * y1Sol * (\sqrt{I * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))))) + 1))) * \exp(- \\ & y1Sol * (\sqrt{I * ((2 * (\pi) * w) / ((\mu / \rho))}))) + zSol / (I * (2 * (\pi) * w)))); \end{aligned}$$

$$\text{bond1}(n) := y1Sol;$$

$$\text{bond2}(n) := y2Sol;$$

if real(bond1(n)) > 0 and real(bond2(n)) > 0 and real(bond1(n)) < hg/2 and real(bond2(n)) < hg and
real(bond2(n)) > hg/2 and abs(Qmr1) < hb and abs(momentum1) < hb and real(bond11(n)) < hg/2 and
real(bond22(n)) < hg and real(bond22(n)) > hg/2 and abs(Qinactive1) < hb and abs(momentum11) < hb
and real(bond11(n)) > 0 and real(bond22(n)) > 0 then

$$\text{plug}(n) := \text{real}(y2Sol - y1Sol);$$

$$\text{gg}(n) := pSol * \rho * \exp(I * 2 * \pi * w * t); oo(n) := zSol * \rho * \exp(I * 2 * \pi * w * t);$$

$$\text{phaz}(n) := \text{arg}(zSol);$$

$$\text{zz}(n) := zSol;$$

$$\text{abz}(n) := \text{abs}(zSol);$$

$$\text{phazb}(n) := \text{arg}(pSol);$$

```

xx(n):= a*sin(2*pi*w*t); vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t); Qmr(n):=Qmr1; momentum(n):=momentum1;
QN(n):=(2*pi*Rave*((pSol)/(I*(2*pi*w))*(hg) + ((-(a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))-
((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))))))*(exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg)) -
1)/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))) - (((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))))))*(1/exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))*(hg))-
1)/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu323/rho))))-(a)*(2*pi*w)*(.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg));
plug1(n):=real(bond22(n) -bond11(n) );
gg(n):=pSol*rho*exp(I*2*pi*w*t);oo1(n):=z1Sol*rho*exp(I*2*pi*w*t);
phaz1(n):=arg(z1Sol );
zz1(n):=z1Sol;
abz1(n):=abs(z1Sol );
phazb(n):=arg(pSol );
xx(n):= a*sin(2*pi*w*t); vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t); Qinactive(n):=Qinactive1;
momentuminactive(n):=momentum11;
tt(n):=t/(1.0/w);
Fs :=10;
gamadaton(n):=-real(exp(2*pi*t*w*I)*((1.41*exp(-1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu))))*(- 2*a*pi*w +
(zSol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))/(exp(-2*1.41*y1Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) + 1) -
(1.41*exp(-2*1.41*y1Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*exp(1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w +
(zSol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))/(exp(-2*1.41*y1Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) + 1)));
gamadatoff(n):=-real(exp(2*pi*t*w*I)*((1.41*exp(-1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3))))*(- 2*a*pi*w +
(z1Sol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))/(exp(-2*1.41*y11Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)) + 1) -
(1.41*exp(-2*1.41*y11Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))*exp(1.41*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))*(- 2*a*pi*w +
(z1Sol*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)))/(exp(-2*1.41*y11Sol*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu3)) + 1)));
inr(n):=rho*real(I*((2*(pi)*w))*((((exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+zSol/(I*(2*(pi)*w)))))*exp(I*2*(pi)*w*t));

QQ(n):=0.25*(.25*(pi*dr^2)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t));QQmax:=0.25*(.25*(pi*dr^2)*a*2*pi*w);
AA2(n):=(.25*pi*((dpvalvec)^2);
Vv(n):=QQ(n)/AA2(n);Vvmax:=QQmax/AA2(n);
cd(n):=0.7;
dpvalve(n):=((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^-2);dpvalvevmax:=((1/2)*(rho)*(Vvmax^2)*(cd(n))^-2);
Evalve(n):=((1/2)*(rho)*(Vv(n)^2)*(cd(n))^-2))*Agv;
m:=2/(1+2*nn); mm:=(1+2*nn);
cp:=(AA2(n))/(dpvalvevmax)^nn;
dpv(n):=( rh*((QQ(n))/(cd(n)*cp) )^(m) );
AA(n):=cp*(dpv(n))^nn;

if AA(n)<=AA2(n) then

```

dpv(n):=(rh*((QQ(n))/(cd(n)*cp))^(m));

else

dpv(n):=dpvalve(n);

end;

Fv(n):=dpv(n)*Agv;

Pgasrel :=(P0*(va/(va-.25*pi*dr^2*a*sin(2*pi*w*t)))^1.3)-10^5;

Fgasrel(n) :=((P0*(va/(va-.25*pi*dr^2*a*sin(2*pi*w*t)))^1.3)-10^5)*((Agv));

twallon(n):=(ss*ys+mu*gamadaton(n)); twalloff(n):=(ss*ys3+mu3*gamadatoff(n));

F3 := Fgasrel(n) +Fv(n) +ss*Fs ;

F4(n):=((ss*ys+mu*gamadaton(n))*2*pi^2*Rave*Lactive+(ss*ys3+mu3*gamadatoff(n))*2*pi^2*Rave*Linactive);

fdg(n) :=real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t)) ;

fdtotalsimniotoni(n):=A*(real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t)))+F3+F4(n);

fdtotalnew(n):=A*(real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (zz1(n))*exp(I*2*pi*w*t)))+F3+F4(n);

dptotalsimniotoni(n):=(real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t)));

dptotalnew(n):=(real(rho*Lactive* (zz(n))*exp(I*2*pi*w*t))+real(rho*Linactive* (zz1(n))*exp(I*2*pi*w*t))) ;

dpactive(n):=real(rho*(zSol)*exp(I*2*pi*w*t))*Lactive;

dpinactivebingham(n):=real(rho*Linactive* (zz1(n))*exp(I*2*pi*w*t));

dpinactivesimniotoni(n):=real(rho*Linactive* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t));

forceniotonis(n) :=real(rho*Lt*(A)* (pSol)*exp(I*2*pi*w*t))+F3 ;

forcemrquasi(n) :=

((12*mu323*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Linactive*(A))/(2*pi*Rave*(hg)^3))+((12*mu*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lactive*(A))/(2*pi*Rave*(hg)^3))+

ss*((A)*((2.07+(12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))/((12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t))+(.4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+F3 ;

forceniotoniq(n) :=((12*mu*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Lt*(A))/(2*pi*Rave*(hg)^3))+F3 ;

dpactive(n):=abs((rho*(zSol)*exp(I*2*pi*w*t))*Lactive)*cos(2*pi*w*t+arg((rho*(zSol))*Lactive));

dupt(n):=rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t) *(((exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+zSol/(I*(2*(pi)*w)));

end_if;

A := matrix(1, n):

```
print("##### t
#####");
print( Unquoted,"t= ");
```

```
for i from 1 to n do A[1, i]:=tt(i): end_for:
print(A);
print("##### dpactive
#####");
print( Unquoted,"dpactive= ");
```

```
for i from 1 to n do A[1, i]:=-dpactive(i): end_for:
print(A);
print("##### x
#####");
print( Unquoted,"x= ");
```

```
for i from 1 to n do A[1, i]:=xx(i): end_for:
print(A);
```

```
print("##### v
#####");
print( Unquoted,"v= ");
```

```
for i from 1 to n do A[1, i]:=vp(i): end_for:
print(A);
print("##### tnbwallon(n)
#####");
print( Unquoted,"tnbwallon= ");
```

```
for i from 1 to n do A[1, i]:=(twallon(i)): end_for:
print(A);print("##### tnbwalloff(n)
#####");
print( Unquoted,"tnbwalloff= ");
```

```
for i from 1 to n do A[1, i]:=(twalloff(i)): end_for:
print(A);print("##### ftwalltotal(n)
#####");
print( Unquoted,"ftwalltotal= ");
```

```

for i from 1 to n do A[1, i]:=F4(i): end_for:
print(A);
print("##### fdttotalnew(n)
#####");
print( Unquoted,"fdt= ");

```

```

for i from 1 to n do A[1, i]:=-fdtotalnew(i): end_for:
print(A);
print("##### dpttotalnew(n)
#####");
print( Unquoted,"dpt= ");

```

```

for i from 1 to n do A[1, i]:=-dpttotalnew(i): end_for:
print(A);
print("##### Fgasrel
#####");
print( Unquoted,"fdt= ");

```

```

for i from 1 to n do A[1, i]:=Fgasrel(i): end_for:
print(A);
print("##### Fv
#####");
print( Unquoted,"fdt= ");

```

```

for i from 1 to n do A[1, i]:=Fv(i): end_for:
print(A);

```

```

print("##### plug
#####");
print( Unquoted,"(plug)= ");
for i from 1 to n do A[1, i]:=plug(i)/hg: end_for:
print(A);

```

```

print("##### inr
#####");
print( Unquoted,"(inr)= ");
for i from 1 to n do A[1, i]:=inr(i): end_for:
print(A);

```

ضمیمه ۵: حل میدان جریان ناپایا

```

rho:=3500;
w:=5;
hg:=0.003;
ys:=.0001;
a:=.025;
t:=0/(4.01*w);
d:=0.0181;
Rave:=d/2+hg/2;
dp:=0.03;
dr:=0.021;
mu:=.5;

zk:=5;
Lt:=.042;
Lactive:=0.008;
Linactive:=0.034;
hb:=10^-8;
P0:=341538.46;
pi:=3.1415926535897932384626433832795;
Q:=.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg;
A:=.25*pi*((dp)^2-(dr)^2);
Agv:=.25*pi*((dr)^2);

v:=0;
n:=1;

stepsize:=1/(400*w);

ss:= sign(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t));

b:=numeric::fsolve((2*pi*Rave*((p)/(I*(2*pi*w)))*(hg) + (((a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w)))-
((((a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w))))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu/rho)))))))*(exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu/rho))))*(hg) -
1))/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu/rho)))) - (((((a)*(2*pi*w)+(p)/(I*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu/rho)))))))*(1/exp((sqrt(I*(2*pi*w)/((mu/rho))))*(hg))-
1))/(sqrt(I*(2*pi*w)/((mu/rho))))-(a)*(2*pi*w)*(.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg),p);

pSol := p | b[1];

```

tt(n):=t;

xx(n):= a*sin(2*pi*w*t);

vp(n):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);

dpactive(n):=ss*(((2.07+(12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0))/((12*mu*(Q)*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)))+(4*(hg)^2*ss*ys*2*pi*Rave))))*ys*Lactive/hg)+((12*mu*Q*a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0)*Lactive)/(2*pi*Rave*(hg)^3)) ;

kk:=zk*(abs(dpactive(n))/(rho*Lactive)+(abs(dpactive(n))/(rho*Lactive))*I);

S:=numeric::fsolve([2*(pi)*Rave*((((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))))*(-((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1 - 1))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) - (((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1 - 1))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) + (y1*z)/(I*(2*(pi)*w)*I) +(-(y1 - y2)*((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1 + (-((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1 + z/(I*(2*(pi)*w)*I)) +((((exp(-2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+exp(-hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) - exp((sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y2))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) - ((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+exp(-hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(-hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) - exp(-(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y2))/(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) + (z*(hg - y2))/((2*(pi)*w)*I)) - (a)*(2*(pi)*w)*(.25*pi*((dp)^2-(dr)^2-2*pi*Rave*hg) , (((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w)))) - (((exp(-2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+exp(-hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(hg*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-2*y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+exp(-(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(-y2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w)))) , (y2-y1)-2*ys*sign(cos(2*(pi)*(w)*t))/ (rho*z*exp(I*(2*(pi)*w)*t) -rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t)*(((exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-

```

2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+z/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+z/(I*(2*(pi)*w)))) ], [y1=0..hg,y2=0..hg,z=-
kk..kk],UnrestrictedSearch);

```

```

y1Sol := y1 | S[1];

```

```

y2Sol := y2 | S[2];

```

```

zSol := z | S[3]; x1:=(y1Sol); x2:=(y2Sol); x3:=zSol; Qmr1:= 2*(pi)*Rave*(
(((exp(-
2*y1Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp((sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1Sol -
1))/(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) - (-(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1Sol -
1))/(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) + (y1Sol*zSol)/((2*(pi)*w)*1i)) +(-(y1Sol - y2Sol)*(((exp(-
2*y1Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp((sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1Sol + (-
(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y1Sol + zSol/((2*(pi)*w)*1i)) +(((exp(-
2*y2Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))*(-
(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))-
2*y2Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+exp(-
hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) -
exp((sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y2Sol))/(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) - ((-
(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))-
2*y2Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+exp(-hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(-
hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) - exp(-
(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))*y2Sol))/(sqrt(1i*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))) + (zSol*(hg -
y2Sol))/((2*(pi)*w)*1i)) - (a)*(2*(pi)*w)*(Q);
momentum1:= (y2Sol-y1Sol)- 2*ys*sign(cos(2*(pi)*(w)*t) )/ (rho*zSol*exp(I*(2*(pi)*w)*t) -
rho*I*(2*(pi)*w)*exp(I*(2*(pi)*w)*t) *(((exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+zSol/(I*(2*(pi)*w)))));
if real(x1)>0 and real(x2)>0 and real(x1)< hg/2 and real(x2) < hg and real(x2) > hg/2 and abs(Qmr1)<hb
and abs(momentum1)<hb then

```

```

yy:=0;

```

```

for y from 0 to real(x1) step .01*real(x1) do

```

```

by(n):=y;

```

```

inr(n):=real(I*((2*(pi)*w))*((((exp(-2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))*(-

```

```

((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(yy*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
yy*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+x3/(I*(2*(pi)*w))))*exp(I*2*(pi)*w*t));
uu(n):=(((((exp(-2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(yy*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
yy*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+x3/(I*(2*(pi)*w))))*exp(I*2*(pi)*w*t));
uu1:((((exp(-2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(yd*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
yd*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+x3/(I*(2*(pi)*w))))*exp(I*2*(pi)*w*t));
inr2(n):=real(2*pi*w*exp(2*pi*t*w*I)*(- (x3*I)/(2*pi*w) + (exp(-
1.4142135623730950488016887242097*yy*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w +
(x3*I)/(2*pi*w)))/(exp(-2*1.4142135623730950488016887242097*x1*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) + 1) +
(exp(-
2*1.4142135623730950488016887242097*x1*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*exp(1.414213562373095048801688
7242097*yy*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w + (x3*I)/(2*pi*w)))/(exp(-
2*1.4142135623730950488016887242097*x1*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) + 1))*I);
v:=uu(n)+v;
yd:=yy; trn1:=-mu*real(exp(2*pi*t*w*I)*((1.41421356237309504880168872420974*exp(-
1.41421356237309504880168872420974*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w +
(x3*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))/(exp(-
2*1.41421356237309504880168872420974*x1*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) + 1) -
(1.41421356237309504880168872420974*exp(-
2*1.41421356237309504880168872420974*x1*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*exp(1.41421356237309504880168
872420974*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w + (x3*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))/(exp(-
2*1.41421356237309504880168872420974*x1*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) + 1)));
tnb(n):=ss*ys+trn1; gamadat(n):=trn1/mu;
mus(n):=tnb(n)/gamadat(n); muapp(n):=real(tnb(n))/real(gamadat(n)); uu(0):=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*0);
g(n):=((real(uu(n+1)))-(real(uu(n)))/(0.01*x1); n:=n+1; yy:=yy+(0.01*x1);
end_for:
for y from real(x1) to real(x2) step 0.01*real(x2-x1) do

by(n):=y;
uu(n):((((exp(-2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+x3/(I*(2*(pi)*w))))*exp(I*2*(pi)*w*t));
inr(n):=real(I*((2*(pi)*w))*((((exp(-2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+x3/(I*(2*(pi)*w))))*exp(I*2*(pi)*w*t));
inr2(n):=real(-2*pi*w*exp(2*pi*t*w*I)*(x3*I)/(2*pi*w) - (2*exp(-
1.4142135623730950488016887242097*x1*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w +

```

```

(x3*I)/(2*pi*w)))/(exp(-2*1.4142135623730950488016887242097*x1*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu))) + 1))*I);
v:=uu(n)+v; tnb(n):=ys;
gamadat(n):=.000001;g(n):=0; muapp(n):=ys/gamadat(n);
tnb(n):=ys;
n:=n+1;
end_for:
yy:=x2;
for y from real(x2) to real(hg) step .01*real(hg-x2) do

by(n):=y;
inr(n):=real(I*((2*(pi)*w))*(((((((exp(-2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-
2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+exp(-
(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(yy*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-
2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+exp(-(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(-
yy*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+x3/(I*(2*(pi)*w))))*exp(I*2*(pi)*w*t)));
uu(n):(((((((exp(-2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-
2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+exp(-
(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(yy*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-
2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+exp(-(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(-
yy*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+x3/(I*(2*(pi)*w))))*exp(I*2*(pi)*w*t)));
inr2(n):=real(2*pi*w*exp(2*pi*t*w*I)*(-(x3*I)/(2*pi*w) + (exp(-
1.4142135623730950488016887242097*yy*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w +
(x3*I)/(2*pi*w)))/(exp(-1.4142135623730950488016887242097*hg*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu))) +
exp(1.4142135623730950488016887242097*hg*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) -
2*1.4142135623730950488016887242097*x2*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))) + (exp(-
2*1.4142135623730950488016887242097*x2*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*exp(1.414213562373095048801688
7242097*yy*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w + (x3*I)/(2*pi*w)))/(exp(-
1.4142135623730950488016887242097*hg*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu))) +
exp(1.4142135623730950488016887242097*hg*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) -
2*1.4142135623730950488016887242097*x2*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu))))*I);yd:=yy; trn2:=-
mu*real(exp(2*pi*t*w*I)*((1.41421356237309504880168872420974*exp(-
1.41421356237309504880168872420974*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w +
(x3*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))/(exp(-
1.41421356237309504880168872420974*hg*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu))) +
exp(1.41421356237309504880168872420974*hg*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) -
2*1.41421356237309504880168872420974*x2*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))) -
(1.41421356237309504880168872420974*exp(-
2*1.41421356237309504880168872420974*x2*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*exp(1.41421356237309504880168
872420974*yd*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))*(- 2*a*pi*w + (x3*I)/(2*pi*w))*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))/(exp(-
1.41421356237309504880168872420974*hg*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu))) +
exp(1.41421356237309504880168872420974*hg*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)) -
2*1.41421356237309504880168872420974*x2*sqrt(((pi*rho*w*I)/mu)))));

```

```

tnb(n):=ss*ys-trn2;gamadat(n):=trn2/mu;g(n):=((real(uu(n)))-(real(uu(n-1))))/(.01*(hg-
x2));muapp(n):=real(tnb(n))/real(gamadat(n)+.00001);
yy:=yy+.01*(hg-x2);phazb(n):=arg(uu(n))-arg(a*2*pi*w*exp(I*2*(pi)*w*t));
n:=n+1;

end_for: n:=n-1; by(n):=hg; yy:=hg; inr(n):=real(I*((2*(pi)*w))*((((exp(-
2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-
2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+exp(-
(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(yy*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-
2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+exp(-(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(-
yy*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+x3/(I*(2*(pi)*w))))*exp(I*2*(pi)*w*t));uu(n):=((((exp(-
2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+1))*exp(-
x1*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+x3/(I*(2*(pi)*w))))*exp(I*2*(pi)*w*t));
uu(n):=((((exp(-2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-
2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+exp(-
(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(yy*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-
2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+exp(-(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(-
yy*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+x3/(I*(2*(pi)*w))))*exp(I*2*(pi)*w*t));
inr2(n):=real(2*pi*w*exp(2*pi*t*w*I)*(-(x3*I)/(2*pi*w)+(exp(-
1.4142135623730950488016887242097*yy*sqrt((pi*rho*w*I)/mu))*(-2*a*pi*w+(x3*I)/(2*pi*w)))/(exp(-
1.4142135623730950488016887242097*hg*sqrt((pi*rho*w*I)/mu))+
exp(1.4142135623730950488016887242097*hg*sqrt((pi*rho*w*I)/mu)-
2*1.4142135623730950488016887242097*x2*sqrt((pi*rho*w*I)/mu)))+(exp(-
2*1.4142135623730950488016887242097*x2*sqrt((pi*rho*w*I)/mu))*exp(1.41421356237309504880168872
42097*yy*sqrt((pi*rho*w*I)/mu))*(-2*a*pi*w+(x3*I)/(2*pi*w)))/(exp(-
1.4142135623730950488016887242097*hg*sqrt((pi*rho*w*I)/mu))+
exp(1.4142135623730950488016887242097*hg*sqrt((pi*rho*w*I)/mu)-
2*1.4142135623730950488016887242097*x2*sqrt((pi*rho*w*I)/mu))))*I);v:=uu(n)+v; uu1:=((((exp(-
2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-
2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+exp(-
(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(yd*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+(-
((a)*(2*(pi)*w)+x3/(I*(2*(pi)*w)))/(exp((hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))-
2*x2*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho)))))+exp(-(hg)*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))))*exp(-
yd*(sqrt(I*((2*(pi)*w))/((mu/rho))))+x3/(I*(2*(pi)*w))))*exp(I*2*(pi)*w*t));
yd:=yy; tnb(n):=ss*ys-trn2; gamadat(n):=trn2/mu;g(n):=((real(uu(n)))-(real(uu(n-1))))/(.01*(hg-
x2));muapp(n):=real(tnb(n))/real(gamadat(n));
QN(n):=2*pi*Rave*((pSol)/(1i*(2*pi*w))*(hg)+(-(a)*(2*pi*w)+(pSol)/(1i*(2*pi*w)))-
((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(1i*(2*pi*w))))*(1-
exp((hg)*(sqrt(1i*(2*pi*w))/((mu/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(1i*(2*pi*w))/((mu/rho)))))-exp(-

```

```

(hg)*(sqrt(1i*(2*pi*w)/((mu/rho)))))))*exp((sqrt(1i*(2*pi*w)/((mu/rho))))*(hg) -
1))/(sqrt(1i*(2*pi*w)/((mu/rho)))) - (((((a)*(2*pi*w)+(pSol)/(1i*(2*pi*w)))*(1-
exp((hg)*(sqrt(1i*(2*pi*w)/((mu/rho)))))/(exp((hg)*(sqrt(1i*(2*pi*w)/((mu/rho)))))-exp(-
(hg)*(sqrt(1i*(2*pi*w)/((mu/rho)))))))*(1/exp((sqrt(1i*(2*pi*w)/((mu/rho))))*(hg))-
1))/(sqrt(1i*(2*pi*w)/((mu/rho)))))*exp(I*2*(pi)*w*t);
Qmr1:= 2*(pi)*Rave*(
(((exp(-2*y1Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))))*(-
(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))+1)))*(exp((sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))*y1Sol -
1))/(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))) - ((-(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))+1)))*(exp(-(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))*y1Sol -
1))/(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))) + (y1Sol*zSol)/((2*(pi)*w)*1i)) + (-y1Sol - y2Sol)*((exp(-
2*y1Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))))*(-(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))+1)))*exp((sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))*y1Sol + (-
(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))+1))*exp(-
(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))*y1Sol + zSol/((2*(pi)*w)*1i)) + (((exp(-
2*y2Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))))*(-
(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))-
2*y2Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))))+exp(-
hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))))))*exp(hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))) -
exp((sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))*y2Sol)))/(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))) - ((-
(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(1i*(2*(pi)*w)))/(exp(hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))-
2*y2Sol*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))))+exp(-hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))))*exp(-
hg*(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))) - exp(-
(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))*y2Sol)))/(sqrt(1i*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))) + (zSol*(hg -
y2Sol)/((2*(pi)*w)*1i)))*exp(I*2*(pi)*w*t);
momentum1:= (y2Sol-y1Sol)- 2*ys*sign(cos(2*(pi)*(w)*t) )/ (rho*zSol*exp(I*2*(pi)*w*t) -
rho*I*2*(pi)*w)*exp(I*2*(pi)*w*t) *(((exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))))*(-
(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*2*(pi)*w)))/(exp(-
2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))+1)))*exp(y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu/rho)))))+(-
(a)*(2*(pi)*w)+zSol/(I*2*(pi)*w)))/(exp(-2*y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))+1))*exp(-
y1Sol*(sqrt(I*((2*(pi)*w)/((mu/rho))))+zSol/(I*2*(pi)*w))));
qp(n):=(a)*(2*pi*w)*((.25*pi*((dp)^2-(dr)^2)-2*pi*Rave*hg)*exp(I*2*(pi)*w*t);
A := matrix(1, n):
print("##### u
#####");
print( Unquoted,"(u)= ");for i from 1 to n do A[1,i]:=real(uu(i)); end_for- print(A);
print("##### y
#####");
print( Unquoted,"(y)= ");for i from 1 to n do A[1,i]:=by(i)/hg; end_for- print(A);
print("##### g
#####");
print( Unquoted,"(g)= ");
for i from 1 to n do A[1,i]:=real((g(i))); end_for- print(A);
print(rho*abs(v/n)*2*hg/mus(1));
print("##### gamadat
#####");

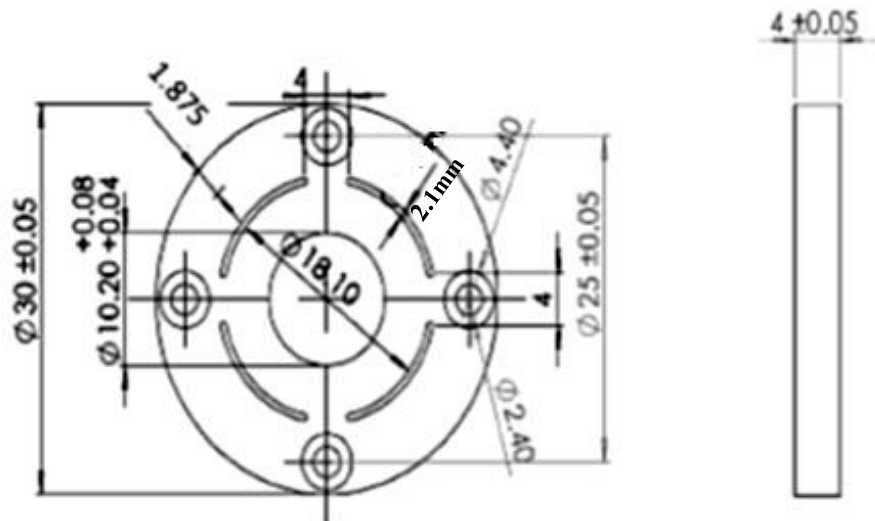
```

```

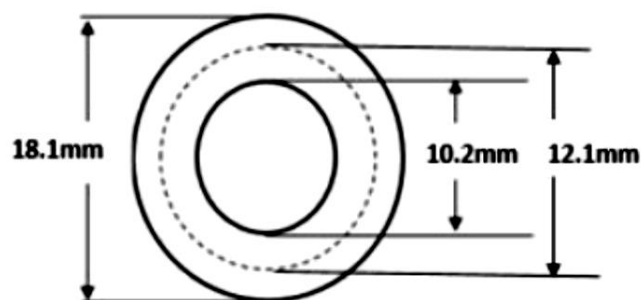
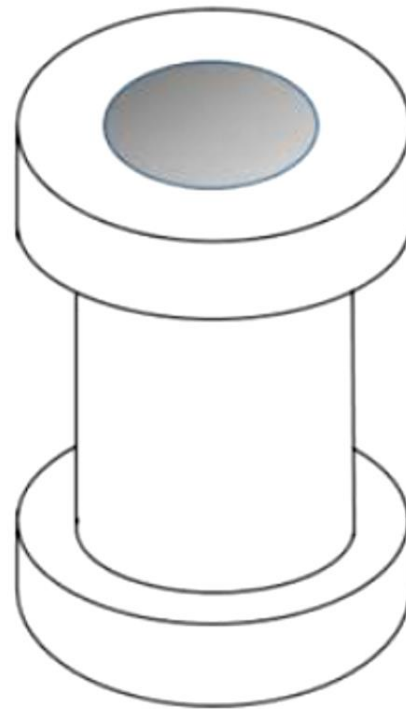
print( Unquoted,"(gamadat)= ");
for i from 1 to n do A[1,i]:=real(gamadat(i)): end_for- print(A);
print("##### tnb
#####");
print( Unquoted,"(tnb)= ");
for i from 1 to n do A[1,i]:=real(tnb(i)): end_for- print(A);
print("##### Re
#####");
print( Unquoted,"(Re)= ");
for i from 1 to n do A[1,i]:=real(rho*abs(v/n)*2*hg/muapp(1)): end_for- print(A);
print("##### Rek
#####");
print( Unquoted,"(Re)= ");
for i from 1 to n do A[1,i]:=sqrt(((rho*2*pi*w*hg^2/(2*muapp(1))))): end_for- print(A);
print("##### wemercly
#####");
print( Unquoted,"(Re)= ");
for i from 1 to n do A[1,i]:=(rho*2*pi*w*hg^2)/(2*muapp(1)): end_for-
print(A);print("##### muapp
#####");
print( Unquoted,"(muapp)= ");
for i from 1 to n do A[1,i]:=muapp(i): end_for- print(A);
print("##### ekhtelaf faz phaz sorat-
soratdivare #####");
print( Unquoted,"phi= ");
for i from 1 to n do A[1,i]:=(arg(uu(i))-arg(a*2*pi*w*exp(2*pi*w*t)))/pi: end_for-
print(A);print("##### ekhtelaf faz phaz
sorat-feshar#####");
print( Unquoted,"phi= ");
for i from 1 to n do A[1,i]:=(arg(-(rho*(zSol )*exp(I*2*pi*w*t))*Lactive)-arg(v/n))/pi: end_for- print(A);
print("##### inr
#####");
print( Unquoted,"(in)= ");
for i from 1 to n do A[1,i]:=rho*inr(i): end_for-
print(A);print("##### inr2
#####");
print( Unquoted,"(in2)= ");
for i from 1 to n do A[1,i]:=rho*inr2(i): end_for-
print(A);print("##### abs qp
#####");
print(QN(n));print(x1,x2,x3); print( Unquoted,"(qp)= ");
print(qp(n)); print( Unquoted,"(Qmr1)= ");print(Qmr1);print( Unquoted,"(vp(n))=
");print(a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t)*Q/(2*(pi)*Rave*hg)); end_if;

```

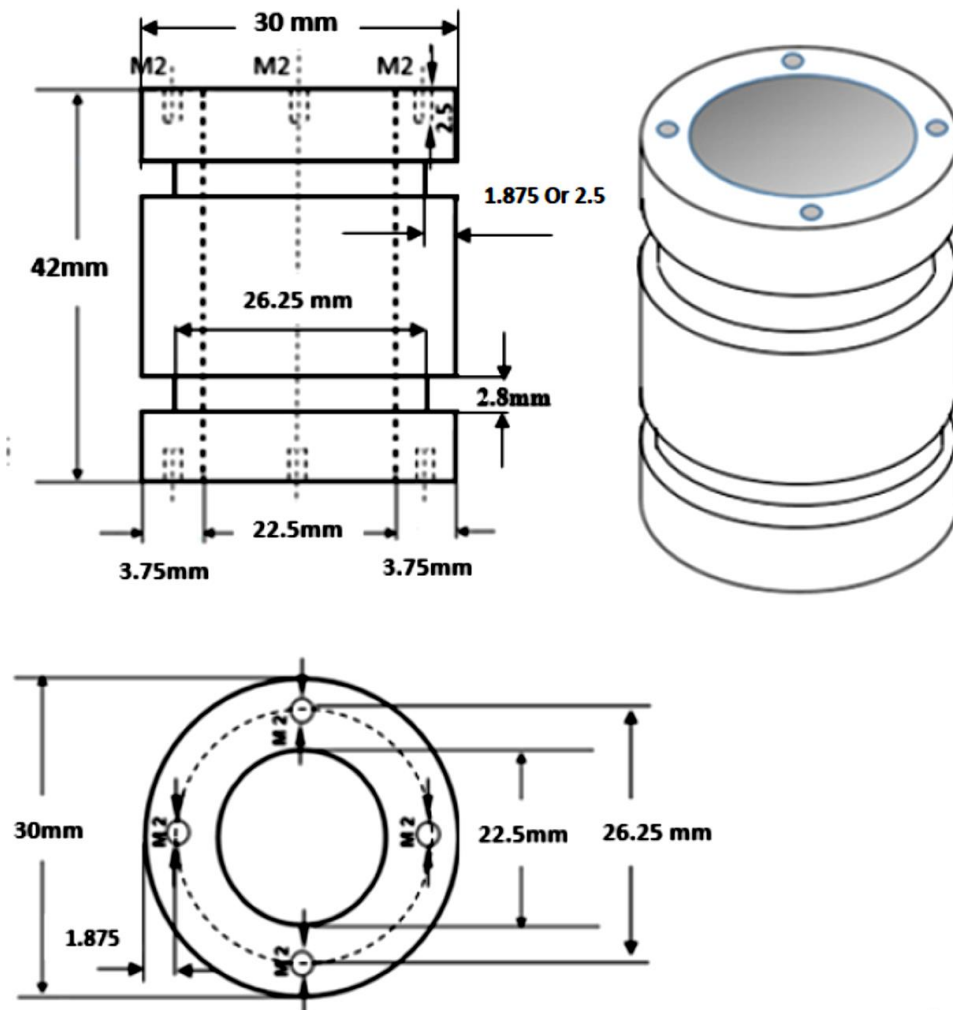
ضمیمه ۶: نقشه‌ها



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		TOLERANCE		DURABLE AND WEAR SHARP EDGES		ISOTHERMAL TREATING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE		REVISION	
DESIGN						Retainer			
CHKD									
APPVD									
MFG									
QA				MATERIAL: Stainless steel 304		DWG. NO.		A4	
				REVISION:		SCALE:		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DRESS AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION			
								Piston core					
NAME		SIGNATURE		DATE								TITLE	
DRAWN													
CHECKED													
APPROVED													
MFG.													
Q.A.						MATERIAL:		DWG. NO.		A4			
						ST-37							
						WEIGHT:		SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 1			



- [1] Guglielmino, E., Sireteanu, T., Stammers, C.W., Ghita, G. and Giuclea, M., 2008. *Semi-active suspension control: improved vehicle ride and road friendliness*. Springer Science & Business Media.
- [2] Melzner, K., Fleischer, J. and Odenbach, S., 2001. New developments in the investigation of magnetoviscous and viscoelastic effects in magnetic fluids. *MHD*, 37(3), pp.285-290.
- [3] Ghaffari, A., Hashemabadi, S.H. and Ashtiani, M., 2015. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26(8), pp.881-904.
- [4] White, J., Selig, C., Oakley, J., Anderson, M. and Bonazza, R., 2004. The Rayleigh-Taylor Instability at a Water/Magneto rheological Fluid Interface. In *International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing*.
- [5] Katiyar, A., Singh, A.N., Shukla, P. and Nandi, T., 2012. Rheological behavior of magnetic nanofluids containing spherical nanoparticles of Fe–Ni. *Powder Technology*, 224, pp.86-89.
- [6] Ocalan, M. and McKinley, G.H., 2012. Rheology and microstructural evolution in pressure-driven flow of a magnetorheological fluid with strong particle–wall interactions. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(9), pp.969-978.
- [7] Calarasu, D., Cotae, C. and Olaru, R., 1999. Magnetic fluid brake. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 201(1-3), pp.401-403.
- [8] Karakoc, K., Park, E.J. and Suleman, A., 2008. Design considerations for an automotive magnetorheological brake. *Mechatronics*, 18(8), pp.434-447.
- [9] Huang, J., Zhang, J.Q., Yang, Y. and Wei, Y.Q., 2002. Analysis and design of a cylindrical magneto-rheological fluid brake. *Journal of Materials Processing Technology*, 129(1-3), pp.559-562.
- [10] Bucci, F.R.A.N.C.E.S.C.O., Forte, P.A.O.L.A., Frendo, F.R.A.N.C.E.S.C.O. and Squarcini, R., 2013. A magnetorheological clutch for efficient automotive auxiliary device actuation. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 7(23), pp.62-74.
- [11] Wessling, L., 2011. Physical modeling of a clutch for heavy vehicles, Msc. Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden

- [12] B. Kavlicoglu, F. Gordaninejad, Y. Liu, X. Wang, and N. Cobanoglu, 2006, Magneto rheological Fluid Limited Slip Differential Clutch, *Composite and Intelligent Materials Laboratory*, Nevada.
- [13] Giuclea, M., Sireteanu, T., Stancioiu, D. and Stammers, C.W., 2004. Modelling of magnetorheological damper dynamic behaviour by genetic algorithms based inverse method. *Proc. R. Acad. Series A*, 5(1), p.5563.
- [14] Spencer, B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J., 1997. Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of engineering mechanics*, 123(3), pp.230-238.
- [15] Guðmundsson, K.H., 2011, Design of a Magneto rheological Fluid for an MR Prosthetic Knee Actuator with an Optimal Geometry, Phd Thesis, University of Iceland, Iceland,
- [16] Güth, D., Schamoni, M., Cording, D. and Maas, J., 2012, New technology for a high dynamical MRF-clutch for safe and energy-efficient use in powertrains.FISITA 2012 World Automotive Congress (27-30)
- [17] Nguyen, Q.H. and Choi, S.B., 2008. Optimal design of a vehicle magnetorheological damper considering the damping force and dynamic range. *Smart materials and Structures*, 18(1), p.015013.
- [18] Fang, F.F., Choi, H.J. and Jhon, M.S., 2009. Magnetorheology of soft magnetic carbonyl iron suspension with single-walled carbon nanotube additive and its yield stress scaling function. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 351(1), pp.46-51.
- [19] Ulicny, J.C., Snively, K.S., Golden, M.A. and Klingenberg, D.J., 2010. Enhancing magnetorheology with nonmagnetizable particles. *Applied Physics Letters*, 96(23), p.231903.
- [20] Laun, H.M., Kormann, C. and Willenbacher, N., 1996. Rheometry on magnetorheological (MR) fluids. *Rheologica acta*, 35(5), pp.417-432.
- [21] Park, Bong Jun, Fei Fei Fang, and Hyoung Jin Choi. "Magnetorheology: materials and application." *Soft Matter* 6, no. 21 (2010): 5246-5253.
- [22] Rankin, P.J., Horvath, A.T. and Klingenberg, D.J., 1999. Magnetorheology in viscoplastic media. *Rheologica Acta*, 38(5), pp.471-477.
- [23] Sim, H.H., Kwon, S.H. and Choi, H.J., 2013. Xanthan gum-coated soft magnetic carbonyl iron composite particles and their magnetorheology. *Colloid and Polymer Science*, 291(4),

pp.963-969..

[24] Mitsoulis, E., 2007. Flows of viscoplastic materials: models and computations. *Rheology reviews*, 2007, pp.135-178.

[25] Phillips, R.W., 1969. *Engineering applications of fluids with a variable yield stress* (Doctoral dissertation, University of California, Berkeley).

[26] Yang, G., Spencer, B.F., Carlson, J.D. and Sain, M.K., 2002. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering structures*, 24(3), pp.309-323.

[27] Bird, R.B., Armstrong, R.C. and Hassager, O., 1987. Dynamics of polymeric liquids. Vol. 1: Fluid mechanics.

[28] Sefidkar-Dezfouli, 2009, Magnetorheological fluid dampers: A review on structure design and analysis, MS Thesis, Azad University.

[29] Wang, D.H. and Liao, W.H., 2011. Magnetorheological fluid dampers: a review of parametric modelling. *Smart materials and structures*, 20(2), p.023001.

[30] Chae, Y., Ricles, J.M. and Sause, R., 2013. Modeling of a large-scale magneto-rheological damper for seismic hazard mitigation. Part I: Passive mode. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 42(5), pp.669-685.

[31] Poynor, J.C., 2001. *Innovative designs for magneto-rheological dampers* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).

[32] Ebrahimi, B., 2009. Development of hybrid electromagnetic dampers for vehicle suspension systems, PHD Thesis University of Waterloo, Ontario, Canada

[33] Wereley, N.M. and Pang, L., 1998. Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models. *Smart Materials and Structures*, 7(5), p.732.

[34] Sapiński, B. and Majdak, P., 2009. Test bed for electromagnetic generators powering MR rotary dampers. *Mechanics/AGH University of Science and Technology*, 28(4), pp.118-123.

[35] Alghamdi, A.A. and Olabi, A.G., 2012. NOVEL DESIGN CONCEPT OF MAGNETO RHEOLOGICAL DAMPER IN SQUEEZE MODE. In *International Conference on Experimental Mechanics* (Vol. 2607).

[36]] Wang, D.H. and Wang, T., 2009. Principle, design and modeling of an integrated relative

displacement self-sensing magnetorheological damper based on electromagnetic induction. *Smart Materials and Structures*, 18(9), p.095025.

[37] Yazid, I.I.M., Mazlan, S.A., Kikuchi, T., Zamzuri, H. and Imaduddin, F., 2014. Design of magnetorheological damper with a combination of shear and squeeze modes. *Materials & Design*, 54, pp.87-95.

[38] Wereley, N.M., Pang, L. and Kamath, G.M., 1998. Idealized hysteresis modeling of electrorheological and magnetorheological dampers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 9(8), pp.642-649.

[39] Ai, H.X., Wang, D.H. and Liao, W.H., 2006. Design and modeling of a magnetorheological valve with both annular and radial flow paths. *Journal of intelligent material systems and structures*, 17(4), pp.327-334.

[40] Grunwald, A. and Olabi, A.G., 2008. Design of magneto-rheological (MR) valve. *Sensors and Actuators A: Physical*, 148(1), pp.211-223.

[41] Brigley, M., Choi, Y.T., Wereley, N.M. and Choi, S.B., 2007. Magnetorheological isolators using multiple fluid modes. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18(12), pp.1143-1148.

[42] Wang, D.H., Ai, H.X. and Liao, W.H., 2009. A magnetorheological valve with both annular and radial fluid flow resistance gaps. *Smart Materials and Structures*, 18(11), p.115001.

[43] Hong, S.R., Choi, S.B., Choi, Y.T. and Wereley, N.M., 2005. Non-dimensional analysis and design of a magnetorheological damper. *Journal of Sound and Vibration*, 288(4), pp.847-863.

[44] Hong, S.R., Wereley, N.M., Choi, Y.T. and Choi, S.B., 2008. Analytical and experimental validation of a nondimensional Bingham model for mixed-mode magnetorheological dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 312(3), pp.399-417.

[45] Yoo, J.H. and Wereley, N.M., 2005. Nondimensional analysis of annular duct flow in magnetorheological/electrorheological dampers. *International Journal of Modern Physics B*, 19(07n09), pp.1577-1583.

[46] Dogruoz, M.B. 2000. "Fail-Safe, Semi-Active Controllable Magneto- Rheological Fluid (MRF) Shock Absorbers for Automotive Suspension Systems," MS Thesis, University of Nevada Reno, Department of Mechanical Engineering

- [47] Dogruoz, M.B., Wang, E.L., Gordaninejad, F. and Stipanovic, A.J., 2003. Augmenting heat transfer from fail-safe magneto-rheological fluid dampers using fins. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 14(2), pp.79-86.
- [48] Gordaninejad, F.A.R.A.M.A.R.Z. and Breese, D.G., 1999. Heating of magnetorheological fluid dampers. *Journal of intelligent material systems and structures*, 10(8), pp.634-645.
- [49] Stanway, R., Sproston, J.L. and Stevens, N.G., 1985. Non-linear identification of an electro-rheological vibration damper. *IFAC Proceedings Volumes*, 18(5), pp.195-200.
- [50] Stanway, R.S.J.L., Sproston, J.L. and Stevens, N.G., 1987. Non-linear modelling of an electro-rheological vibration damper. *Journal of Electrostatics*, 20(2), pp.167-184.
- [51] Gavin, H., Hoagg, J. and Dobossy, M., 2001, August. Optimal design of MR dampers. In *Proceedings of the US-Japan Workshop on Smart Structures for Improved Seismic Performance in Urban Regions* (Vol. 14, pp. 225-236).
- [52] Ahmadian, M. and Poynor, J.C., 2001. An evaluation of magneto rheological dampers for controlling gun recoil dynamics. *Shock and Vibration*, 8(3-4), pp.147-155.
- [53] Wang, Y., Xu, M. and Qiu, Y., 2005. The flow behaviors of MR fluids flowing through an orifice for damper designing. *Journal of intelligent material systems and structures*, 16(6), pp.511-516.
- [54] Aydar, G., Evrensel, C.A., Gordaninejad, F. and Fuchs, A., 2007. A low force magneto-rheological (MR) fluid damper: design, fabrication and characterization. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18(12), pp.1155-1160.
- [55] Olabi, A.G. and Grunwald, A., 2007. Design and application of magneto-rheological fluid. *Materials & design*, 28(10), pp.2658-2664.
- [56] Imaduddin, F., Mazlan, S.A. and Zamzuri, H., 2013. A design and modelling review of rotary magnetorheological damper. *Materials & Design*, 51, pp.575-591.
- [57] Sternberg, A., Zemp, R. and de la Llera, J.C., 2014. Multiphysics behavior of a magneto-rheological damper and experimental validation. *Engineering Structures*, 69, pp.194-205.
- [58] Li, J., Wang, D., Duan, J.A., He, H., Xia, Y. and Zhu, W., 2015. Structural design and control of a small-MRF damper under 50 N soft-landing applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(3), pp.612-619.
- [59] Mazlan, S.A., 2019. Design and Performance Analysis of Magnetorheological Valve for

Upside-Down Damper. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 63(2), pp.164-173.

[60] Kim, B.G., Yoon, D.S., Kim, G.W., Choi, S.B., Tan, A.S. and Sattel, T., 2020. Design of a Novel Magnetorheological Damper Adaptable to Low and High Stroke Velocity of Vehicle Suspension System. *Applied Sciences*, 10(16), p.5586.

[61] Yoo, J.H. and Wereley, N.M., 2002. Design of a high-efficiency magnetorheological valve. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 13(10), pp.679-685.

[62] Rosenfeld, N.C. and Wereley, N.M., 2004. Volume-constrained optimization of magnetorheological and electrorheological valves and dampers. *Smart Materials and Structures*, 13(6), p.1303.

[63] Nguyen, Q.H., Han, Y.M., Choi, S.B. and Wereley, N.M., 2007. Geometry optimization of MR valves constrained in a specific volume using the finite element method. *Smart Materials and Structures*, 16(6), p.2242.

[64] Nguyen, Q.H., Choi, S.B. and Wereley, N.M., 2008. Optimal design of magnetorheological valves via a finite element method considering control energy and a time constant. *Smart Materials and Structures*, 17(2), p.025024.

[65] Sefidkar-Dezfouli, S., 2014. *Design, Simulation, and Fabrication of a Lightweight Magneto Rheological Damper* (Doctoral dissertation, Applied Sciences: School of Mechatronic Systems Engineering).

[66] Parlak, Z., Engin, T., Ari, V., Sahin, I. and Calli, I., 2010. Geometrical optimisation of vehicle shock dampers with magnetorheological fluid. *International journal of vehicle design*, 54(4), pp.371-392.

[67] Tu, F., Yang, Q., He, C. and Wang, L., 2012. Experimental study and design on automobile suspension made of magneto-rheological damper. *Energy Procedia*, 16, pp.417-425.

[68] Ding, Y., Zhang, L., Zhu, H. and Li, Z., 2014. Simplified design method for shear-valve magnetorheological dampers. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(4), pp.637-652.

[69] Nguyen, Q.H., Nguyen, N.D. and Choi, S.B., 2014. Optimal design and performance evaluation of a flow-mode MR damper for front-loaded washing machines. *Asia Pacific Journal on Computational Engineering*, 1(1), p.3.

- [70] Ferdaus, M.M., Rashid, M.M., Hasan, M.H. and Rahman, M.A., 2014. Optimal design of Magneto-Rheological damper comparing different configurations by finite element analysis. *Journal of mechanical science and technology*, 28(9), pp.3667-3677.
- [71] Golinelli, N. and Spaggiari, A., 2015. Design of a novel magnetorheological damper with internal pressure control. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 9(32), pp.13-23.
- [72] Hu, G., Liu, F., Xie, Z. and Xu, M., 2015. Design, Analysis, and Experimental Evaluation of a Double Coil Magnetorheological Fluid Damper. *Shock and Vibration*, 501, p.624938.
- [73] Vinay .V.N, Khandoba G M, N R Suraj, Karthik K, Kiran R, 2015 DESIGN, DESIGN, FABRICATION AND AN INVESTIGATION OF VIBRATIONAL CHARACTERISTICS OF MR DAMPER *International Research Journal of Engineering and Technology* Volume: 02 e-ISSN: 2395 -0056
- [74] Mangal, S.K. and Kumar, A., 2015. Geometric parameter optimization of magneto-rheological damper using design of experiment technique. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 10(1), pp.1-9. -1
- [75] Susan-Resiga, D., 2009. A Rheological Model for Magneto-rheological Fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(8), pp.1001-1010.
- [76] Bompos, D.A. and Nikolakopoulos, P.G., 2011. CFD simulation of magnetorheological fluid journal bearings. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(4), pp.1035-1060.
- [77] Parlak, Z., Engin, T. and Çallı, İ., 2012. Optimal design of MR damper via finite element analyses of fluid dynamic and magnetic field. *Mechatronics*, 22(6), pp.890-903.
- [78] Gedik, E., Kurt, H., Recebli, Z. and Balan, C., 2012. Two-dimensional CFD simulation of magnetorheological fluid between two fixed parallel plates applied external magnetic field. *Computers & fluids*, 63, pp.128-134.
- [79] Omidbeygi, F. and Hashemabadi, S.H., 2012. Experimental study and CFD simulation of rotational eccentric cylinder in a magnetorheological fluid. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324(13), pp.2062-2069.
- [80] Khan, M.S.A., Suresh, A. and Ramaiah, N.S., 2012. Investigation on the performance of MR damper with various piston configurations. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2(12), p.4.
- [81] Chen, S. and Shi, W., 2012. Study of corrugated disc rotary damper based on intelligent

effect. *Journal of intelligent material systems and structures*, 23(9), pp.995-1000.

[82] Sapiński, B. and Szczęch, M., 2013. CFD model of a magnetorheological fluid in squeeze mode. *acta mechanica et automatica*, 7(3), pp.180-183.

[83] Gołdasz, J. and Sapiński, B., 2015. Application of CFD to modeling of squeeze mode magnetorheological dampers. *acta mechanica et automatica*, 9(3), pp.129-134.

[84] Breese, D.G. and Gordaninejad, F., 1999, May. Heating of magneto-rheological fluid dampers: a theoretical study. In *Smart Structures and Materials 1999: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways* (Vol. 3671, pp. 2-10). International Society for Optics and Photonics.

[85] Breese, D.G., Gordaninejad, F. and Ericksen, E.O., 2000, April. Heat generation of magneto-rheological fluid dampers. In *Smart Structures and Materials 2000: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways* (Vol. 3988, pp. 450-456). International Society for Optics and Photonics.

[86] Yu, G., Du, C. and Sun, T., 2015. Thermodynamic behaviors of a kind of self-decoupling magnetorheological damper. *Shock and Vibration*, 2015.

[87] Alonso, M. and Comas, Á., 2008. Thermal model of a twin-tube cavitating shock absorber. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 222(11), pp.1955-1964.

[88] Batterbee, D. and Sims, N.D., 2009. Temperature sensitive controller performance of MR dampers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(3), pp.297-309.

[89] Wilson, N.L. and Wereley, N.M., 2010. Analysis of a magnetorheological fluid damper incorporating temperature dependence. In *Technical Paper—51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference AIAA* (Vol. 2993, p. 2010).

[90] Yu, G.J., Du, C.B. and Wan, F.X., 2010. Numerical simulation of a self-decoupling magneto-rheological damper on electromagnetic-thermal coupling. In *Advanced Materials Research* (Vol. 139, pp. 2386-2390). Trans Tech Publications.

[91] Şahin, İ., Parlak, Z. and Engin, T., 2011, September. Investigation of The Effects of Temperature Variations On The Magnetorheological Damper Behaviour. In *15th International Research/Expert Conference, "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology", TMT 2011* (pp. 63-66).

- [92] Ocalan, M. and McKinley, G.H., 2013. High-flux magnetorheology at elevated temperatures. *Rheologica Acta*, 52(7), pp.623-641.
- [93] Saravanakumar, G., Ravikumar, L. and Jagadish, H.P., 2013. Effect of temperature on the performance of squeeze film damper lubricated with magnetorheological fluid. *Int. J. Innovative Technol. Exploring Eng*, 3, pp.1-8.
- [94] Wilson, N.L., Wereley, N.M., Hu, W. and Hiemenz, G.J., 2013. Analysis of a magnetorheological damper incorporating temperature dependence. *International Journal of Vehicle Design*, 63(2-3), pp.137-158.
- [95] Nguyen, Q.H. and Choi, S.B., 2009. A new approach for dynamic modeling of an electrorheological damper using a lumped parameter method. *Smart Materials and Structures*, 18(11), p.115020.
- [96] Goldasz, J., 2010. High-frequency model of monotube shock absorbers. *Modelowanie Inżynierskie*, 8(39), pp.81-88.
- [97] Yu, M., Wang, S.Q., Fu, J. and Peng, Y.X., 2013. Unsteady flow damping force prediction of MR dampers subjected to sinusoidal loading. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 412, No. 1, p. 012052). IOP Publishing.
- [98] Jolly, M.R., Bender, J.W. and Carlson, J.D., 1998, June. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. In *Smart structures and materials 1998: passive damping and isolation* (Vol. 3327, pp. 262-275). International Society for Optics and Photonics.
- [99] Bossis, G., Volkova, O., Lacis, S. and Meunier, A., 2002. Magnetorheology: fluids, structures and rheology. In *Ferrofluids* (pp. 202-230). Springer Berlin Heidelberg.
- [100] Viota, J.L., De Vicente, J., Duran, J.D.G. and Delgado, A.V., 2005. Stabilization of magnetorheological suspensions by polyacrylic acid polymers. *Journal of colloid and interface science*, 284(2), pp.527-541.
- [101] Wereley, N.M., Chaudhuri, A., Yoo, J.H., John, S., Kotha, S., Suggs, A., Radhakrishnan, R., Love, B.J. and Sudarshan, T.S., 2006. *Bidisperse magnetorheological fluids using Fe particles at nanometer and micron scale*. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17(5), pp.393-401.
- [102] Roszkowski, A., Bogdan, M., Skoczynski, W. and Marek, B., 2008. Testing viscosity of MR fluid in magnetic field. *Measurement Science Review*, 8(3), pp.58-60.

- [103] Zhang, J., Zhang, J.Q. and Jia, J.F., 2008. Characteristic analysis of magnetorheological fluid based on different carriers. *Journal of Central South University of Technology*, 15(1), pp.252-255.
- [104] Kim, M.S., Liu, Y.D., Park, B.J., You, C.Y. and Choi, H.J., 2012. Carbonyl iron particles dispersed in a polymer solution and their rheological characteristics under applied magnetic field. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(2), pp.664-667.
- [105] Premalatha, S.E., Chokkalingam, R. and Mahendran, M., 2012. Magneto mechanical properties of iron based MR fluids. *American Journal of Polymer Science*, 2(4), pp.50-55.
- [106] azlan, B. and Amri, S., 2008. *The behaviour of magnetorheological fluids in squeeze mode* (Doctoral dissertation, Dublin City University).
- [107] Goncalves, F.D., 2005. *Characterizing the Behavior of Magnetorheological Fluids at High Velocities and High Shear Rates* (Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University).
- [108] Kaide, A., Kanda, M., Tochigi, H. and Saeki, T., 2020. Rheology and Stability of Magnetorheological Fluids Prepared with Three Types of Stabilizers. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 53(8), pp.438-445.
- [109] Wahid, S.A. and Ismail, I., 2020. Optimization of magneto-rheological fluids on the volume fraction and viscosity for MR damper application. *Southeast Asian Journal of Technology and Science*, 1(1), pp.1-7.
- [110] Sgobba, S., 2011. Physics and measurements of magnetic materials. *arXiv preprint arXiv:1103.1069*.
- [111] Berselli, G., Vertechy, R. and Vassura, G. eds., 2012. *Smart Actuation and Sensing Systems: Recent Advances and Future Challenges*. BoD—Books on Demand.
- [112] Zhu, X., Jing, X. and Cheng, L., 2012. Magnetorheological fluid dampers: a review on structure design and analysis. *Journal of intelligent material systems and structures*, 23(8), pp.839-873.
- [113] White, F.M. and Corfield, I., 2006. *Viscous fluid flow* (Vol. 3, pp. 433-434). New York: McGraw-Hill.
- [114] Kamath, G.M., Hurt, M.K. and Wereley, N.M., 1996. Analysis and testing of Bingham plastic behavior in semi-active electrorheological fluid dampers. *Smart Materials and Structures*, 5(5), p.576.
- [115] Gavin, H.P., 1998. Design method for high-force electrorheological dampers. *Smart Materials and structures*, 7(5), p.664.

- [116] Jolly, M.R., Bender, J.W. and Carlson, J.D., 1999. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. *Journal of intelligent material systems and structures*, 10(1), pp.5-13.
- [117] Stokes, G.G., 1851. *On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums* (Vol. 9, p. 8). Cambridge: Pitt Press.
- [118] Ferdek U and Luczko J (2012) Modeling and analysis of a twin-tube hydraulic shock absorber. *Journal of theoretical and applied mechanics*, 50(2): 627–638.
- [119] Dixon JC (2007) *The shock absorber handbook*. Chichester, England: John Wiley.

Abstract

Magneto-Rheological Fluids (MRF) are intelligent fluids which have yield stress when exposed to a magnetic field. The exposure to magnetic field will also allow to control and increase their viscosity. The MRF structure typically consists of ferromagnetic particles such as carbonyl iron powder suspended in a base fluid. One of the major applications of this fluids are Magneto-Rheological Dampers (MRD). Unique characteristics of MRDs including the controllable and variable damping have resulted in many damper manufacturers to conduct extensive research and developments on MRFs and their application in dampers. The aim of this study is, first, to model and parametrically investigate a twin tube magnetorheological damper. Another goal of this study is to build a magneto-fluid with good stability and also to provide a new modified non-Newtonian model to use for damper modeling. Damper modeling with numerical and analytical methods presented in this study and comparison of the mentioned methods are among the important works done in this research by which the parameters affecting the performance of damper are studied and the desired damper is designed, manufactured and tested. In the first step, in order to make the optimal fluid with suitable stability, after performing SEM and EDX experiments on three samples of carbonyl iron powder and selecting the powder with the right particle size and purity, 5 magnetorheological fluid samples were made with different compounds and stability tests were performed. Then, rheometric experiments for optimal fluid with good stability were performed at different temperatures and magnetic fields until the magnetic saturation conditions were reached. The experimental results obtained from rheology testing at different shear rate, temperature and magnetic fields were used to develop a modified non-Newtonian rheological model to predict the behavior of the optimized MR fluid and was compared to the Bingham models that are commonly used for modelling MRF flows and MRDs. Then, using rheometric data at different temperatures and fields, yield stress and parameters related to fluid behavior in the post-yield region, were obtained as a function of temperature and magnetic field. According to the obtained results, in addition to the yield stress, the fluid behavior in the post-yielding region and consequently the plastic viscosity is also a function of the magnetic field which typically is not considered in the calculation of damping force using common methods. Another advantage of the new modified model is that it can be used in CFD modeling, so that singularity does not occur and despite the dual behavior of the fluid in the post-yield region, this model predicts fluid behavior as a Continuous function. The effect of the material of the fluid and the percentage of the preservative on the fluid behavior were also investigated. The specific heat capacity and thermal conductivity of the fluid required for CFD simulations were measured experimentally. The modelling of the flow and

pressure field of the optimized fluid in MR damper was conducted by implementing modified non-Newtonian and Bingham models using analytical quasi-static, analytical unsteady and Computational Fluid Dynamic (CFD) methods. The results show that neglecting factors including effect of magnetic field on MR fluid after yield, effect of wall shear stress and effect of inertia term in common modelling methods and damping force estimation of MR dampers results in considerable error. In the next step, using the apparent viscosity obtained from the new non-Newtonian modified model as a function of temperature, the effects of temperature increase due to viscous dissipation, amplitude and frequency of oscillation on yield stress, shear stress on the wall, heat flux on the wall, damping force, damping energy and equivalent damping coefficient, were evaluated in two states without a magnetic field and under a saturated magnetic field. The Reynolds number calculations in the piston gap showed that turbulent flow could not form in the range on velocities investigated. In order to reach the maximum ratio of damper force at magnetic saturation to that of without magnetic field, the Monte-Carlo algorithm and COMSOL software were used to find the optimum piston gap. The next phase is to manufacture the part and assemble the damper and assess the unit using INSTRON machine in different magnetic fields to investigate the impact of increase in magnetic field (up to saturation point) on the force and damping energy.

Keywords: Magneto-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Dampers, viscosity, modified non-Newtonian model, Damping Force, Damper Modeling, Magnetic Field, Temperature



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

PhD Thesis in Energy Conversion Engineering

Parametric Investigation, Optimal Design, Manufacturing and Testing of Magnetorheological Damper

By

Mohammad Mehdi Zolfagharian

Supervisor

Dr. Mohammad Hasan kayhani

Advisor

Dr.Mahmood Norouzi

July 2020

