

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



**دانشکده:**

مهندسی مکانیک

**گروه:**

طراحی کاربردی

**مدلسازی و کنترل دمپر مگنتوریولوژیک**

محمد شیبانی

**استاد راهنما:**

دکتر اردشیر کرمی محمدی

**پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد**

**ماه و سال انتشار:**

تیرماه ۸۹



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه طراحی کاربردی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمد شیبانی

تحت عنوان:

مدلسازی و کنترل دمپر مگنتوریولوژیک

در تاریخ ۸۹/۰۴/۲۶ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد  
مورد ارزیابی و با درجه عالی ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی: اردشیر کرمی محمدی
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:

امضاء	نمایندة تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی: محمد مهدی فاتح
	احمد نظری		نام و نام خانوادگی: محمد محسن شاه مردان
			نام و نام خانوادگی:
			نام و نام خانوادگی:

امید عافیت آنکه بود موافق عقل

که نبض را به طبیعت شناس بنمایی

بپرس هرچه ندانی که ذلّ پرسیدن

دلیل راه تو باشد به عزّ دانایی

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

که در تمام لحظات زندگی حامی و راهنمای من بودند.

## تقدیر و تشکر

خدای یکتا را سپاسگزارم که در دو سال اخیر، فرصت شاگردی در کلاس علم و ادب استادان فرهیخته ای را داشته ام. به ویژه از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر کرمی تشکر میکنم که بی شک بدون وجود کمک و راهنمایی ایشان که در تمامی مراحل پایان نامه حامی و راهنمای صبور من بودند، اتمام پروژه امکان پذیر نبود. همچنین لازم می دانم از حمایتها و راهنمایی های خانواده ام که همیشه پشتیبان من بوده اند تشکر کنم. در آخر از تمام دوستان و همکلاسیهای عزیزم، که هرگز از کمک و راهنمایی به من دریغ نکردند سپاسگزارم، از خداوند متعال برای کلیه کسانی که مرا در انجام این پروژه یاری نمودند، موفقیت و سربلندی همراه با آرامش در تمام مراحل زندگی خواستارم.

محمد شببانی

msh8248@yahoo.com

تیرماه ۱۳۸۹

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه ( رساله ) نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات ، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه ( رساله ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد .

محمد شیبانی تیرماه ۱۳۸۹



## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

- **محمد شیبانی**، اردشیر کرمی محمدی "ارائه مدلی جدید برای شبیه سازی رفتار دینامیکی دمپر مگنتوریولوژیک" هجدهمین کنفرانس سالانه بین المللی مهندسی مکانیک کنفرانس - تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اردیبهشت ۱۳۸۹، صفحه ۳۵۰

- **Mohammad sheibani**, Ardeshir karami mohammadi, "A new nonparametric hysteresis model for magnetorheological dampers", Smart Materials and Structures; *Under review*.



## چکیده

دمپره‌های مگنتوریولوژیک ابزاری برای کنترل نیمه فعال هستند که به خاطر پاسخگویی سریع، مصرف کم انرژی و قابلیت اطمینان بالا به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. سیستم‌های تعلیق خودرو و سیستم‌های کنترل ارتعاش سازه‌ای از جمله موارد پرکاربرد در استفاده از این گونه دمپرها می‌باشد.

چالش اصلی پیش رو در گسترش کاربرد این نوع دمپرها، ارائه مدلی است که بتواند رفتار هیستریزیس غیر خطی و پیچیده آن را به خوبی شبیه‌سازی کند. تا کنون مدل‌های متفاوتی برای شبیه‌سازی پدیده هیستریزیس دمپر مگنتوریولوژیک ارائه شده است، با این وجود در بسیاری از این مدل‌ها تفاوت‌هایی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌ها وجود دارد، به عبارت دیگر مدل‌های ارائه شده نمیتوانند با دقت لازم و در محدوده وسیع کاری فرآیند مدل‌سازی را انجام دهند. آنچه در ادامه ارائه میشود در ابتدا توضیحی است در مورد سیال مگنتوریولوژیک و سپس بررسی مدل‌های ارائه شده برای دمپر مگنتوریولوژیک، در ادامه به ارائه مدل‌های جدیدی برای شبیه‌سازی رفتار دمپر خواهیم پرداخت که بتوانند کارایی بیشتری را در مقایسه با مدل‌های موجود از خود ارائه دهند، این مدل‌ها شامل یک مدل با تابع پایه سیگموئیدی، یک مدل با تابع پایه خطی و یک مدل شبکه عصبی است. مدل‌های ارائه شده، فرکانس، جریان و دامنه تحریک را به عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته و بنابراین میتوانند در شرایط تحریک متفاوت نیروی هیستریزیس دمپر را به خوبی پیش‌بینی کنند. همچنین این مدل‌ها انعطاف‌پذیری لازم را برای شبیه‌سازی رفتار دمپرها در متفاوت‌ها را دارا هستند و پروسه تکمیل مدل فاقد پیچیدگی‌های خاصی است که معمولاً در مدل‌های دیگر دیده میشود. در انتها یک مدل کامل خودرو ارائه میشود و به کمک آن به بررسی اثر دمپر مگنتوریولوژیک در بهبود کنترل ارتعاش سیستم تعلیق خودرو خواهیم پرداخت.

**واژگان کلیدی:** سیال و دمپر مگنتوریولوژیک، مدل ساری، شبکه عصبی، کنترل نیمه فعال

## فهرست مطالب

(صفحه)

(عنوان)

### فصل اول

۵	سیال و دمپر مگنتوریولوژیک
۵	سیال مگنتوریولوژیک چیست.
۸	مزایای سیال مگنتوریولوژیک
۱۱	مودهای کاری سیال مگنتوریولوژیک
۱۲	دمپره‌های مگنتوریولوژیک
۱۲	دمپر حالت جریان
۱۴	دمپرهایی که در ترکیب مودهای جریان و برش کار میکند
۱۴	دمپر های تحت فشار
۱۵	دمپر در مود برشی.

### فصل دوم

۱۶	مدلسازی دمپر مگنتوریولوژیک
۱۸	مدلهای ارائه شده برای دمپر مگنتوریولوژیک
۱۹	مدل بینگهام
۲۲	مدل گاموتا-فیلیسکو
۲۴	مدل بوک - ون
۲۶	مدل دال
۲۸	مدل پدیده شناختی بوک- ون

۳۱	مدل چند جمله ای چوی
۳۳	بررسی کارایی مدل‌های ارائه شده تا کنون
۳۳	بررسی مدل ارائه شده توسط اسپنسر
۳۴	ایجاد مدل SIMULINK برای مدل اسپنسر
۳۸	بررسی اثر پارامترهای مدل اسپنسر روی شکل نهایی مدل
۴۱	مقایسه بین شبیه سازی مدل در محیط SIMULINK و M-File
۴۲	بررسی مدل ارائه شده توسط بوک-ون
۴۲	ایجاد مدل SIMULINK برای مدل بوک-ون
۴۵	بررسی اثر پارامترهای مدل بوک-ون روی شکل نهایی مدل
۴۶	بررسی مدل ارائه شده توسط سیمس
۴۷	ایجاد مدل SIMULINK برای مدل سیمس
۴۹	بررسی اثر پارامترهای مدل سیمس روی شکل نهایی مدل

## فصل سوم

### ارائه مدل بهبود یافته برای شبیه سازی رفتار دمپر ۵۲

۵۲	مدل تغییر یافته اسپنسر
۵۳	ایجاد مدل simulink برای مدل تغییر یافته اسپنسر
۵۵	بررسی اثر فنر اضافه شده در شبیه سازی مدل
۵۵	ایجاد یک مدل غیر پارامتریک
۶۰	به دست آوردن پارامترهای مدل
۶۴	به دست آوردن تابع تغییر پارامترها
۶۸	به دست آوردن توابع چند متغیره برای پارامترها
۷۰	ارزیابی مدل

۷۸	.....	بهبود سازی مدل ارائه شده قبلی با استفاده از تابع پایه خطی
۷۸	.....	ایجاد مدل پایه خطی
۸۱	.....	به دست آوردن پارامترهای مدل
۸۱	.....	به دست آوردن تابع تغییر پارامترها
۸۶	.....	به دست آوردن توابع چند متغیره برای پارامترها
۸۷	.....	ارزیابی مدل
۹۰	.....	ارائه مدل شبکه عصبی
۹۰	.....	مبانی شبکه‌های عصبی مصنوعی
۹۱	.....	نورون (واحد شبکه عصبی)
۹۳	.....	ساختار شبکه عصبی
۹۴	.....	آموزش شبکه پرسپترون
۹۶	.....	تاریخچه شکلگیری مدل‌های شبکه عصبی
۱۰۰	.....	مدل پایه به کمک شبکه عصبی
۱۰۲	.....	تعیین پارامترهای مدل
۱۰۳	.....	ارزیابی مدل

## فصل چهارم

۱۰۵	.....	بررسی اثر کنترل نیمه فعال در پایداری سیستم تعلیق خودرو
۱۰۶	.....	الگوریتم‌های کنترل نیمه فعال
۱۰۶	.....	منطق گیره فضایی
۱۰۷	.....	منطق گیره فضایی روشن-خاموش
۱۰۷	.....	کنترل مد لغزنده
۱۰۸	.....	مدل کامل خودرو

۱۰۹	ایجاد مدل simulink برای مدل کامل خودرو.
۱۱۱	ایجاد مدل simulink برای کنترلرها
۱۱۱	کنترل به روش گیره فضای
۱۱۲	کنترل به روش گیره فضایی روشن-خاموش
۱۱۲	کنترل به روش مد لغزنده
۱۱۲	مقایسه کارایی استراتژی های کنترل نیمه فعال
۱۱۹	نتیجه گیری
۱۲۲	پیوستها
۱۴۵	منابع و مراجع

## فصل اول

### معرفی سیال و دمپر مگنتوریولوژیک

#### ۱-۱- سیال مگنتوریولوژیک<sup>۱</sup>

سیالات مگنتوریولوژیک جزء دسته سیالات کنترل پذیر قرار میگیرند. ویژگی اصلی این سیالات، تغییر ویسکوزیته آن ها با اعمال میدان مغناطیسی و تبدیل شدن از یک سیال روانرو با ویسکوزیته خطی به ماده ای با حالت نیمه جامد و داشتن مقاومت تسلیم قابل کنترل در چند میلی ثانیه است.



شکل (۱-۱) نمایی از ذرات فرومغناطیس در سیال مگنتوریولوژیک

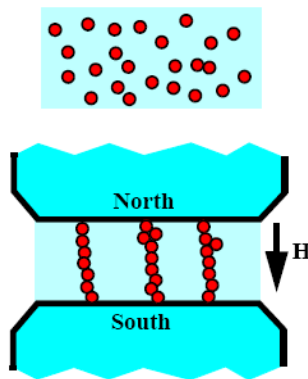
این نوع سیالات نمونه ای از تقابل ساده و سریع بین کنترل الکترونیکی و سیستم های مکانیکی هستند.

---

<sup>1</sup> Magnetorheological fluid

دمپرهایی که با این نوع سیالات کار می کنند جزء دسته ابزارآلات کنترلی نیمه فعالی قرار می گیرند که بر اساس ایجاد یک نیروی میرایی قابل کنترل کار می کنند. اولین بار در سال ۱۹۴۸ سیالات مگنتوریولوژیک توسط ژاکوب رینو<sup>۱</sup> ارائه شد. این سیالات از ذرات ریز مغناطیسی در سیال حامل تشکیل شده است. عموماً سیالات مگنتوریولوژیک سیالاتی روانرو هستند مانند روغن موتور.

در حضور میدان مغناطیسی ذرات مغناطیسی دارای یک ممان دو قطبی می شوند که این باعث می شود تا ذرات به صورت یک زنجیره موازی با میدان قرار گیرند (شکل (۱-۲)). این امر باعث جامد شدن سیال می شود و از روانروی سیال جلوگیری به عمل می آورد. میزان تغییرات بستگی به مقدار نیروی مغناطیسی اعمالی دارد و فقط در چند میلی ثانیه رخ می دهد.



شکل (۱-۲) نمایی از سیال مگنتوریولوژیک

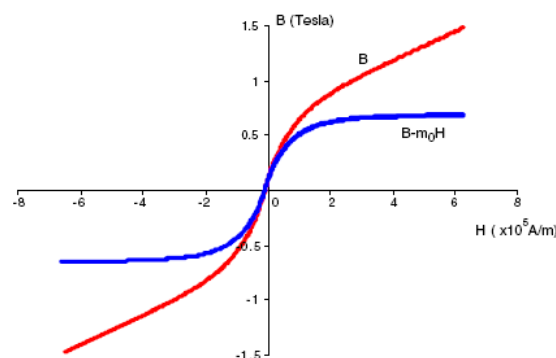
۲۰ تا ۴۰ درصد حجم سیال مگنتوریولوژیک ذرات مغناطیسی است. این ذرات در سیال حامل که می توانند روغن سنتز شده، آب یا گلیکول باشد معلق هستند. به این سیالات افزودنی‌های خاصی اضافه می شود تا از ته نشین شدن ذرات جلوگیری به عمل بیاورد. این افزودنی‌ها شبیه افزودنی‌های روغن تجاریست. از مزایای دیگر این افزودنی‌ها جلوگیری از ته نشین شدن ذرات، افزایش روانروی، تعدیل کردن ویسکوزیته و جلوگیری از سایش است.

<sup>1</sup> Jacob Rabinow, 1948

مقاومت سیال مگنتوریولوژیک به مجذور حد اشباع مغناطیسی ذرات معلق وابسته است. کارلسون و اسپنسر<sup>۱</sup> نشان دادند که نکته اصلی در انتخاب یک سیال مگنتوریولوژیک انتخاب سیالی با حد اشباع مغناطیسی مشخص است. بهترین ذرات موجود، آلیاژهای آهن و کبالت که دارای حد اشباع مغناطیسی در حدود ۲.۴ تسلا هستند می باشد، متأسفانه این آلیاژها برای کاربردهای تجاری گران هستند. بنابراین بهترین ذرات کاربردی موجود، آهن خالص است که حد اشباعی در حدود ۲.۵ تسلا دارد.

دیگر فلزات و اکسیدها دارای حد اشباعی کمتر از آهن هستند که این امر موجب ایجاد سیال ضعیفتری می شود. قطر یک ذره مغناطیسی حدود ۳ تا ۵ میکرون است. بعضی از سیالهای مگنتوریولوژیک ممکن است از ذرات بزرگتری نیز ساخته شده باشند. بزرگ شدن ذرات تعلیق آن را دچار مشکل می کند. تعلیق پذیری ذرات ریز نسبت به ذرات بزرگ بهتر است ولیکن پروسه ساخت ذرات ریز پروسه‌ای مشکل است. اندازه تجاری این ذرات آهن کربنی در حدود یک تا دو میکرون است.

ذرات فرو مغناطیس ریزتر عموماً به صورت اکسید موجود می باشند مانند ذرات رنگی که در نوار ویدئو یافت می شوند. سیال مگنتوریولوژیک که با این ذرات رنگی ساخته شده باشد پایدار است زیرا که قطر آنها در حدود ۳۰ نانومتر است. اگر چه به خاطر حد اشباع پایین آنها مقاومت آنها در حدود ۵ kpa است و ویسکوزیته پلاستیک بالایی دارند. بالا بودن این ویسکوزیته به علت مساحت بالای این ذرات است.



شکل (۱-۳) مشخصه مغناطیسی سیال مگنتوریولوژیک

<sup>1</sup> Spencer & Carlson ,1996a



جدول (۱-۱) خواص سه نوع سیال مگنتوریولوژیک تجاری که توسط شرکت لرد<sup>۱</sup> ساخته شده است را نشان میدهد. در شکل (۳-۱) منحنی القا مغناطیسی سیال مگنتوریولوژیک نشان داده شده است. همان طور که از شکل مشخص است در میدان مغناطیسی کوچک خواص مغناطیسی سیال مگنتوریولوژیک به صورت خطی است. با افزایش میدان مغناطیسی سیال به حالت اشباع خود میرسد.

### ۱-۱-۱- مزایای سیال مگنتوریولوژیک

عموماً دو نوع سیال کنترل پذیر شناخته شده است. سیالات مگنتوریولوژیک و سیالات الکتروریولوژیک. از مزایای سیال مگنتوریولوژیک بالابودن مقاومت نهایی آن ها به علت بالا بودن چگالی انرژی مغناطیسی است. چگالی انرژی در سیال مگنتوریولوژیک به علت اشباع مغناطیسی ذرات آهن محدود می شود.

جدول (۱-۱) خواص سه نوع سیال مگنتوریولوژیک تجاری شرکت لرد

<i>MRF - 336AG</i>	<i>MRF - 240BS</i>	<i>MRF - 132LD</i>	سیال مگنتوریولوژیک
روغن سیلیکون	آب	روغن ترکیبی	مایع پایه
- 40 - 150	0 - 70	- 40 - 150	دمای کاری ( $C^{\circ}$ )
3.446	3.818	3.055	چگالی
82.02%	83.54%	80.74%	وزن حجمی جامد
$0.58 \times 10^{-3}$	$0.223 \times 10^{-3}$	$0.55 - 0.67 \times 10^{-3}$	ضریب انبساط حرارتی
0.68	0.98	0.80	گرمای ویژه
0.20 - 1.88	0.83 - 3.68	0.25 - 1.06	هدایت گرمایی
8.5 / 3.7	13.6 / 5.0	0.94 / 0.33	ویسکوزیته

<sup>1</sup> Lord

برای نمونه سیالات مگنتوریولوژیک دارای ماکزیمم چگالی انرژی در حدود  $0.10 \text{ Joule/cm}^3$  هستند. از آن طرف سیالات الکتروریولوژیک به علت شکست دی الکتریکی محدود می شوند و دارای ماکزیمم چگالی انرژی در حدود  $0.001 \text{ Joule/cm}^3$  است. به همین علت مقاومت نهایی سیال مگنتوریولوژیک نسبت به سیال الکتروریولوژیک بسیار بالاتر است.

ویسکوزیته این دو نوع سیال به نسبت یکی است. مقاومت تسلیم در سیال مگنتوریولوژیک حدود  $100 \text{ kpa}$  است این در حالی است که برای سیال الکتروریولوژیک، مقاومت تسلیمی در حدود  $2 \text{ Kpa}$  تا  $5 \text{ Kpa}$  قابل حصول است.

بالا بودن مقاومت نهایی دینامیکی، امکان کوچک شدن ابزارآلات و دامنه دینامیکی بالا را پدید می آورد. کارلسون به همراه اسپنسر نشان داد که مینیمم سیال قابل کنترل مورد نیاز در ابزارآلات متناسب با ویسکوزیته پلاستیک و عکس مجذور ماکزیمم مقاومت تسلیم سیال است.

برای مثال در ابزارآلات مکانیکی، مقدار مورد نیاز سیال مگنتوریولوژیک در حدود نصف سیال الکتروریولوژیک است، که این امر موجب می شود تا در جاهایی که با کمبود فضا مواجه هستیم از این سیالات استفاده کنیم. کارلسون و ویس<sup>۱</sup> نشان دادند که سیال مگنتوریولوژیک در دمایی در حدود  $(150) - (-40)$  درجه سانتی گراد با فقط کمی تغییر در مقاومت تسلیم کار می کند. این امر به این دلیل است که پلاریزه شدن مغناطیسی با دما آنچنان تغییر نمی کند. علاوه بر این سیالات مگنتوریولوژیک نسبت به آلودگی هایی که در هنگام ساخت و یا کار ممکن است موجود باشد، دارای مقاومت بیشتری هستند.

چون فعالیتهای الکتروشیمیایی بر مکانیزم پلاریزه شدن مغناطیسی تاثیر نمی گذارد، افزودنی های روانرو و ضد سایش را می توان به این سیالات اضافه کرد تا پایداری سیال مگنتوریولوژیک را افزایش دهد. اگر چه از نظر عملی انرژی که برای راه اندازی ابزاری که با سیالات مگنتوریولوژیک و الکتروریولوژیک کار می کنند یکسان است ولیکن ابزارآلاتی که با سیال مگنتوریولوژیک راه اندازی می شود را می توان با منابع توان و ولتاژ کمتری

<sup>1</sup> Carlson-Weiss,1994

راه‌اندازی کرد.

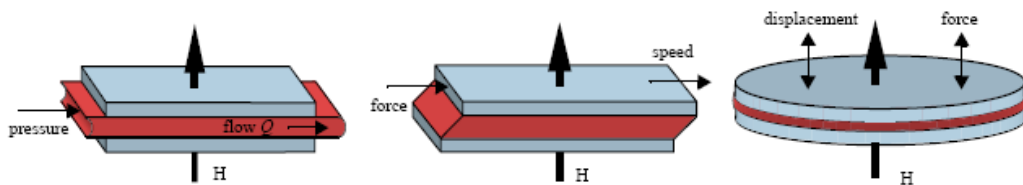
جریانی در حدود ۱ تا ۲ آمپر برای راه‌اندازی این ابزارآلات کافی است. در حالیکه برای سیالات الکتروریولوژیک ولتاژی در حدود ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ ولت نیاز است. تهیه این مقدار ولتاژ ممکن است به راحتی امکان پذیر نباشند. علاوه بر این، این مقدار ولتاژ زیاد مخاطره آمیز نیز است. در جدول (۲-۱) خصوصیات اصلی سیال مگنتوریولوژیک و الکتروریولوژیک ذکر شده است.

جدول (۲-۱) مشخصات سیال مگنتوریولوژیک و الکتروریولوژیک

سیال الکتروریولوژیک	سیال مگنتوریولوژیک	خاصیت
2–5 kpa	50–100 kpa	ماکزیمم تنش تسلیم ( $\tau_0$ )
$\square 4 kV / mm$	$\square 250 kA / m$	ماکزیمم میدان
0.1–10 Pa.s	0.1–10 Pa.s	ویسکوزیته ( $\eta$ )
+10–90 °C	-40–150 °C	محدوده دمای کاری
ناپایدار در برابر آلودگی	پایدار در برابر آلودگی	پایداری
1–2 g / cm <sup>3</sup>	3–4 g / cm <sup>3</sup>	چگالی
10 <sup>-8</sup> –10 <sup>-7</sup> s / Pa	10 <sup>-11</sup> –10 <sup>-10</sup> s / Pa	$\eta / \tau_0^2$
0.001 Joules / cm <sup>3</sup>	0.1 Joules / cm <sup>3</sup>	ماکزیمم چگالی انرژی
2000–5000V , 1–2 mA	2–50V , 1–2 A	قدرت مورد نیاز

## ۱-۱-۲- مدهای کاری سیال مگنتوریولوژیک

مدهای کاری که برای سیالات مگنتوریولوژیک در نظر می‌گیریم شامل مود جریان<sup>۱</sup> (مود صفحه ثابت، مود مولد)، مود برش<sup>۲</sup> (مود کلاچ)، مود تحت فشار<sup>۳</sup> و هرگونه ترکیب ممکن از این سه نوع مود است. شکل (۱-۴) سه نوع از این مدهای کاری را نشان میدهد.



(ج) مود جریان

(ب) مود برش

(الف) مود تحت فشار

شکل (۱-۴) مدهای کاری سیال مگنتوریولوژیک

در مود تحت فشار، فاصله دو صفحه قطب طوری تغییر می‌کند تا حالت تحت فشار را تشکیل دهد. در این حالت نیروهای بسیار زیاد قابل حصول است. این مود در حالتی که دامنه ارتعاشات کم، در حدود چند میلی‌متر و نیروهای دینامیکی بالاست استفاده می‌شود. خواص ریولوژیک سیال مگنتوریولوژیک، مودکاری و طراحی مدار مغناطیسی به طور عمده ای بر مشخصات وسیله ای که با سیال مگنتوریولوژیک کار میکند اثر می‌گذارد. در مود برشی، سیال بین دو صفحه که دارای حرکت نسبی هستند قرار می‌گیرد که میدان مغناطیسی عمود بر صفحات برشی است. خاصیت تنش برشی بر حسب نرخ برشی را می‌توان با اعمال میدان مغناطیسی کنترل کرد. نمونه ای از ابزاری که در مود برشی کار می‌کند شامل کلاچها، ترمزها، دمپرها، سازه‌های کامپوزیتی و وسایل قفل شونده است. در مود جریان، سیال مجبور است تا بین دو صفحه به علت اختلاف فشار حرکت کند و مقاومت سیال با اعمال کنترل میدان مغناطیسی که عمود بر مسیر حرکت است کنترل می‌شود. نمونه ای از ابزارآلاتی که در این مود کاری کار میکنند عبارت است از سرو ولوها و دمپرها، جاذب ارتعاش و محرکها.

1-flow mode

2-shear mode

3-squeeze mode

## ۱-۲-۱- دمپرها ی مگنتوریولوژیک

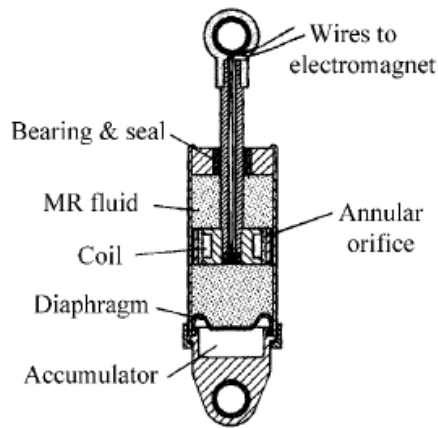
مشخصه اصلی دمپرهایی که با سیال مگنتوریولوژیک کار می کنند، نیروی میرایی بزرگ و مصرف توان کم است. بر اساس مودهای کاری که دمپر در آن مودها کار می کند دمپر ها به دسته های زیر تقسیم می شوند.

### ۱-۲-۱-۱- دمپر حالت جریان

این نوع دمپر از یک سیلندر و پیستون تشکیل شده است. کنترل جریان سیال مگنتوریولوژیک که میدان مغناطیسی بر آن اعمال می شود بر عهده اریفیسی است که در پیستون قرار دارد و یا راهگاهی که در سیلندر وجود دارد است. از جنبه ساختار، دمپرها ممکن است به دو نوع پیستون-میله یک طرفه بسته و یا دو طرف بسته تقسیم بندی شود.

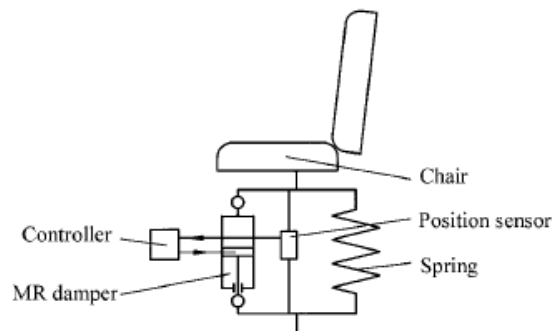
یک دمپر ساخته شده توسط شرکت لرد که با سیال مگنتوریولوژیک کار می کند و از نوع پیستون-میله یک طرف بسته است در شکل (۱-۵) نمایش داده شده است.

این نوع دمپر جهت کنترل نیمه فعال سیستم تعلیق اتومبیل های سنگین استفاده می شود. ولو مگنتوریولوژیک و مدار مغناطیسی مربوط به آن درون پیستون قرار می گیرد. جریان کویل الکترومغناطیسی از طریق سیم های داخل شفت جریان می یابد. توان ورودی ۵ وات لازم است تا دمپر در حالت اسمی خود که معادل ۱ آمپر است کار کند. اگر چه دمپر شامل ۷۰ میلی لیتر سیال مگنتوریولوژیک است ولیکن حجم سیالی که در هر لحظه به طور فعال استفاده میشود برابر است با ۰.۳ میلی لیتر. حجم میله جبران کننده در دمپر می بایست در نظر گرفته شود زیرا حجمی که توسط میله پیستون اشغال می شود تغییر می کند. دمپر قابلیت ایجاد نیرویی برای کنترل ورودی های مختلفی را دارد. یک سیستم تعلیق که با سیال مگنتوریولوژیک کار می کند در شکل (۱-۶) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱) دمپر مگنتوریولوژیک در مود جریان

به طور عمومی زمان پاسخ سیالات مگنتوریولوژیک در حدود ۰,۲ میلی ثانیه است. زمان پاسخ میدان مغناطیسی کمتر از ۰,۲ میلی ثانیه است بنابراین می توان از آن صرفنظر کرد. زمان پاسخ این دمپر در حدود

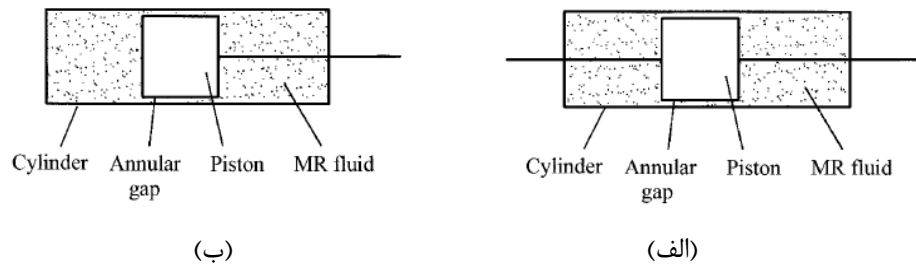


شکل (۶-۱) نمایی از یک جاذب ارتعاش مگنتوریولوژیک در صندلی اتومبیل

۳۲-۴۰ میلی ثانیه است که به پارامترهای طراحی دمپر بستگی دارد و نسبت به زمان پاسخ سیال مگنتوریولوژیک خیلی طولانی تر است. تا زمانی که سیال مگنتوریولوژیک جهت کنترل غیر فعال استفاده می شود تاخیر زمانی دمپر در حوزه های فرکانس بالا خیلی بحرانی است. پاسخ زمانی می بایست در طراحی کنترلر در نظر گرفته شود. آزمایشات نشان می دهد که روش روشن-خاموش پیشرفته نسبت به روش روشن خاموش معمولی دارای ارجحیت است زیرا که در این روش پاسخ زمانی در نظر گرفته می شود. در نرخهای برش بالا، میرایی ناشی از میدان مغناطیسی نسبتاً مستقل از سرعت پیستون است. می بایست خاطر نشان کرد که حجم بالای سیال، طول کم و کو و عرض باریک شکاف باعث کاهش اثر سیال مگنتوریولوژیک در سرعت های بالای پیستون می شود. زیرا زمان کم است تا ذرات سیال به صورت یک شکل زنجیروار قرار بگیرد.

### ۱-۲-۲- دمپرهایی که در ترکیب مودهای جریان و برش کار میکند

این نوع دمپرها نیز شامل سیلندر هستند با این تفاوت که یک شکاف محیطی بین سیلندر و پیستون قرار دارد. به لحاظ ساختاری همانطور که در شکل (۷-۱) نشان داده شده است این دمپرها نیز به دو دسته میله-پیستون یک طرفه بسته و دو طرف بسته تقسیم بندی می‌شوند.



شکل (۷-۱) - دمپری که در ترکیب مودهای جریان و برش کار میکند

حرکت پیستون باعث ایجاد جریان و برش در سیال می‌شود. کویل مغناطیسی ممکن است دور پیستون یا روی سطح سیلندر پیچیده شود.

برای دمپرها میله-پیستون یک سر بسته، حجم جبران کننده پیستون می بایست در نظر گرفته شود. برای دمپر میله-پیستون دو طرف بسته نیازی نیست تا حجم میله به دمپر الصاق شود. در عوض پیستون توسط شفت در دو انتها نگه داری می شود تا به پیستون پایداری خوبی بدهد. این نوع دمپرها در مقیاس های بزرگ کارایی خوبی دارند. از جمله دمپر مگنتوریولوژیک ۲۰ تنی ساخته شده توسط شرکت لرد را می‌توان نام برد. این نوع دمپر دارای قطر درونی ۲۰۳ میلی متر و جهت مطالعه پاسخ های اتفاقی کنترل نیمه فعال استفاده میشود.

### ۱-۲-۳- دمپر های تحت فشار

دمپر ارتعاشی تحت فشار برای کنترل لحظه ای بسیاری از تجهیزات صنعتی کاربرد دارد. تانگ<sup>۱</sup> یک دمپر مگنتوریولوژیک در مود تحت فشار ساخت تا امکان کنترل ارتعاشات توسط این سیالات را مورد بررسی قرار

<sup>۱</sup> Tang,1998

دهند. پاسخ دینامیکی سیستم که شامل پاسخ فرکانس، مقادیر نیرو و مقادیر هدر شده انرژی بود بررسی شد و نشان داده شد که دمپر یک مقدار بزرگ نیروی غیرخطی ایجاد می کند که برای کنترل ارتعاشات در حالت تشدید مفید است.

در فرکانس های تحریک پایین با اعمال میدان مغناطیسی نیروی میرایی رشد ابتدایی زیادی را خواهد داشت سپس نرخ این رشد کم می شود تا به مرحله اشباع برسد.

### ۱-۲-۴- دمپر در مود برشی

اشتارکمن<sup>۱</sup> یک سیستم جاذب ارتعاش دورانی که با کمک سیال مگنتوریولوژیک کار می کرد را در سیستم تعلیق خودرو به کار برد. سیستم میرا کننده فعال شامل دمپر، میکرو کامپیوتر و سنسور بود. دمپر شامل فضایی برای الکترومگنت، شفت، پره، سیال مگنتوریولوژیک و غیره بود.

هنگامیکه شفت ارتعاش پیچشی دارد پره متصل به شفت در سیال مگنتوریولوژیک حرکت کرده و تحت نیروی برشی قرار می گیرد. این امر موجب از بین رفتن انرژی می شود. این سیستم بر روی شاسی اتومبیل نصب شده و روی جاده واقعی تست شد. کاهش موثر در رزونانس جسم حاصل شد و پارامترهای راحتی سفر که شامل پیچ و رول است ارتقا پیدا کرد. عکس العمل گشتاور بر آمپر انرژی ورودی بین  $5 Nm$  تا  $113 Nm$  است.

علاوه بر دمپر های گوناگون موجود جولی<sup>۲</sup> بر روی دمپرهایی با ساختار پیچیده کار کرده است. از این دمپر ها جهت کنترل ارتعاشات سیستم های مختلف مانند جاذب های ارتعاشی استفاده میشود.

---

<sup>۱</sup> Shtarkman, 1991

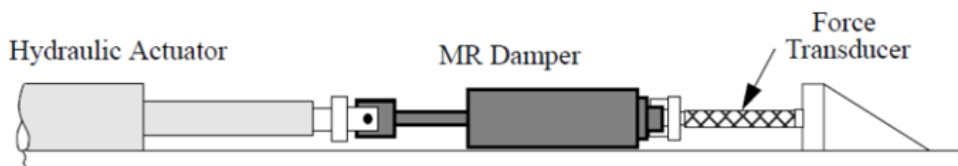
<sup>۲</sup> Jolly, 1998



## فصل دوم

### مدلسازی دمپر مگنتوریولوژیک

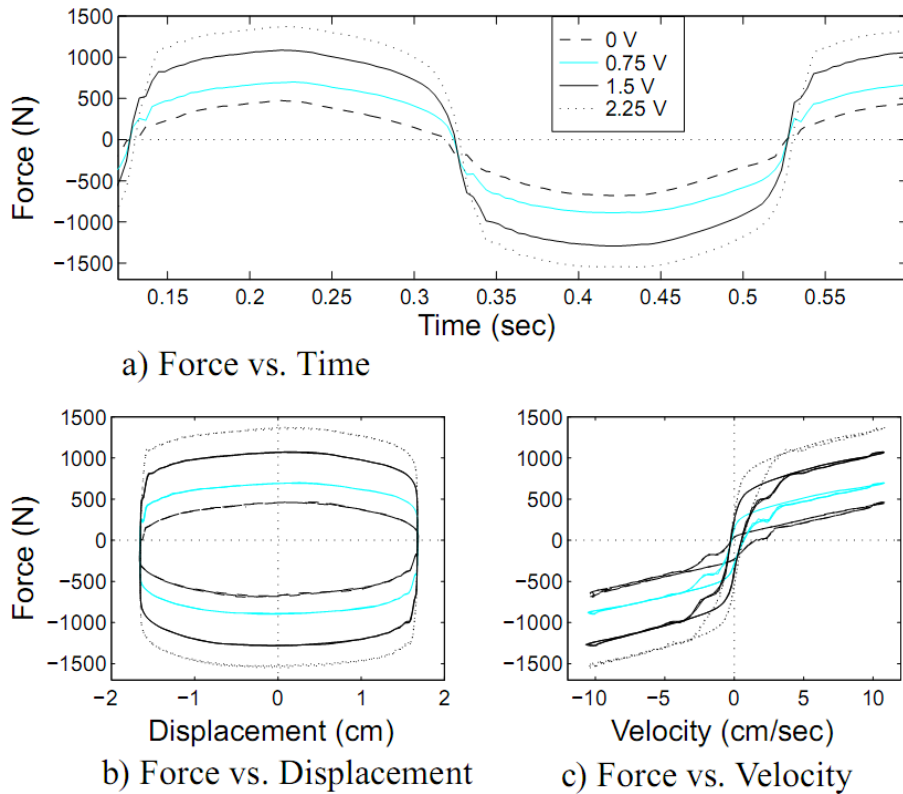
برای شناسایی رفتار دمپر مگنتوریولوژیک معمولاً یک سری از تستهای مقدماتی جهت اندازه گیری پاسخ دمپر تحت شرایط مختلف بارگذاری مانند آنچه که در شکل (۱-۲) نشان داده شده انجام می گیرد. در هر تست عملگر هیدرولیک بایک سیگنال سینوسی و فرکانس ثابت به حرکت درمی آید در حالی که ولتاژ اعمالی به دمپر ثابت نگاه داشته می شود. این آزمایشات در محدوده ی گسترده ای از فرکانس های، دامنه ها و ولتاژها صورت می گیرد.



شکل (۱-۲) مجموعه ی آزمایشگاهی برای شناسایی دمپر مگنتوریولوژیک

سپس با توجه به نمودار نیرو - زمان، نیرو - جابجایی و نیرو - سرعت مدل های مورد نظر ارائه می شوند. شکل (۲-۲) نمودار مربوط به پاسخ یک دمپر مگنتوریولوژیک تحت نیروی سینوسی با فرکانس  $2.5\text{Hz}$  و دامنه  $1.5\text{cm}$  را برای ولتاژهای مختلف نشان میدهد. در بعضی از مقالات به جای ارائه ی ولتاژ، عدد مربوط به جریان ارائه می شود که در این صورت ولتاژهای در نظر گرفته شده در شکل (۲-۲) متناظر با جریان های

0, 0.25 و 0.5 و  $0.75 \text{ A}$  هستند. در شکل (۲-۲-a) نیروی تولیدی به صورت تابعی از زمان بیان شده است، نمودار نیرو-جابجایی در شکل (۲-۲-b) و نیرو-سرعت در شکل (۲-۲-c) نشان داده شده است. توجه شود که حلقه های نیرو-جابجایی در یک مسیر ساعت گرد با افزایش زمان پیشرفت می کنند در حالی که حلقه های نیرو-سرعت در مسیر پاد ساعت گرد با افزایش زمان پیش رفت می کنند. در شکل (۲-۲) تاثیر تغییر میدان مغناطیسی کاملاً قابل مشاهده است. در ولتاژ صفر دمپر مگنتوریولوژیک مشخصه های یک وسیله ویسکوز خالص را نشان می دهد ( یعنی، رابطه ی نیروجابجایی تقریباً بیضی شکل و رابطه ی نیرو سرعت تقریباً خطی است ).



شکل (۲-۲) نیروی آزمایشگاهی اندازه گیری شده برای تحریک سیسنوسی  $2.5\text{Hz}, 1.5\text{cm}$

با افزایش ولتاژ نیروی لازم برای تسلیم کردن سیال مگنتوریولوژیک در دمپر افزایش می یابد و حالتی را ایجاد می کند که مربوط است به ماده پلاستیک موازی با یک دمپر ویسکوز یعنی رفتار پلاستیک بینگهام. از شکل (۲-۲) مشاهده می شود که نیروی تولیدی توسط دمپر در صفر مرکزیت پیدا نمی کند، این پدیده به علت

وجود انباره<sup>۱</sup> در دمپر مگنتوریولوژیک است. انباره یک مخزن در سیلندر اصلی است (شکل ۱-۵) که از نیتروژن تحت فشار در 300 psi پر شده است. انباره به جلوگیری از ایجاد کاویتاسیون در سیال در طی عملکرد معمولی کمک می کند. همچنین حجم سیال جابجا شده توسط میله ی پیستون و انبساط حرارتی را جبران می کند. از دیدگاه پدیده شناسی انباره مثل یک فنر درون دمپر مگنتوریولوژیک عمل می کند. در داده های آزمایشگاهی ارائه شده در شکل (۲-۲) وجود انباره باعث ایجاد انحراف در نیروی اندازه گیری شده برای دمپر و کمی افزایش پهنای عمودی در حلقه های پاسخ نمودار نیرو - سرعت می شود. برای به دست آوردن مدل موثری از دمپر مگنتوریولوژیک سختی متناسب با انباره نیز باید مدنظر قرار بگیرد.

ویژگی جذاب و مهم دیگری در پاسخ های نیرو- سرعت شکل (۲-۲) دیده می شود. با توجه به شاخه ی بالایی منحنی نیرو- سرعت، که متناسب با کاهش سرعت است (یعنی شتاب های منفی و بنابراین موقعیت های مثبت) متوجه میشویم که برای سرعت های مثبت بزرگ نیروی دمپر به صورت خطی با سرعت تغییر میکند. با این وجود با کاهش سرعت و قبل از منفی شدن آن، رابطه ی نیرو - سرعت دیگر خطی نیست و به صورت سریع و هموار کاهش می یابد. این تغییر رفتار نیرو در سرعت های کم در نتیجه ی فرار سیال از بین پیستون و سیلندر است و باید از لحاظ عدم راحتی که برای فرد در سیستم های تعلیق خودرو ایجاد میکند مورد بررسی قرار بگیرد.

## ۲-۱- مدل های ارائه شده برای دمپر مگنتوریولوژیک

مدل های ارائه شده برای دمپرهای مگنتوریولوژیک را میتوان به دو دسته کلی مدل های پارامتریک و مدل های غیر پارامتریک تقسیم بندی نمود.

مدل های پارامتریک نسبت به مدل های غیر پارامتریک مطلوب تر هستند چرا که پارامترهای این مدل ها دارای معانی فیزیکی هستند، با این وجود مشکل اصلی این روش ها به دست آوردن هر کدام از این

<sup>1</sup> Accumulator

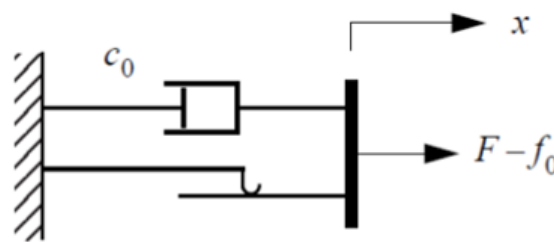
پارامترها است که این موضوع غالباً نیازمند حجم محاسباتی بالایی است. در ادامه به شاخص ترین مدل‌هایی که تا کنون برای مدل سازی دمپر مگنتوریولوژیک ارائه شده اند اشاره میشود :

## ۲-۱-۱-۱-۲ مدل بینگهام<sup>۱</sup>

یکی از نخستین مدل های ارائه شده مدل بینگهام است. رفتار تنش - کرنش مدل وسیکوپلاستیک بینگهام که توسط شیمز<sup>۲</sup> ارائه شده را میتوان برای توصیف رفتار دمپر مگنتوریولوژیک مورد استفاده قرار داد. در این مدل لزجت پلاستیک شیب منحنی تنش برشی-کرنش برشی است. بنابراین برای مقادیر مثبت نرخ برش ( $\dot{Y}$ )، تنش کل به صورت زیر در نظر گرفته می شود.

$$\tau = \tau_y(field) + \eta \dot{\gamma} \quad (1-2)$$

که  $\tau_y(field)$  تنش تسلیم است و تحت تاثیر میدان مغناطیسی است و  $\eta$  نیز لزجت سیال می باشد. بر پایه این مدل از رفتار سیال های الکتروریولوژیک، استندوی<sup>۳</sup> مدل مکانیکی را ارائه داد که به نام مدل بینگهام شناخته می شود. مدل بینگهام از یک المان اصطکاکی خشک تشکیل شده که به موازات یک دمپر ویسکوز قرار گرفته است. (شکل (۲-۳)).



شکل (۲-۳) مدل بینگهام

در این مدل برای سرعت های غیر صفریستون ( $\dot{x} \neq 0$ ) نیروی تولیدی دمپر برابر است با :

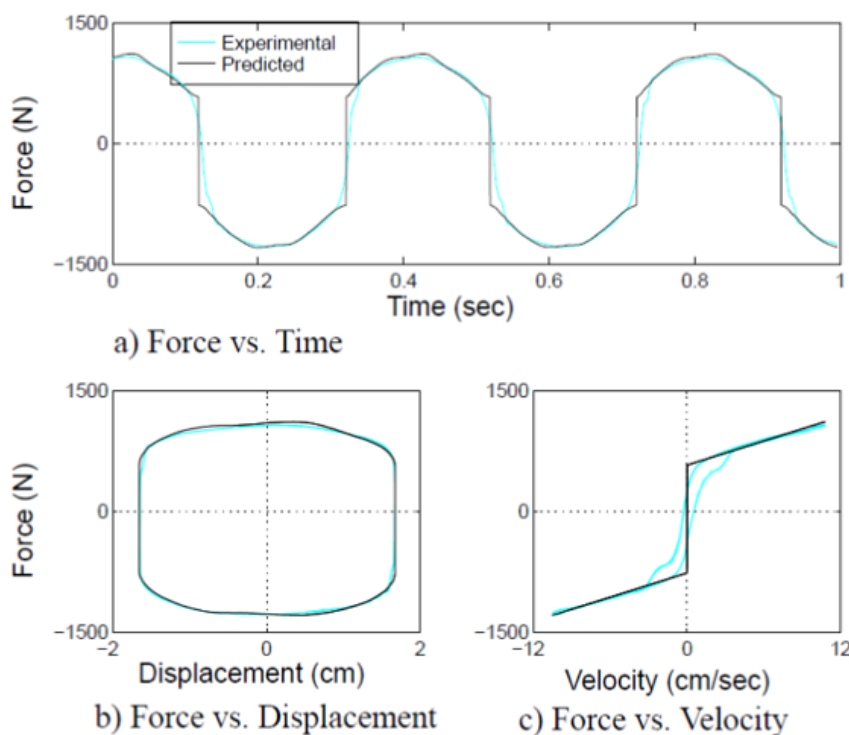
$$F = f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_0 \quad (2-2)$$

<sup>1</sup> Bingham

<sup>2</sup> Shames, 1991

<sup>3</sup> Stanway, 1985, 1987

که  $C_0$  ضریب میرایی ویسکوز و  $f_c$  نیروی اصطکاکی مربوط به تنش تسلیم سیال است. نیروی  $f_0$ ، انحرافی را که در نتیجه فشار انباره در نیروی محاسبه شده (آزمایشگاهی) مشاهده می‌شود را اعمال می‌کند. توجه شود که اگر در هر نقطه سرعت پیستون صفر شود نیروی تولید شده در المان اصطکاکی برابر نیروی اعمالی خواهد بود. برای درک توانایی مدل بینگهام در پیش بینی رفتار دمپر مگنتوریولوژیک، مدل ارائه شده در رابطه ی (۲-۲) برای پاسخ سینوسی  $2.5 \text{ Hz}$  و همچنین پاسخ به دست آمده آزمایشگاهی در حالتی که ولتاژ برابر مقدار ثابت  $1.5 \text{ V}$  است در شکل (۲-۴) با هم مقایسه شده اند.



شکل (۲-۴) مقایسه بین پاسخ پیش بینی شده و آزمایشگاهی برای مدل بینگهام

پارامترهای انتخاب شده مدل  $f_c=670 \text{ N}$  و  $C_0=50 \text{ N sec/cm}$  و  $f_0=-95 \text{ N}$  است.

گرچه رفتار نیرو - جابجایی به شکل خوبی مدل شده است، بررسی پاسخ نیرو - سرعت و همچنین تغییرات زمانی نیرو نشان می‌دهد که رفتار دمپر به خوبی شناسایی نشده است، بخصوص برای سرعت های نزدیک به صفر. به ویژه این مدل پاسخ غیر خطی نیرو - سرعت مشاهده شده در داده ها در حالتی که شتاب و سرعت علامت های متفاوتی دارند ( یا به طور مشابه، هنگامی که سرعت و جابه جایی علامت یکسانی دارند ) و اندازه

ی سرعت کم است ارائه نمی دهد. اگر چه این مدل ممکن است برای آنالیز پاسخ کافی باشد، برای آنالیز کنترل کافی نمی باشد.

بر پایه رابطه (۱-۲)، فیلیپس<sup>۱</sup> معادله ای را برای دمپره‌های مگنتوریولوژیک به دست آورد :

$$F = \frac{12\eta L_d A_p^2}{\pi D h_d^3} \dot{u}(t) + \frac{3L_d \tau_y}{h_d} A_p \text{sgn}[\dot{u}(t)] \quad (۳-۲)$$

که در این معادله  $L_d$  طول پیستون،  $A_p$  سطح مقطع پیستون،  $D$  قطر داخلی سیلندر و  $h_d$  گپ بین پیستون و سیلندر است. تنش برشی تسلیم  $\tau_y$  تابعی از جریان کنترل  $i$  است. برپایه داده های آزمایشگاهی به دست آمده برای دمپره‌های مگنتوریولوژیک وابستگی تنش برشی تسلیم  $\tau_y$  به جریان اعمالی  $i$  را میتوان در قالب روابطی بیان کرد. این رابطه را  $\tau_y^2$  به صورت زیر ارائه می دهد :

$$\tau_y = A_1 e^{-I} + A_2 \ln(I + e) + A_3 I \quad (۴-۲)$$

که در آن  $A_3, A_2, A_1$  ضرایبی وابسته به خاصیت سیال مگنتوریولوژیک موجود در دمپر و  $e$  یک ثابت طبیعی است. ضرایبی که برای تطبیق دادن مدل روی داده های آزمایشگاهی ارائه شده توسط آیو و گان<sup>۳</sup> استفاده شده برابر  $A_1 = -11314$  و  $A_2 = 14580$  و  $A_3 = 1281$  است.

مطالعات ژو نشان می دهد نتایج عددی از این مدل بهبود یافته بینگهام تناسب خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

روش دیگری که برای وارد کردن جریان در رابطه ی (۲-۲) در نظر گرفته شده، توسط نی<sup>۴</sup> ارائه شده است. این مدل بیان می کند که هم  $C_0$  و هم  $F_y$  توابعی از جریان کنترلی ( $i$ ) هستند و می توانند به صورت توابع چند جمله ای درجه ۲ مدل شوند که در آن  $F_{yA}$  و  $F_{yC}$  و  $C_a$  و  $C_b$  و  $C_c$  پارامترهای مدل هستند و با مقایسه ی بین نیروی میرایی تئوری و عملی به دست می آیند.

<sup>1</sup> Phillips, 1969

<sup>2</sup> Xu, 2002

<sup>3</sup> Ou & Guan, 1999

<sup>4</sup> Ni, 2002

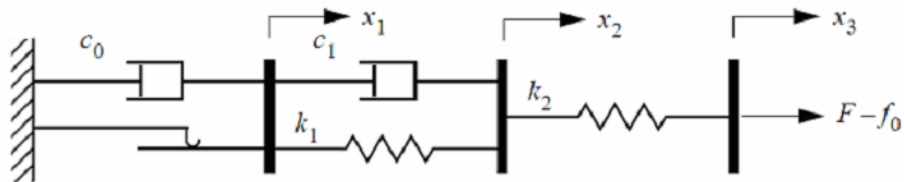
$$F_y(i) = F_{yc}i^2 + F_{yb}i + F_{ya} \quad (5-2)$$

$$C_o(i) = C_c i^2 + C_b i + C_a \quad (6-2)$$

د راین مدل  $f_0$  برابر صفر در نظر گرفته می شود.

### ۲-۱-۲- مدل گاموتا - فیلیسکو<sup>۱</sup>

گاموتا و فیلیسکو با تمرکز بر پیش بینی رفتار مواد الکتروریولوژیک مدل بسط یافته ای از بینگهام را ارائه دادند که به مدل ویسکوالاستیک - پلاستیک معروف است. (شکل (۵-۲)).



شکل (۵-۲) مدل ارائه شده توسط گاموتا و فیلیسکو

این مدل شامل مدل بینگهام ( یعنی یک المان اصطکاکی به صورت موازی با یک ضربه گیر) است که به طور سری با یک مدل استاندارد از یک جسم خطی قرار گرفته است ( شیمز و کوسارلی<sup>۲</sup>).

معادلات حاکم بر این مدل به صورت زیر است :

$$\left. \begin{aligned} F &= k_1(x_2 - x_1) + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + f_0 \\ &= c_0\dot{x}_1 + f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) + f_0 \\ &= k_2(x_3 - x_2) + f_0 \end{aligned} \right\}, \quad |F| > f_c \quad (7-2)$$

$$\left. \begin{aligned} F &= k_1(x_2 - x_1) + c_1\dot{x}_2 + f_0 \\ &= k_2(x_3 - x_2) + f_0 \end{aligned} \right\}, \quad |F| \leq f_c \quad (8-2)$$

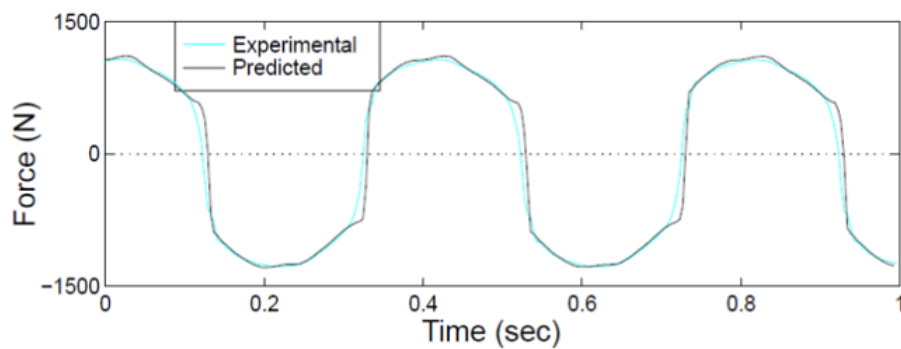
که  $C_0$  ضریب میرایی مشترک با مدل بینگهام و  $K_1$  و  $K_2$  و  $C_1$  مربوط به جسم صلب خطی است.

<sup>1</sup> Gamota-Filisko , 1991

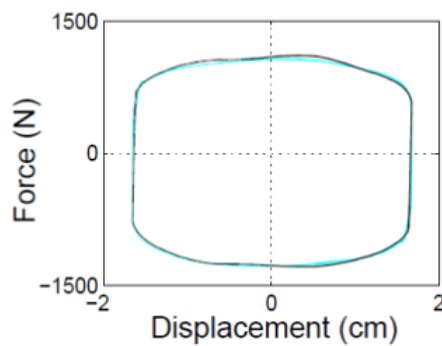
<sup>2</sup> shames & Cossarelli,1992

برای فرکانس 2.5 Hz و پاسخ نشان داده شده در شکل (۲-۲) برای دمپر مگنتوریولوژیک پارامترهای مدل را می توان به صورت  $f_c = 670N$  و  $C_0 = 5000 N$  و  $C_1 = 1300 N \text{ sec/cm}$  و  $k_1 = 5 \times 10^4 N/cm$  و  $k_2 = 5 \times 10^4 N/cm$  در نظر گرفت و نمودار مقایسه ای بین پاسخ پیش بینی شده و داده های آزمایشگاهی متناظر را به صورت شکل (۲-۶) ارائه داد (اسپنسر<sup>۱</sup>).

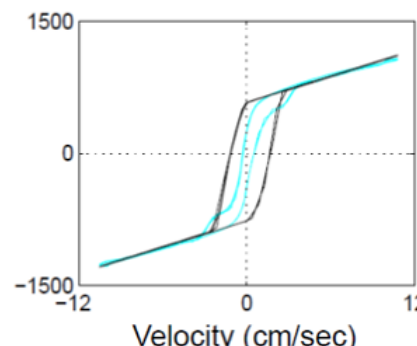
این مدل رفتار نیرو - جابجایی دمپر را به خوبی مدل می کند. به علاوه رفتار نیرو - سرعت این مدل شباهت بیشتری به داده های آزمایشگاهی دارد.



a) Force vs. Time



b) Force vs. Displacement



c) Force vs. Velocity

شکل (۲-۶) مقایسه بین پاسخ پیش بینی شده و آزمایشگاهی مدل گاموتا-فیلیسکو

با این وجود معادلات حاکم (۲-۷) و (۲-۸) انعطاف پذیری چندانی ندارند و این موجب سخت شدن کار تطابق داده های عددی می شود. به طور کل کارکردن با این مدل دارای چالش های عددی زیادی است که از بزرگترین نقطه ضعف های این مدل به حساب می آید. [لرگات و ماسری<sup>۲</sup>]

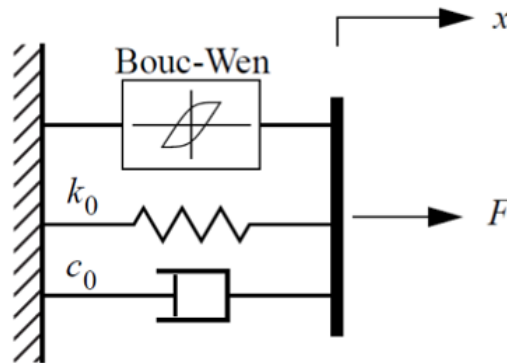
<sup>1</sup> Spenser, 1997

<sup>2</sup> Ehrgott & Masri, 1994



۲-۱-۳- مدل بوک-ون<sup>۱</sup>

مدل بوک-ون به کرات برای مدل کردن سیستم‌های دارای پسماند مغناطیسی به دلیل راحتی کاربرد از لحاظ عددی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل بوک-ون مدلی فراگیر و تطبیق پذیر است و می‌تواند رفتارهای پسماند متفاوتی را پوشش دهد. طرحی از این مدل در شکل (۲-۷) نشان داده شده است.



شکل (۲-۷) مدل بوک-ون

نیرو در این سیستم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F = c_0 \dot{x} + k_0 (x - x_0) + \alpha z \quad (۹-۲)$$

که متغیر کامل کننده (Z) از طریق معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (۱۰-۲)$$

با تنظیم پارامترهای مدل ( $\gamma$  و  $\beta$  و  $A$ ) می‌توان خطی بودن در هنگام برداشتن بار و همواری انتقال از ناحیه پیش تسلیم به ناحیه پس از تسلیم را کنترل کرد. به علاوه نیروی  $f_0$  حاصله از انبار به صورت مستقیم در این مدل به وسیله‌ی طول اولیه  $x_0$  فنر خطی  $k_0$  مشارکت داده می‌شود. برای انطباق دادن مدل بوک-ون به داده‌های آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل (۲-۲) (جابجایی سینوسی 2.5 HZ و ولتاژ ثابت اعمالی 1.5 V) پارامترها به صورت زیر انتخاب می‌شوند (اسپنسر<sup>۲</sup>):

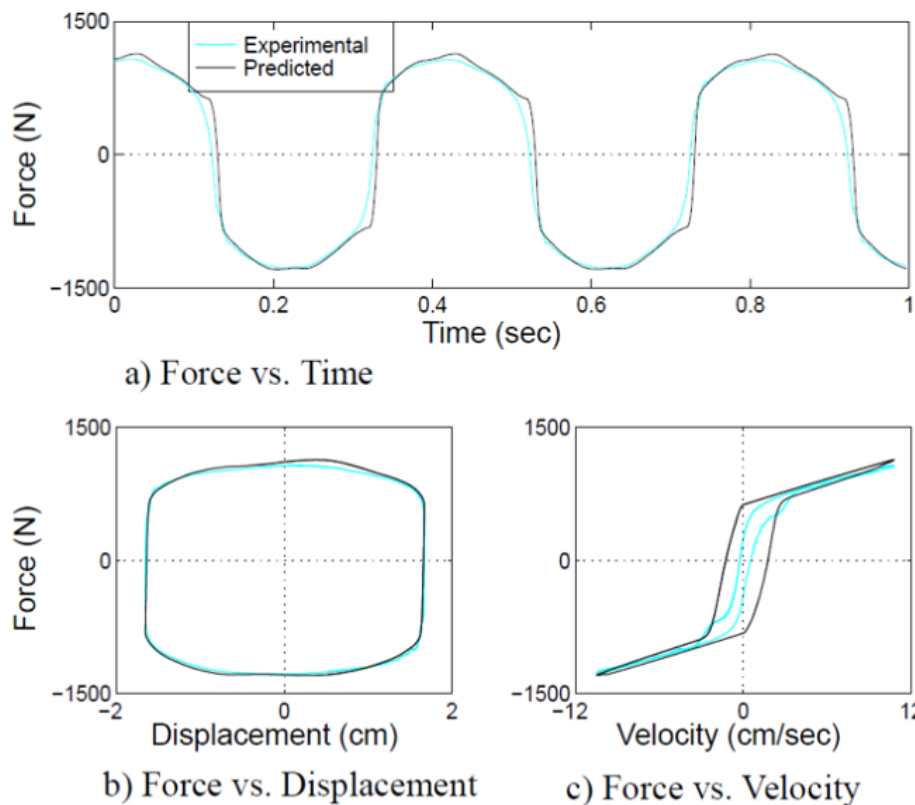
$$\alpha = 880 \text{ N/cm} \quad \text{و} \quad C_0 = 50 \text{ sec/cm} \quad \text{و} \quad K_0 = 25 \text{ N/cm} \quad \text{و} \quad \gamma = 100 \text{ cm}^{-2} \quad \text{و} \quad \beta = 100 \text{ cm}^2 \quad \text{و} \quad n=2$$

$$x_0 = 3.8 \text{ cm} \quad \text{و} \quad A=120$$

<sup>1</sup> Wen, 1976

<sup>2</sup> Spenser, 1997

مقایسه ای بین پاسخ پیش بینی شده و داده های آزمایشگاهی متناظر در شکل (۸-۲) دیده می شود. مدل بوک-ون رفتار نیرو-جابجایی دمپر را به خوبی پیش بینی می کند و انطباق بیشتری با رفتار نیرو-سرعت داده های آزمایشگاهی از خود نشان می دهد. با این وجود مشابه مدل بینگهام پاسخ غیرخطی نیرو-سرعت مدل بوک-ون نیز ناحیه ای که سرعت و شتاب دارای علامت متضاد هستند و سرعت دارای مقادیر کمی است را پوشش نمی دهد.



شکل (۸-۲) مقایسه بین پاسخ پیش بینی شده و آزمایشگاهی مدل بوک-ون

برای استفاده از این مدل برای مدل سازی دمپر در حالت میدان مغناطیسی متغیر می باید روابط اصلی بین

پارامترهای مدل و ولتاژ ( جریان ) اعمالی مشخص شود. این روابط را اسپنسر<sup>۱</sup> به صورت زیر ارائه می دهد.

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (11-2)$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (12-2)$$

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (13-2)$$

<sup>۱</sup> Spenser , 1997

که در آن  $\gamma$  ولتاژ اعمالی است و پارامترهای  $\alpha_a$  و  $\alpha_b$  و  $c_{0a}$  و  $c_{0b}$  باید برای مدل مشخص شوند.

روابط دیگری نیز برای ایجاد رابطه بین پارامترهای مدل بوک-ون و ولتاژ (جریان) اعمالی وجود دارد.

شِن<sup>۱</sup> روابط مرتبه ی بالاتری را بین جریان و پارامترهای مدل ارائه نمود. او در مدل خود  $K_d$  را به دلیل آنچه

قابل صرف نظر دانستن در نتیجه ی بررسی داده های آزمایشگاهی نامیده برابر صفر قرار داده و روابط زیر را

برای  $\alpha$  و  $C_d$  ارائه می کند.

$$\alpha(I) = 72.8I^3 - 42.88I^2 + 14.83I + 0.29 \quad (14-2)$$

$$c_d(I) = -9.37I^4 + 10.22I^3 - 4.33I^2 + 0.89I + 0.02 \quad (15-2)$$

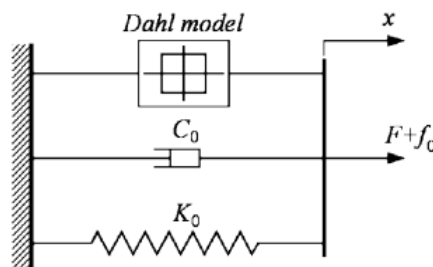
و  $n=1$  است.

## ۲-۱-۴- مدل دال<sup>۲</sup>

بر پایه مدل پسماند مغناطیسی دال، مدل های متفاوتی برای دمپر مگنتوریولوژیک ارائه شده است که از جمله می توان به دو مورد زیر اشاره نمود:

۲-۱-۴-۱- مدلی که توسط ژو و کیو<sup>۳</sup> ارائه شد و در شکل (۹-۲) قابل مشاهده است.

این مدل نسبت به مدل بوک - ون پارامتر های کمتری دارد و به علاوه می تواند رابطه ی نیرو- سرعت را در سرعت های کم با دقت مناسبی پیش بینی کند.



شکل (۹-۲) مدل دال برای دمپر مگنتوریولوژیک

<sup>1</sup> Y.Shen,2005

<sup>2</sup> Dahl

<sup>3</sup> Zhou & Qu , 2002

در این مدل نیروی دمپر برابر است با :

$$F = K_0x + C_0\dot{x} + F_dZ - f_0 \quad (16-2)$$

که در آن  $K_0$  سختی ؛  $C_0$  ضریب میرایی ویسکوز،  $F_d$  نیروی کولومب است.  $C_0$  و  $F_d$  تابعی از میدان مغناطیسی اعمالی هستند.  $x$  نیز جابجایی دمپر مگنتوریولوژیک است،  $F_0$  نیروی انحراف در نتیجه ی وجود انباره است و  $Z$  متغیر پسماند مغناطیسی بی بعدی است که از رابطه زیر به دست می آید :

$$\dot{Z} = \sigma\dot{x}(1 - Z \operatorname{sgn}(\dot{x})) \quad (17-2)$$

که ثابت  $\sigma$  شکل حلقه ی پسماند را مشخص می کند. در رابطه (16-2) جمله ی ' $F_dZ$ ' متناظر با نیروی اصطکاک خشک است. در این مدل رابطه بین  $C_0$  و  $F_d$  مانند مدل بوک-ون خطی در نظر گرفته شده است.

$$C_0 = C_{0s} + C_{0d}u, \quad F_d = F_{ds} + F_{dd}u. \quad (18-2)$$

که در آن  $C_{0s}$  و  $F_{ds}$  به ترتیب ضریب میرایی و نیروی کولومب دمپر در میدان صفر هستند.  $u$  نیز یک متغیر درونی است که وابستگی پارامترها را به ولتاژ اعمالی  $V$  مشخص می کند.

رابطه ی بین  $u$  و  $V$  نیز مثل مدل بوک-ون با یک فیلتر مرتبه ی اول مدل می شود :

$$\dot{u} = -\eta(u - V) \quad (19-2)$$

که  $\eta$  منعکس کننده زمان پاسخ دمپر مگنتوریولوژیک است و برای  $\eta$  های بزرگتر زمان پاسخ کوتاه تری خواهیم داشت. بنا بر این مدل فوق دارای ۸ پارامتر ( $C_{0s}$ ,  $C_{0d}$ ,  $F_{ds}$ ,  $F_{dd}$ ,  $K_0$ ,  $\sigma$ ,  $f_0$  and  $\eta$ ) است که باید مشخص شوند.

۲-۴-۱-۲-۲ مدل دیگری که از رابطه پسماند مغناطیسی دال استفاده کرده مدل ارائه شده توسط ایخوان و دایک<sup>۱</sup> است که نسبت به مدل ارائه شده ی قبلی ساده تر بوده و معادله نیرویی را به صورت زیر در نظر می گیرد،

$$f_{mr} = \bar{k}_x\dot{x} + KW \quad (20-2)$$

که در آن  $W$  متغیر پسماند مغناطیسی دال است که از رابطه زیر به دست می آید.

<sup>1</sup> Ikhouane & Dyke , 2007

$$\dot{w} = \bar{\rho}(\dot{x} - |\dot{x}|w) \quad (21-2)$$

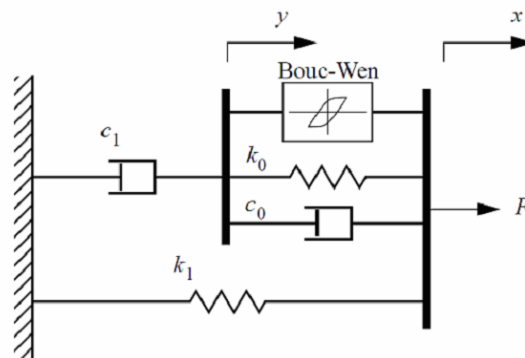
و  $\rho$  همان  $\sigma$  در مدل قبلی است. در این مدل پارامتر  $K_x$  ثابت در نظر گرفته شده و رابطه‌ی  $k$  با ولتاژ هم به صورت خطی و بدون در نظر گرفتن فیلتر مرتبه‌ی اول ارائه شده است.

$$K = k_{wa} + k_{wb}V \quad (22-2)$$

$V$  ولتاژ اعمالی است. در این مدل پارامترهای  $K_x$ ،  $k_{wb}$ ،  $k_{wa}$  و  $\rho$  پارامترهای کنترل شکل حلقه‌ی پسماند هستند.

## ۲-۱-۵ مدل پدیده شناختی بوک-ون<sup>۱</sup>

اسپنسر<sup>۲</sup> مدل بهبود یافته‌ی خود را بر پایه مدل بوک-ون به صورتی که در شکل (۲-۱۰) مشاهده میشود ارائه داد.



شکل (۲-۱۰) مدل اسپنسر

معادلات حاکم بر نیروی دمپر به صورت زیر می باشد.

$$F = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (23-2)$$

$$= c_1\dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (24-2)$$

که در آن :

<sup>1</sup> Phenomenological Bouc-Wen

<sup>2</sup> Spenser , 1997

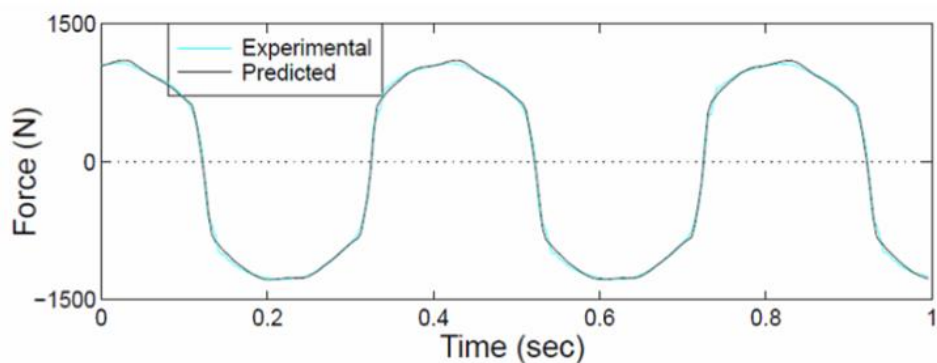
$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta(x - y)|z|^n + A(x - y) \quad (25-2)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} \{ \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y) \} \quad (26-2)$$

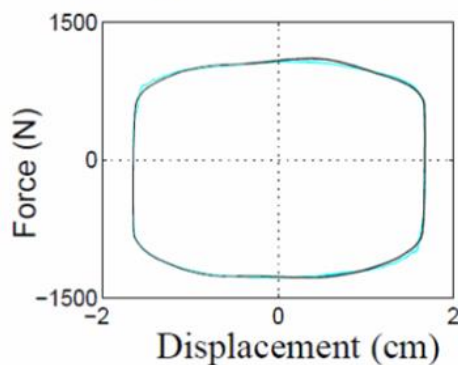
در این مدل سختی انباره با  $k_1$  و میرایی ویسکوز در سرعت های بالا با  $c_0$  مد نظر قرار گرفته است. وجود دمپر  $c_1$  برای بر طرف کردن خطایی است که در مدل بوک - ون در سرعت های پایین رخ می دهد.

$k_0$  برای کنترل سختی در سرعت های بالا است و  $x_0$  جابجایی اولیه فنر  $k_1$  در اثر نیروی تولیدی انباره است. برای انطباق مدل بر داده های آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل (2-2) (جابجایی سینوسی با فرکانس 2.5 HZ و ولتاژ ثابت 1.5 v) پارامترهای مدل به صورت زیر اختیار شده اند و در شکل (2-11) مقایسه ای بین پاسخ پیش بینی شده و داده های آزمایشگاهی متناظر صورت گرفته است.

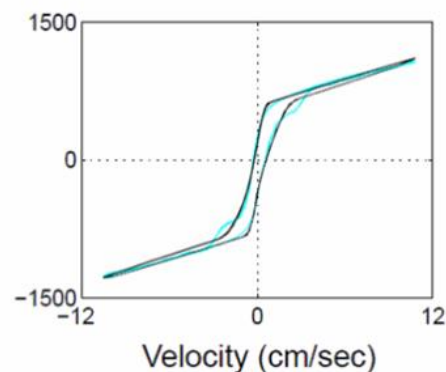
$$K_1=5.4 \text{ N/cm} , c_1=930 \text{ N sec/cm} , k_0= 14 \text{ N /cm} , c_0=53 \text{ N sec/cm} , \alpha=963\text{N/cm} , x_0=18.9 \text{ cm} , \\ A=207 , n=2 , \gamma=200 \text{ cm}^{-2} , \beta=200 \text{ cm}^{-2}$$



a) Force vs. Time



b) Force vs. Displacement



c) Force vs. Velocity

شکل (2-11) مقایسه بین پاسخ پیش بینی شده و داده های آزمایشگاهی مدل اسپنسر

این مدل رفتار دمپر در تمام نواحی را با تقریب خوبی پیش بینی می کند به خصوص در ناحیه ای که مدل بوک - ون و بینگهام پیش بینی خوبی را ارائه نمی دادند یعنی ناحیه ای که شتاب و سرعت علامت هایی متفاوتی دارند و اندازه ی سرعت کم است.

برای توسعه ی مدل برای میدان های متغیر مانند مدل بوک - ون می باید رابطه ی پارامترها با ولتاژ (جریان) اعمالی مشخص شود. به عنوان مثال تنش تسلیم سیال مگنتوریولوژیک به طور مستقیم وابسته به میزان میدان مغناطیسی اعمالی است بنابراین پارامتر  $\alpha$  را می توان به عنوان تابعی از ولتاژ اعمالی در نظر گرفت. براساس داده های آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل (۲-۲) اندازه ی تنش تسلیم حالت پایدار به نظر می رسد که به صورت خطی با ولتاژ اعمالی تغییر می کند و دارای مقدار اولیه غیر صفر است ( یعنی در ولتاژ صفر). این مقدار غیر صفر مربوط به بخشی از سیال است که از ابتدا به گونه ای طراحی شده است که دارای یک مقاومت تسلیم کوچک در میدان صفر برای پایداری در برابر ته نشین شدن باشد و هم چنین به خاطر وجود اصطکاک در درزگیر دسته پیستون می باشد. اصطکاک ویسکوز نیز به طور خطی با ولتاژ اعمالی تغییر می کند، بنابراین مشابه آنچه پیش تر در مدل ساده بوک - ون ارائه شد، داریم،

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (27-2)$$

$$c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u \quad (28-2)$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (29-2)$$

که  $u$  یک متغیر داخلی است و برای ولتاژ یک فیلتر مرتبه ی اول مانند آنچه در مدل ساده بوک - ون و همچنین مدل اول دال<sup>۱</sup> بیان شد در نظر گرفته میشود.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (30-2)$$

$v$  ولتاژ اعمالی به دمپر است. برای انطباق مدل ارائه شده بر رفتار واقعی دمپر ۱۴ پارامتر،

$$(c_{0a}, c_{0b}, k_0, c_{1a}, c_{1b}, k_1, x_0, \alpha_a, \alpha_b, \gamma, \beta, n, \eta \text{ and } A)$$

<sup>1</sup> Dahl

باید مشخص شود. بزرگترین مشکل در کارکردن با این مدل وجود تعداد زیاد پارامترهایی است ( ۱۴ پارامتر ) که باید مشخص شود.

## ۲-۱-۶ مدل چند جمله ای چوی<sup>۱</sup>:

این مدل به سادگی میتواند جریان ورودی متناسب با نیروی میرایی دلخواه را با توجه به سرعت نسبی تعیین کند. در این مدل حلقه ی پسماند به دو ناحیه تقسیم میشود. شتاب های مثبت (حلقه پایینی) و شتاب های منفی (حلقه بالایی) که میتوان آنها را با چند جمله ای هایی با جملاتی از توانهایی از سرعت پیستون مدل کرد. در این مدل نیروی میرایی دمپر به صورت زیر بیان شده است :

$$f_{MR} = \sum_{i=0}^7 a_i v^i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 7 \quad (2-31)$$

که  $V^i$  یعنی سرعت پیستون به توان  $i$  و  $a_i$  ها را میتوان به صورت خطی نسبت به جریان ورودی  $I$  به صورت زیر تقریب زد:

$$a_i = b_i + c_i I \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (2-32)$$

بنابراین نیروی میرایی را میتوان به صورت زیر بیان کرد :

$$f_{MR} = \sum_{i=0}^7 (b_i + c_i I) v^i \quad (2-33)$$

در رابطه بالا ضرایب  $b_i$  و  $c_i$  با انطباق داده های آزمایشگاهی بر مدل به دست می آیند. این مقادیر برای دمپر مدل شده توسط چوی در جدول (۲-۱) ارائه شده اند.

<sup>1</sup> Choi, 2001



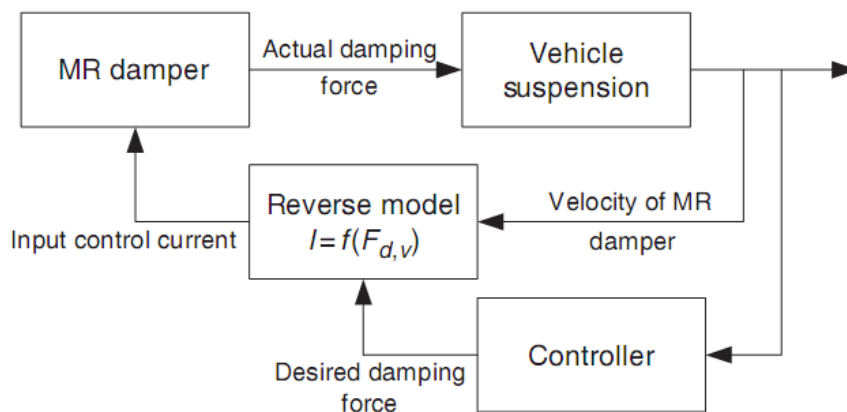
جدول (۱-۲) ضرایب  $b_i, c_i$  برای مدل چند جمله ای

Positive acceleration			Negative acceleration				
$b_0$	-278.45	$c_0$	-368.23	$b_0$	-143.25	$c_0$	-578.29
$b_1$	150.74	$c_1$	489.57	$b_1$	131.58	$c_1$	650.47
$b_2$	1.87	$c_2$	27.88	$b_2$	-7.55	$c_2$	-58.96
$b_3$	-12.45	$c_3$	-43.86	$b_3$	-18.57	$c_3$	-57.62
$b_4$	-1.08	$c_4$	-15.78	$b_4$	0.97	$c_4$	12.36
$b_5$	1.98	$c_5$	3.89	$b_5$	2.89	$c_5$	4.67
$b_6$	-4.89e-8	$c_6$	5.48e-7	$b_6$	-8.46e-8	$c_6$	-4.35e-7
$b_7$	-3.32e-7	$c_7$	-4.33e-7	$b_7$	-3.79e-7	$c_7$	-9.68e-7

از آنجا که سرعت پیستون و نیروی میرایی مورد نظر مشخص اند جریان ورودی کنترلی را میتوان از رابطه زیر به دست آورد.

$$I = \frac{f_{MR} - \sum_{i=0}^7 b_i v^i}{\sum_{i=0}^7 c_i v^i} \quad (۳۴-۲)$$

که  $I$  جریان ورودی به دمپر و  $f_{MR}$  نیروی میرایی است که توسط کنترلر مشخص میشود. شکل (۱۲-۲) دیاگرام جعبه ای را که بیان کننده مراحل صورت گرفته برای کنترل یک سیستم تعلیق توسط این مدل معکوس است را نشان میدهد.



شکل (۱۲-۲) مدل دمپر مگنتوریولوژیک اعمال شده به سیستم کنترل

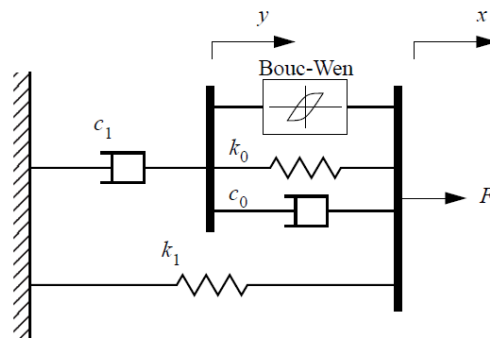
همانطور که در شکل (۲-۱۲) دیده میشود سرعت دمپر از سیستم تعلیق گرفته شده و به مدل معکوس و کنترلر فرستاده میشود. کنترلر میزان نیروی اعمالی مناسب به سیستم تعلیق را محاسبه کرده و به مدل معکوس میفرستد. اکنون مدل معکوس با داشتن دو ورودی سرعت و نیروی دمپر، جریان متناظر این دو ورودی را به دمپر می‌دهد و دمپر نیروی مورد نیاز را به سیستم اعمال میکند.

## ۲-۲ بررسی کارایی مدل‌های ارائه شده تا کنون

در ادامه به بررسی دقیقتر مهمترین مدل‌های بیان شده تا کنون می‌پردازیم تا نقاط ضعف و قوت هر یک را پیدا کرده و بتوانیم مدل جدیدی که نسبت به مدل‌های قبلی عملکرد بهتری را نشان میدهد ارائه دهیم.

### ۱-۲-۲ بررسی مدل ارائه شده توسط اسپنسر<sup>۱</sup>

همانطور که پیشتر نیز اشاره شد، مدل اسپنسر برای شبیه‌سازی رفتار دمپر مگنتوریولوژیک به صورت شکل (۲-۱۳) ارائه شده است.



شکل (۲-۱۳) مدل اسپنسر

معادلات مربوط به این مدل نیز در روابط (۲-۲۳) تا (۲-۲۶) ارائه شده است.

<sup>1</sup> Spencer et al. (1996)

در این مدل ۱۴ پارامتر ( $c_{0a}$ ,  $c_{0b}$ ,  $k_0$ ,  $c_{1a}$ ,  $c_{1b}$ ,  $k_1$ ,  $x_0$ ,  $\alpha_a$ ,  $\alpha_b$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $n$ ,  $\eta$  and  $A$ ) وجود دارد که هر کدام با توجه به داده های آزمایشگاهی باید مشخص شوند. هر کدام از این پارامترها اثری را روی شکل نهایی مدل ایجاد میکنند، در اینجا میخواهیم این اثر را برای هر کدام از این پارامترها مورد بررسی قرار دهیم.

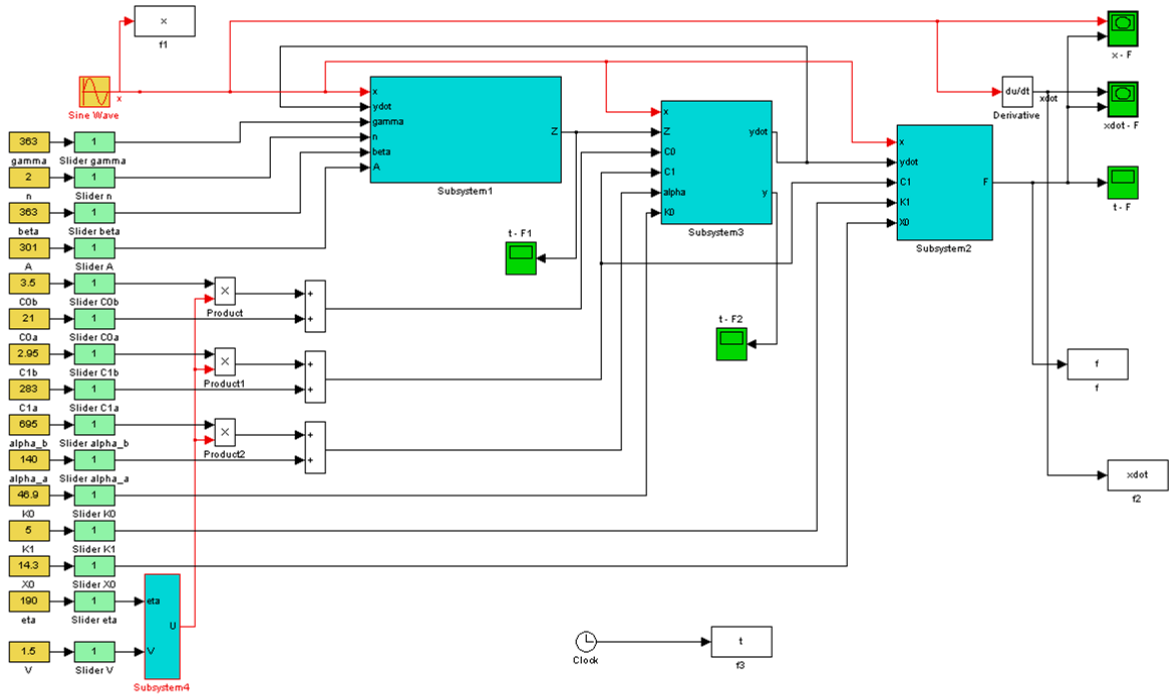
اسپنسر در مقاله خود با توجه به داده های آزمایشگاهی مقادیری را برای هر کدام از پارامترها انتخاب کرده است که در جدول (۲-۲) ارائه شده است.

### ۲-۲-۱-۱ ایجاد مدل SIMULINK برای مدل اسپنسر

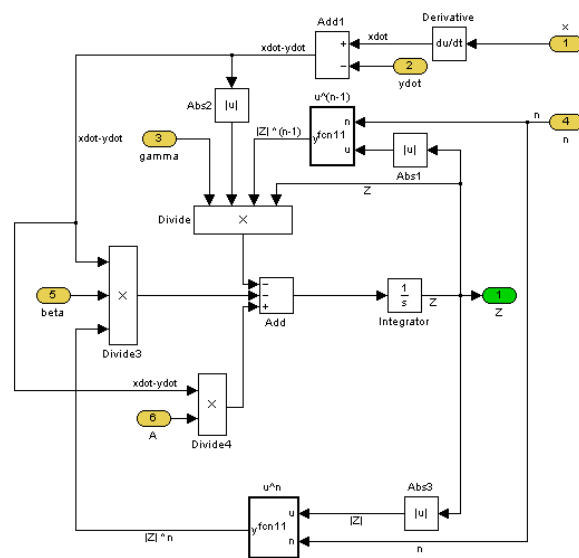
در این قسمت مدل ارائه شده اسپنسر در محیط SIMULINK نرم افزار MATLAB با توجه به داده های جدول (۲-۲) ایجاد میشود و سپس با تغییر دادن هر کدام از این پارامترهای اثر آنها را روی شکل نهایی مدل را مشخص میکنیم. مدل SIMULINK ایجاد شده برای این مدل مطابق شکل (۲-۱۴) میباشد. ورودیهای این مدل تابع تحریک سینوسی، ولتاژ ورودی و ۱۴ پارامتر سیستم هستند. خروجی این مدل نیز نیرو دمپر میباشد. این مدل دارای چهار زیر سیستم میباشد که در شکل‌های (۲-۱۵) تا (۲-۱۸) دیده میشوند. برای روشن شدن نقش هر یک از این زیر سیستم ها در مدل باید به این نکته اشاره شود که زیر سیستم (۱) مربوط به رابطه (۲-۲۵)، زیر سیستم (۲) مربوط به رابطه (۲-۲۴)، زیر سیستم (۳) مربوط به رابطه (۲-۲۶) و در آخر زیر سیستم شماره (۴) مربوط به شبیه سازی رابطه (۲-۳۰) میباشد.

جدول (۲-۲) مقادیر پارامترهای مدل اسپنسر

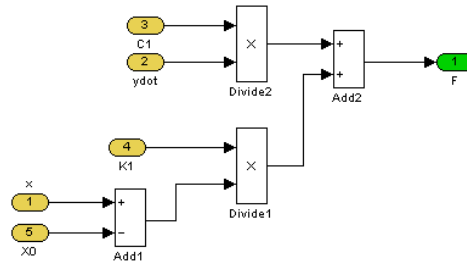
Parameter	Value	Parameter	Value
$c_{0a}$	21.0 N·sec/cm	$\alpha_a$	140 N/cm
$c_{0b}$	3.50 N·sec/cm·V	$\alpha_b$	695 N/cm·V
$k_0$	46.9 N/cm	$\gamma$	363 cm <sup>-2</sup>
$c_{1a}$	283 N·sec/cm	$\beta$	363 cm <sup>-2</sup>
$c_{1b}$	2.95 N·sec/cm·V	$A$	301
$k_1$	5.00 N/cm	$n$	2
$x_0$	14.3 cm	$\eta$	190 sec <sup>-1</sup>



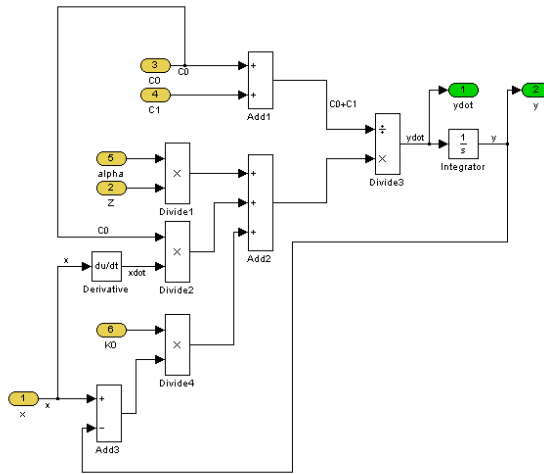
شکل (۲-۱۴) مدل SIMULINK ایجاد شده برای مدل اسپنسر



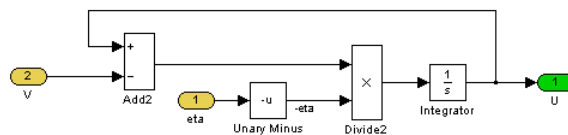
شکل (۲-۱۵) زیر سیستم (۱) مدل اسپنسر



شکل (۲-۱۶) زیر سیستم (۲) مدل اسپنسر

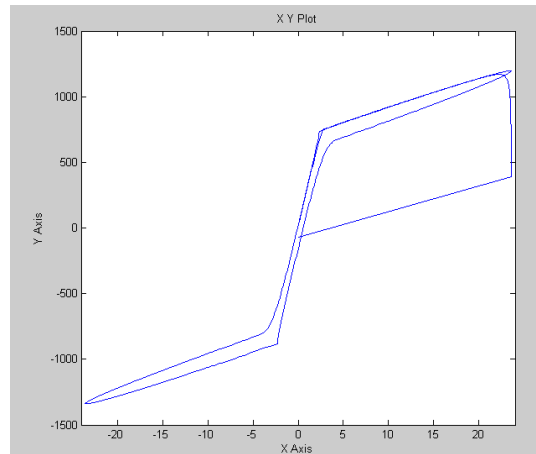


شکل (۲-۱۷) زیر سیستم (۳) مدل اسپنسر

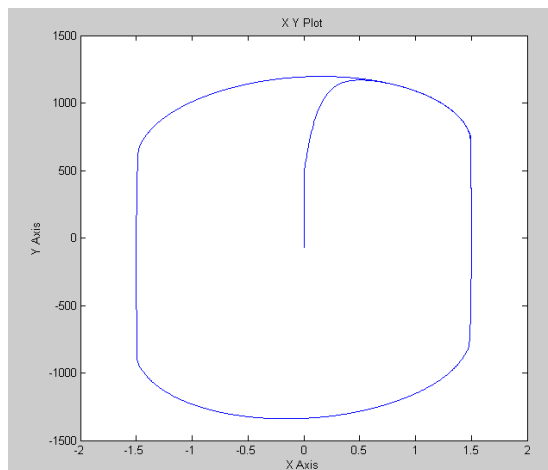


شکل (۲-۱۸) زیر سیستم (۴) مدل اسپنسر

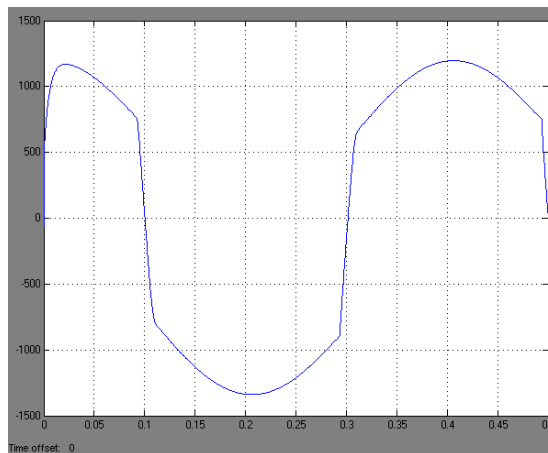
با اجرای مدل، نمودارهای نیروی دمپر بر حسب زمان، جابجایی و سرعت به صورت شکل‌های (۲-۱۹) تا (۲-۲۱) به دست می‌آیند.



شکل (۲-۱۹) نمودار نیروی دمپر بر حسب سرعت دمپر



شکل (۲-۲۰) نمودار نیروی دمپر بر حسب جابجایی دمپر



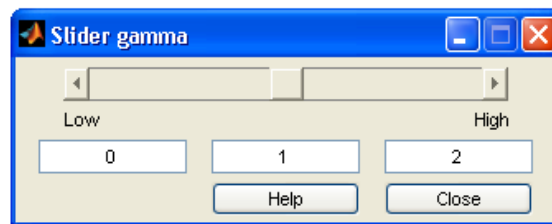
شکل (۲-۲۱) نمودار نیروی دمپر بر حسب زمان

## ۲-۱-۲-۲ بررسی اثر پارامترهای مدل اسپنسر روی شکل نهایی مدل

برای بررسی اثر هر کدام از پارامترها بر روی شکل نهایی مدل، بعد از بلوک ایجاد شده مربوط به مقدار هر کدام از پارامترها در مدل SIMULINK، بلوک ضریب متغیر<sup>۱</sup> قرار داده شده تا بتوان بدون نیاز به اجرای مجدد مدل اثر تغییر هر کدام از پارامترها را مشخص کرد.

بدین ترتیب برای تغییر دادن هر پارامتر دلخواه مدل کافی است لغزنده<sup>۲</sup> مربوط به ضریب متغیر آن پارامتر را جابجا کنیم تا اثر تغییر پارامتر به صورت لحظه ای روی نمودارهای خروجی مشاهده شود.

مثلا در مورد پارامتر نمونه  $\gamma$ ، لغزنده مربوط به آن، با بازکردن بلوک Slider Gamma به صورت شکل زیر دیده خواهد شد.



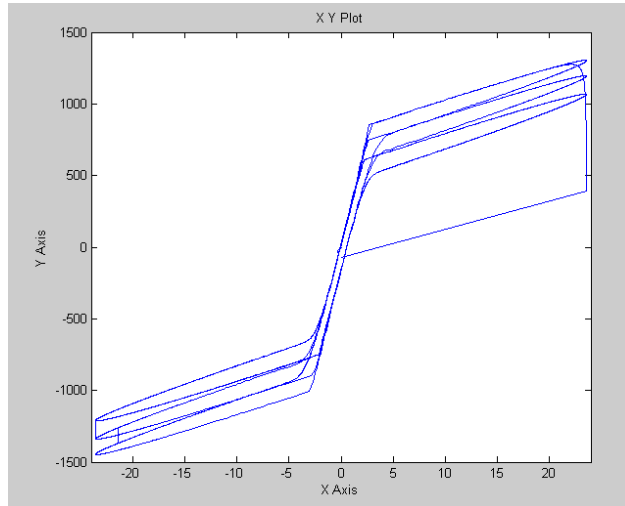
شکل (۲-۲۲) لغزنده مربوط به پارامتر  $\gamma$

با جابجا کردن لغزنده میتوان یک عدد که بین یک تا دو میباشد را در پارامتر  $\gamma$  به صورت همزمان با اجرای برنامه ضرب کرد و نحوه تغییر خروجی مدل را با تغییر این پارامتر مشاهده کرد.

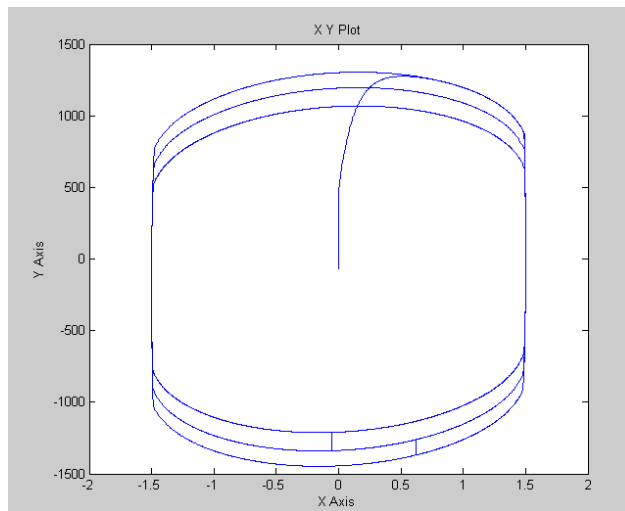
برای پارامتر نمونه  $\gamma$  با تغییر آن از ۰.۵ تا ۲ برابر مقدار اولیه، خروجی مدل به صورت زیر خواهد بود.

<sup>1</sup> Slider gain

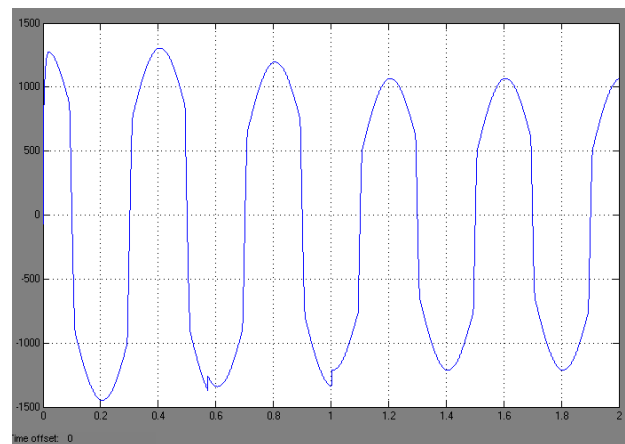
<sup>2</sup> Slider



شکل (۲۳-۲) نمودار نیرو-سرعت مدل با تغییر پارامتر  $\gamma$



شکل (۲۴-۲) نمودار نیرو-جابجایی مدل با تغییر پارامتر  $\gamma$



شکل (۲۵-۲) نمودار نیرو-زمان مدل با تغییر پارامتر  $\gamma$



از نحوه تغییر رفتار مدل با افزایش پارامتر  $\gamma$  در نمودار نیرو-سرعت میتوان نتیجه گرفت که افزایش این پارامتر موجب کاهش نیروی تسلیم و اندکی کاهش در شیب پیش از تسلیم شده است.

اثر تغییر هر کدام از پارامترها روی خروجی نمودار نیرو-سرعت دمپر را میتوان به صورت جدول زیر ارائه داد.

جدول (۲-۳) اثر پارامترهای مدل روی مشخصه های نمودار نیرو سرعت

پارامتر مدل	اثر روی مشخصه های نمودار نیرو سرعت
$C1$	شیب پیش از تسلیم + سائز حلقه هیستریزس + نیروی تسلیم
$C0$	شیب پس از تسلیم + سائز حلقه هیستریزس در سرعت‌های بالا
$Alpha$	تنش تسلیم + سائز حلقه
$k0$	سائز حلقه هیستریزس در سرعت‌های بالا
$K1$	انحراف از وسط + شیب پس از تسلیم
$gamma$	نیروی تسلیم + شیب پیش از تسلیم
$beta$	نیروی تسلیم + شیب پیش از تسلیم
$A$	نیروی تسلیم + سائز حلقه پسماند
$n$	نیروی تسلیم

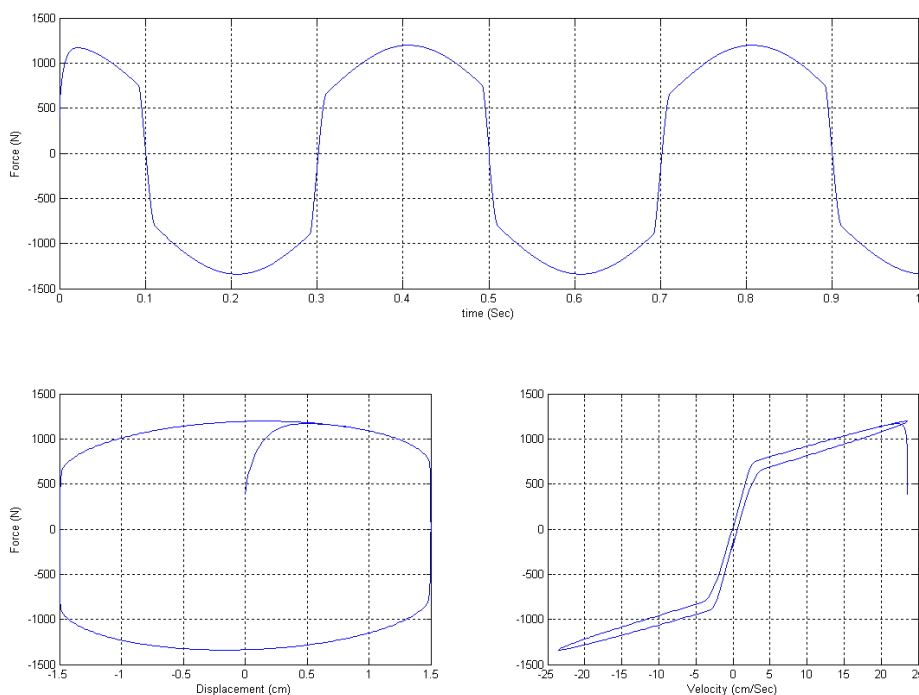
همانطور که در جدول بالا دیده میشود هر کدام از پارامترهای مدل دو یا چند مشخصه نمودار نیرو-سرعت را باهم تغییر میدهند که این موضوع موجب وابستگی پارامترهای مدل به یکدیگر میشود که در نتیجه پیچیدگی های فراوانی را در تطبیق مدل ارائه شده با داده های آزمایشگاهی موجب میشود. بنابراین ارائه مدلی جدید و یا

بهینه سازی این مدل به گونه ای که وابستگی بین پارامترهای مدل به حداقل رسیده باشد میتواند منجر به ایجاد مدلی با کارایی بهتر شود.

## ۲-۱-۲-۳ مقایسه بین شبیه سازی مدل در محیط SIMULINK و شبیه سازی مدل به کمک کد نویسی (M-File)

در بخش قبل دستگاه معادلات دیفرانسیل مربوط به مدل در محیط Simulink نرم افزار متلب حل و نتایج رسم شد. راه دیگر برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل از طریق برنامه نویسی میباشد. در پیوست (۱) کدهای نوشته شده برای حل معادلات حاکم بر مدل اسپنسر در محیط برنامه نویسی نرم افزار متلب آورده شده است تا کارایی دو روش را با هم مقایسه کرده و بهترین روش را برای ادامه کار انتخاب کنیم.

همانطور که از متن برنامه اصلی (رجوع شود به پیوست (۱)) نیز مشخص است این برنامه خروجی مدل اسپنسر را برای فرکانس تحریک 2.5Hz و دامنه تحریک 1.5cm ایجاد میکند. پس از اجرای برنامه خروجی به صورت زیر خواهد بود که سه نمودار نیرو بر حسب سرعت، جابجایی و زمان را نشان میدهد.

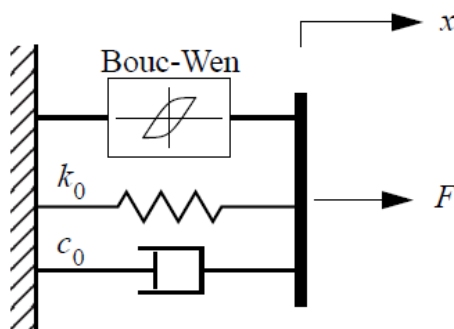


شکل (۲-۲۶) نیروی خروجی مدل اسپنسر برای 1.5cm , 2.5Hz

اکنون در مورد مقایسه کارایی و سهولت دو روش Simulink و برنامه نویسی (M-File) میتوان گفت که از نظر سرعت حل در مورد مسائلی که در این جا حل شدند تفاوتی بین این دو روش وجود ندارد، از نظر دقت حل نیز، دقت نهایی حل در هر دو روش قابل تعیین شدن میباشد و در این مورد هم تفاوتی وجود ندارد ولی از لحاظ پیاده سازی مدل و کارکردن با پارامترها، محیط Simulink توانایی های بیشتری را دارا میباشد و به همین جهت در ادامه تنها از این محیط برای شبیه سازی ها استفاده خواهد شد.

## ۲-۲-۲-۲ بررسی مدل ارائه شده توسط بوک-ون<sup>۱</sup>

همانطور که قبلا نیز اشاره شد مدل بوک-ون برای شبیه سازی رفتار دمپر مگنتوریولوژیک به صورت نشان داده شده در شکل زیر میباشد.



شکل (۲-۲) مدل بوک-ون

معادلات مربوط به این مدل نیز در روابط (۲-۹) تا (۲-۱۳) ارائه شده است.

## ۲-۲-۲-۱ ایجاد مدل simulink

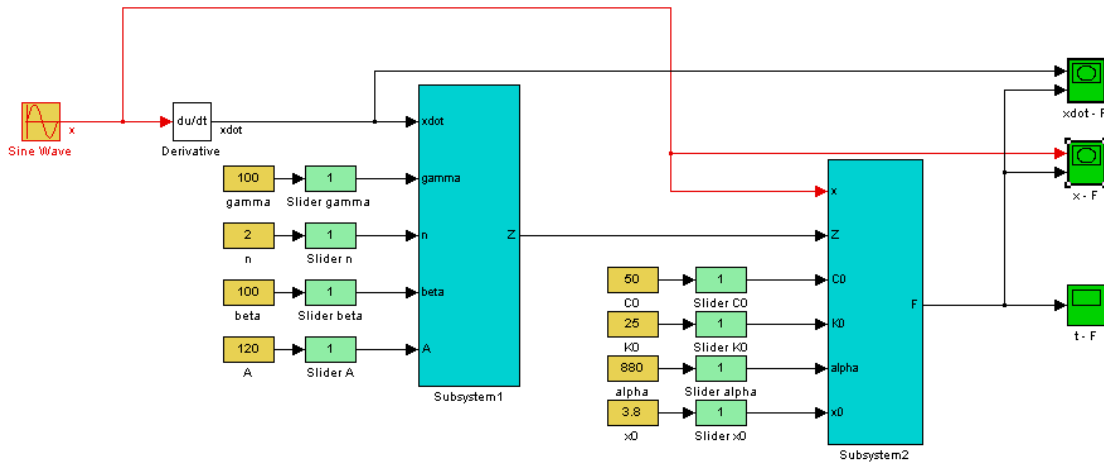
در اینجا پارامترهای مدل به صورت زیر انتخاب میشوند،

<sup>1</sup> Wen, Y.K. (1976).

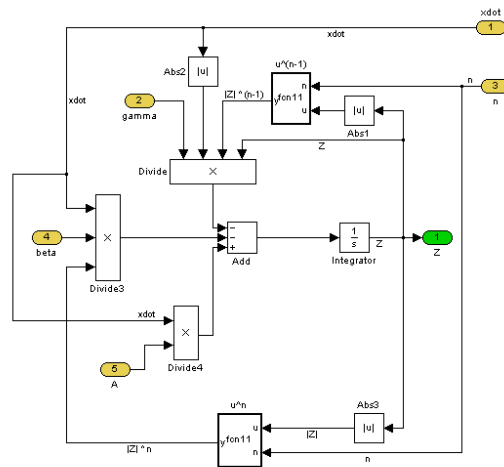
$$\alpha = 880 N/cm \quad c_0 = 50 N \cdot sec/cm \quad k_0 = 25 N/cm \quad (35-2)$$

$$\beta = \gamma = 100 cm^{-2} \quad n = 2 \quad A = 120 \quad x_0 = 3.8 cm$$

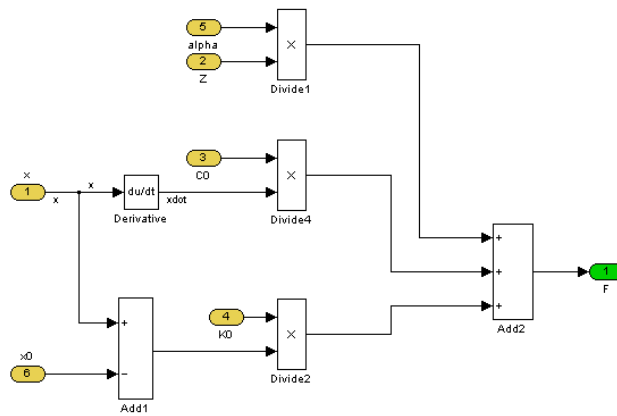
مدل SIMULINK ایجاد شده برای این مدل در شکل (۲-۲۸) دیده میشود. این مدل دارای ۲ زیر سیستم میباشد که جزئیات مربوط به هر کدام از آنها در شکل‌های (۲-۲۹) و (۲-۳۰) آمده است. زیر سیستم (۱) مربوط به معادله دیفرانسیل (۲-۱۰) و زیر سیستم (۲) مربوط به معادله (۲-۹) میباشد. با اجرای مدل، خروجی نیرو بر حسب زمان، جابجایی و سرعت در شکل‌های (۲-۳۱) تا (۲-۳۳) رسم شده اند.



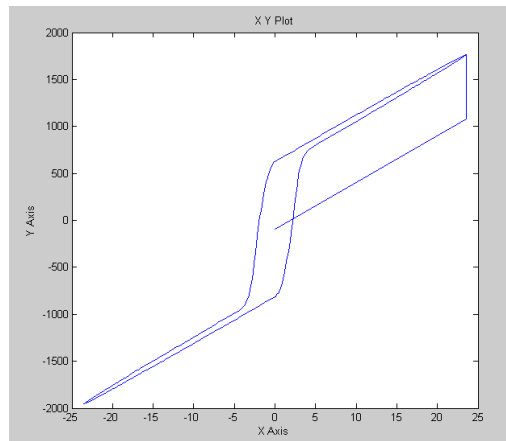
شکل (۲-۲۸) مدل simulink ایجاد شده برای مدل بوک-ون



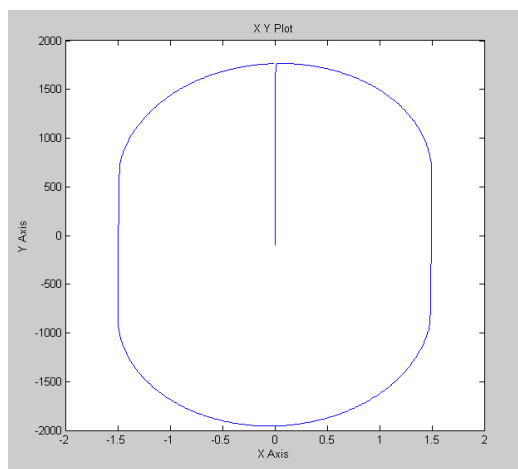
شکل (۲-۲۹) زیر سیستم (۱) مدل بوک-ون



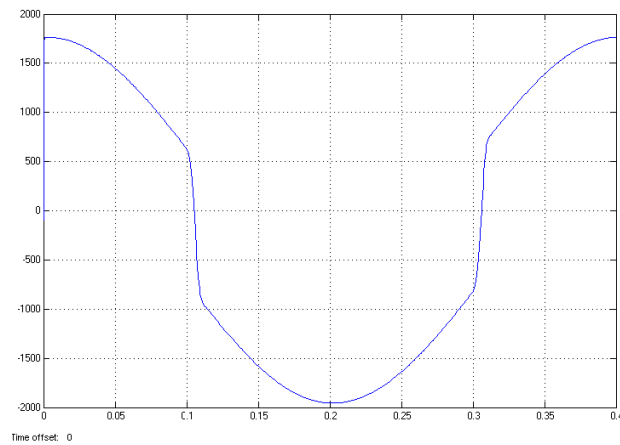
شکل (۲-۳۰) زیر سیستم (۲) مدل بوک-ون



شکل (۲-۳۱) نیروی دمپر بر حسب سرعت، برای شرایط تحریک 1.5cm , 2.5Hz



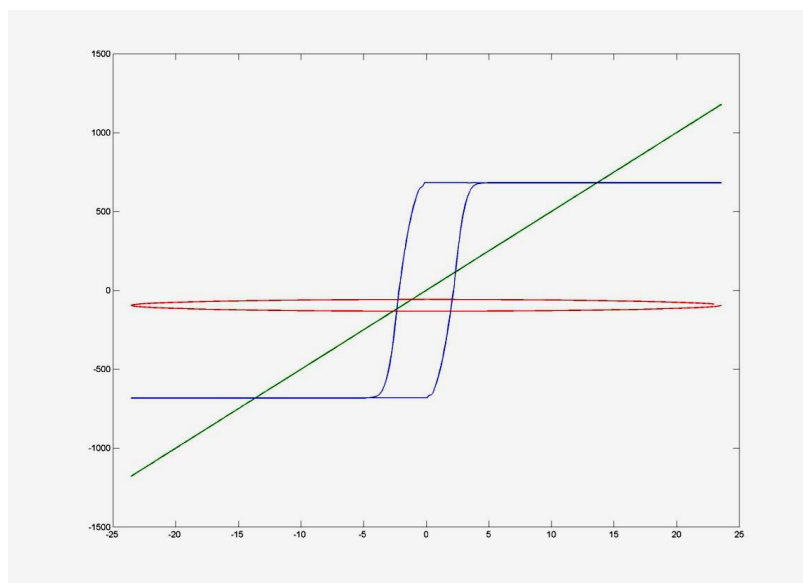
شکل (۲-۳۲) نیروی دمپر بر حسب جابجایی، برای شرایط تحریک 1.5cm , 2.5Hz



شکل (۲-۳۳) نیروی دمپر بر حسب زمان، برای شرایط تحریک  $2.5\text{Hz}$ ،  $1.5\text{cm}$

## ۲-۲-۲-۲ بررسی اثر پارامترهای مدل بوک-ون روی شکل نهایی مدل

مدل اسپنسر که قبلاً بررسی شد در واقع مدل بهبود یافته‌ای برای مدل بوک-ون است. در مدل بوک-ون سه نیروی فنر، دمپر و پارامتر  $Z$  نیروی نهایی را تشکیل می‌دهند (معادله (۲-۹)). اگر برای نمودار نیرو-سرعت دمپر هر یک از این سه نیرو را به طور مجزا رسم کنیم شکل (۲-۳۴) به دست خواهد آمد.



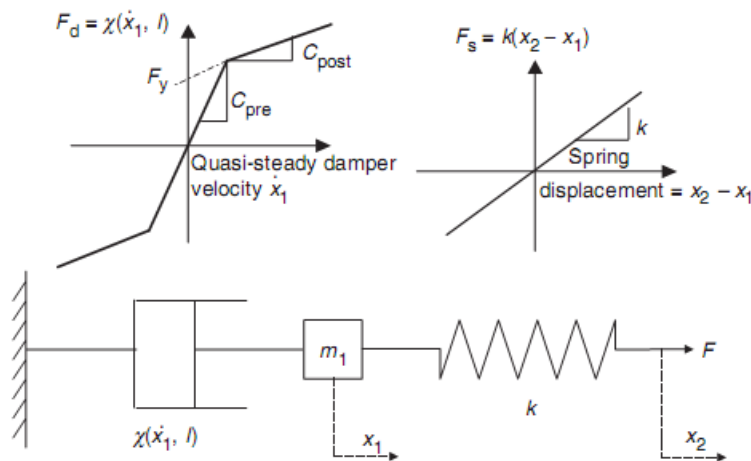
شکل (۲-۳۴) اثر نیروی فنر، دمپر روغنی و پارامتر  $Z$  به طور مجزا روی نیروی دمپر

اگر مشخصه های نمودار نیرو-سرعت که برای مقایسه بین رفتار واقعی دمپر و رفتار شبیه سازی شده مدل به کار میرود را به صورت شیب پیش از تسلیم، شیب پس از تسلیم، سائز حلقه هیستریزس در سرعت‌های پایین و بالا و نیروی تسلیم تعریف کنیم در این صورت هر یک از پارامترهای مدل بوک-ون همانند مدل اسپنسر چندین مشخصه مدل را با هم تغییر خواهد داد که این موضوع باعث ایجاد مشکلاتی در یافتن پارامترهای بهینه از روی نمودارهای آزمایشگاهی میشود.

اگر بتوانیم مدلی ایجاد کنیم که هر کدام از پارامترهای آن تنها یکی از مشخصه های نمودار نیرو-سرعت را تغییر دهد، در روند تطبیق پارامترهای مدل با داده های آزمایشگاهی و دقت نهایی مدل میتواند بهبود خوبی به دست آید.

### ۲-۲-۳ بررسی مدل ارائه شده توسط سیمس<sup>۱</sup>

همانطور که در شکل (۲-۳۵) دیده میشود این مدل از یک دمپر دو لزجتی<sup>۲</sup> که با یک جرم و یک فنر خطی به صورت سری قرار گرفته تشکیل شده است.



شکل (۲-۳۵) مدل سیسمس برای دمپر مگنتوریولوژیک

که در آن روابط مدل به صورت زیر بیان میشود :

<sup>1</sup> Sims, N.D. et al. (2004)

<sup>2</sup> Bi-viscous

$$k(x_2 - x_1) - \chi(\dot{x}_1, H) = m_1 \ddot{x}_1 \quad (۳۶-۲)$$

$$F - k(x_2 - x_1) = m_2 \ddot{x}_2. \quad (۳۷-۲)$$

$$\chi(\dot{x}, I) = \begin{cases} C_{pre} \dot{x} & \dot{x} \leq F_y / C_{pre} \\ C_{post} \dot{x} + F_y \operatorname{sgn}(\dot{x}) & \dot{x} > F_y / C_{pre} \end{cases} \quad (۳۸-۲)$$

این مدل دارای شش پارامتر مجهول  $F_y, k, m_1, m_2, C_{pre}, C_{post}$  میباشد. سیمس در مقاله خود با توجه به داده های آزمایشگاهی مقادیر زیر را برای پارامترهای مدل ارائه میدهد،

$$C_{pre} = 100 \text{ KN.s/m} \quad \text{و} \quad m_2 = 0 \quad \text{و} \quad m_1 = 2 \text{ Kg} \quad \text{و} \quad k = 13 \text{ MN/m}$$

همچنین برای  $F_y$ ،  $C_{post}$  داریم،

$$C_{post} = 0.6167 + 3.7383 \tanh(1.3629I). \quad (۳۹-۲)$$

$$F_y = -0.0115 + 1.3063 \tanh(1.1946I) \quad (۴۰-۲)$$

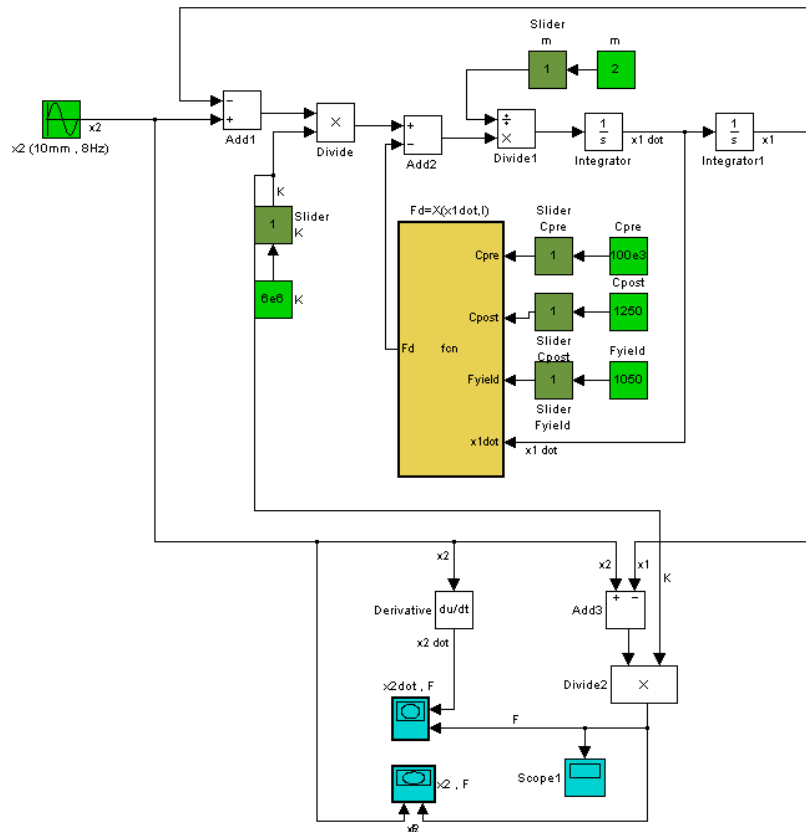
### ۲-۳-۲-۱ ایجاد مدل simulink برای مدل سیمس

مدل SIMULINK ایجاد شده برای این مدل در شکل (۳۶-۲) دیده میشود. مدل ایجاد شده دارای یک بلوک تابع توسعه یافته<sup>۱</sup> میباشد که مربوط به دمپر دو لزجتی بوده و کدهای مربوط به آن در پیوست (۲) آورده شده اند. در مدل ارائه شده توسط سیمس روابط بین  $C_{post}$ ،  $F_y$  با جریان به صورت  $\tanh$  بیان شده است ولی در مدل Simulink ایجاد شده این دو پارامتر به صورت تابع جریان بیان نشده اند چرا که هدف در اینجا بررسی اثر تغییر هر کدام از پارامترها روی شکل نهایی مدل است.

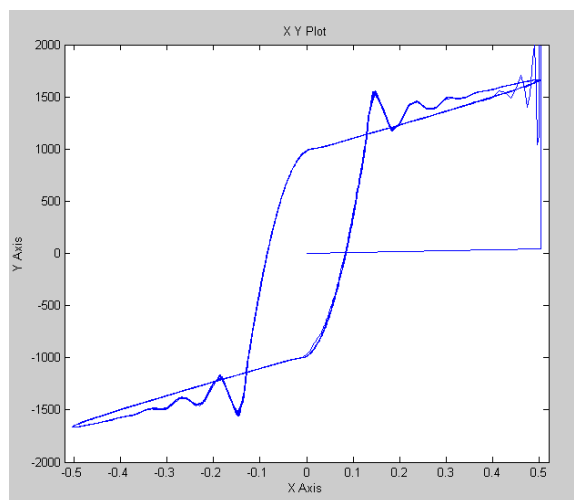
<sup>1</sup> Embedded MATLAB Function



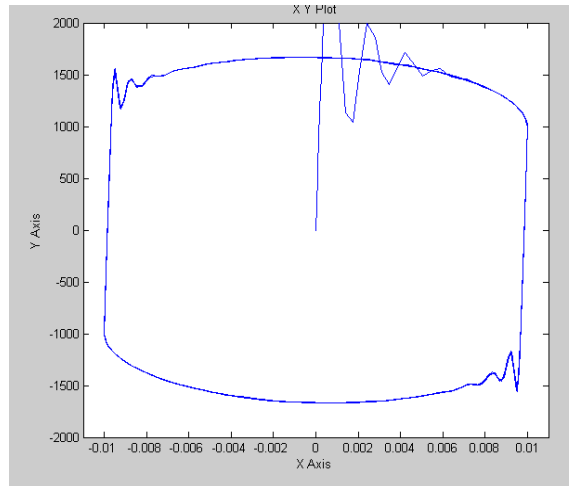
با اجرای مدل، خروجی نیرو بر حسب زمان، جابجایی و سرعت به صورت که در شکل‌های (۲-۳۷) تا (۲-۳۹) دیده میشود خواهد بود.



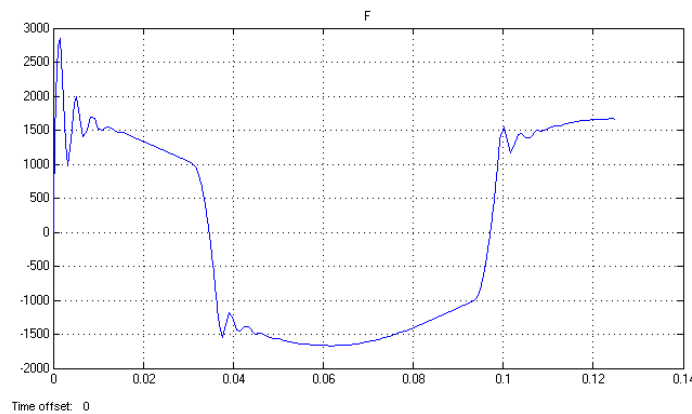
شکل (۲-۳۶) مدل simulink ایجاد شده برای مدل سیمس



شکل (۲-۳۷) نیروی دمپر بر حسب سرعت، برای شرایط تحریک 10mm , 8Hz



شکل (۳۸-۲) نیروی دمپر بر حسب جابجایی، برای شرایط تحریک 10mm , 8Hz

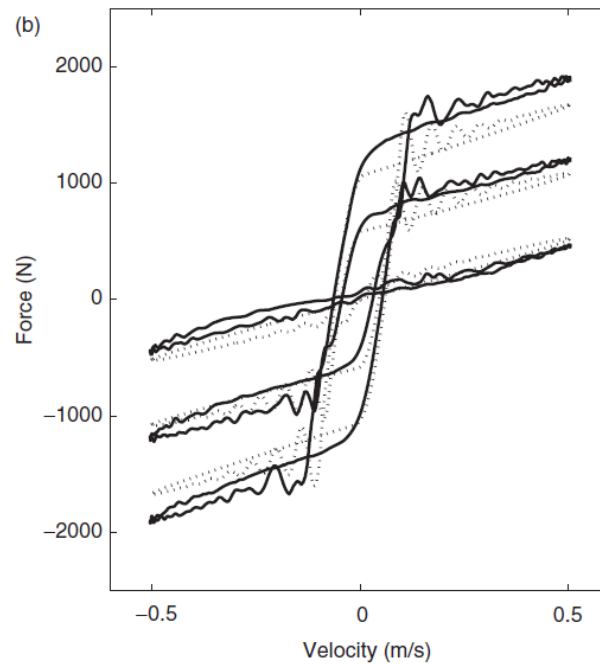


شکل (۳۹-۲) نیروی دمپر بر حسب زمان، برای شرایط تحریک 10mm , 8Hz

## ۲-۳-۲-۲ بررسی اثر پارامترهای مدل سیمس روی شکل نهایی مدل

همانطور که از شکل (۳۷-۲) نیز مشخص است یکی از توانایی های اصلی این مدل امکان شبیه سازی نوسانات نیرو در سرعت های بالا میباشد، بتربی<sup>۱</sup> اثر دما بر روی رفتار دمپر را بررسی کرده است، او در کار خود از مدل سیمس برای شبیه سازی رفتار دمپر استفاده کرده است، شکل (۴۰-۲) مقایسه بین نمودار آزمایشگاهی (—) و داده های شبیه سازی شده (...) در شرایط تحریک 8mm , 10Hz که توسط او ارائه شده است را نشان میدهد.

<sup>1</sup> David Batterbee and N.D. Sims (2008)



شکل (۲-۴) مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی مدل سیمس مورد استفاده در مقاله بتربی

با توجه به شکل، در سرعت‌های بالا نیروی دمپر دارای نوساناتی است که این نوسانات در مدل سیمس قابل شبیه سازی هستند و مدلهایی که قبلاً مورد بررسی قرار گرفتند قادر به شبیه سازی این نوسانات نیستند. پس از بررسی اثر هر یک از پارامترهای روی شکل نهایی مدل نتایج به دست آمده به شکل جدول زیر خواهند بود

جدول (۲-۴) اثر پارامترهای مدل سیمس روی مشخصه های نمودار نیرو سرعت

پارامتر مدل	اثر پارامتر مدل بر مشخصه های نمودار نیرو سرعت
<b><i>Cpre</i></b>	شیب پیش از تسلیم + سایز حلقه هیستریزس + نیروی تسلیم
<b><i>Cpost</i></b>	شیب پس از تسلیم + میزان نوسانات نیرو
<b><i>Fy</i></b>	نیروی تسلیم + سایز حلقه پسماند
<b><i>k</i></b>	اندازه حلقه پسماند در سرعت‌های پایین + شیب پیش تسلیم + میزان نوسانات نیرو
<b><i>m</i></b>	میزان نوسانات نیرو

با توجه به جدول (۲-۴) در این مدل نیز هر یک از پارامترهای مدل دو یا چند مشخصه نمودار نیرو-سرعت را تغییر میدهد که این امر مشکلاتی را در یافتن پارامترهای بهینه برای مدل ایجاد میکند. همچنین این مدل برای تغییر اندازه حلقه پسماندی در سرعتهای بالا پارامتری را ارائه نمیدهد.

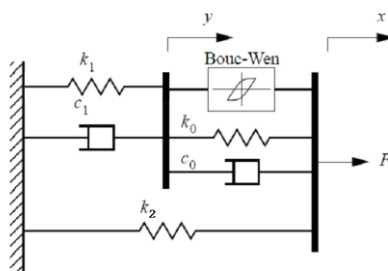
## فصل سوم

### ارائه مدل بهبود یافته برای شبیه سازی رفتار دمپر

تا اینجا سه مدل ارائه شده برای شبیه سازی رفتار دمپر یعنی مدل های بوک-ون، اسپنسر و سیمس را مورد بررسی قرار دادیم و نقاط ضعف و قابلیت های هر کدام را بررسی کردیم. اکنون میخواهیم مدل بهبود یافته ای را ارائه دهیم که بتواند تا حد امکان نقاط ضعف بیان شده برای مدل های قبلی را پوشش دهد.

#### ۳-۱ مدل تغییر یافته اسپنسر

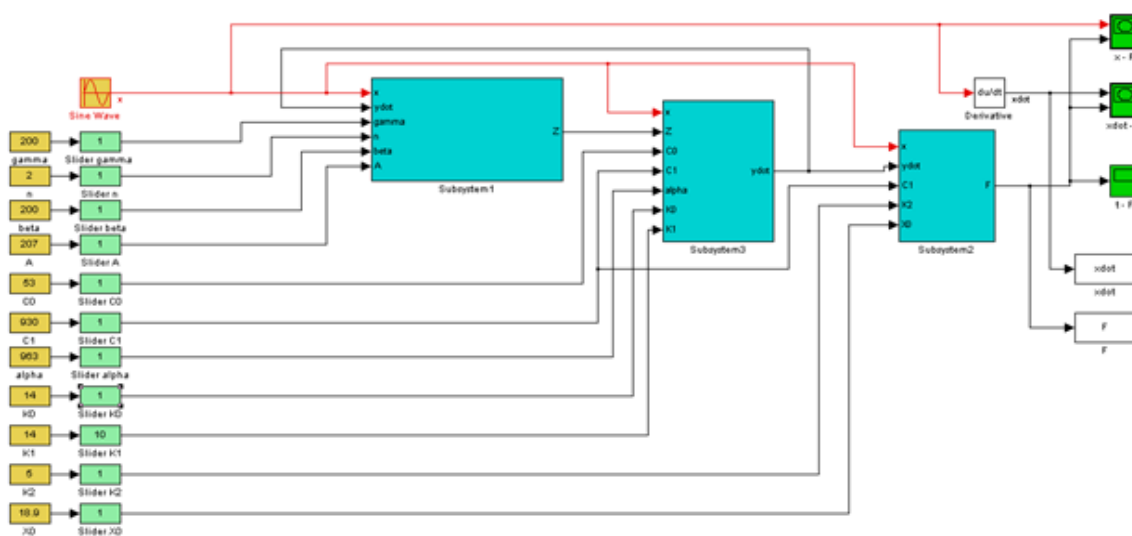
در مدل ارائه شده توسط اسپنسر برای تعیین سائز حلقه هیستریزس در سرعت های پایین همانطور که قبلا نیز اشاره شد، پارامتر مجزایی در نظر گرفته نشده است، حال با توجه به شکل (۲-۱۰) از آنجا که فنر  $k_0$  و دمپر  $c_0$  مربوط به تغییرات در سرعت های بالا هستند و همچنین دمپر  $c_1$  مربوط به شیب در سرعت های پایین است سعی میکنیم با اضافه کردن یک فنر خطی به موازات دمپر  $c_1$ ، سائز حلقه در سرعت های پایین را با ایجاد پارامتر جدید  $K_1$  کنترل کنیم، در این صورت شکل نهایی مدل را میتوان به صورت شکل (۳-۱) در نظر گرفت.



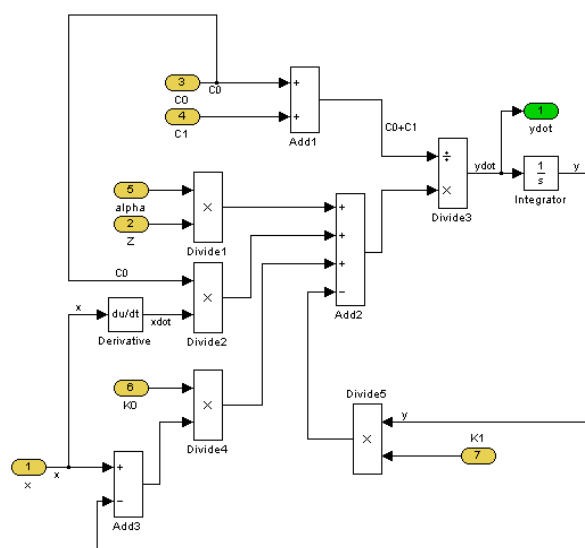
شکل (۳-۱) مدل تغییر یافته اسپنسر

### ۳-۱-۱ ایجاد مدل SIMULINK برای مدل تغییر یافته اسپنسر

شکل (۳-۲) مدل SIMULINK ایجاد شده برای مدل تغییر یافته اسپنسر را نشان میدهد. تنها تغییر این مدل نسبت به مدلی که قبلا برای اسپنسر ایجاد شد (شکل (۲-۲)) در زیر سیستم شماره (۳) میباشد که به صورت شکل (۳-۳) تغییر میکند.

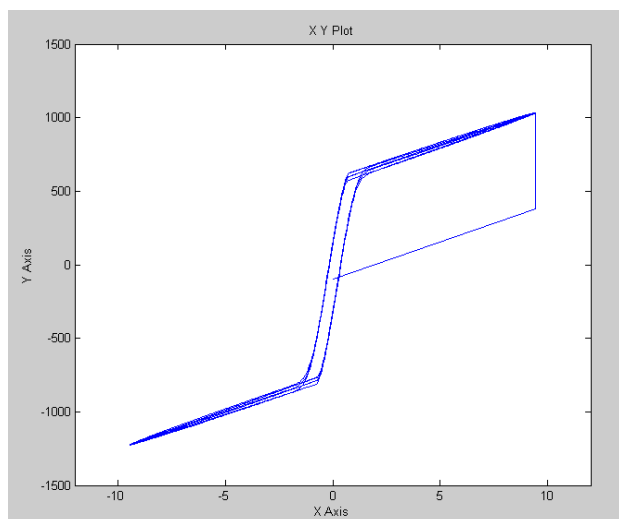


شکل (۳-۲) مدل SIMULINK برای مدل تغییر یافته اسپنسر

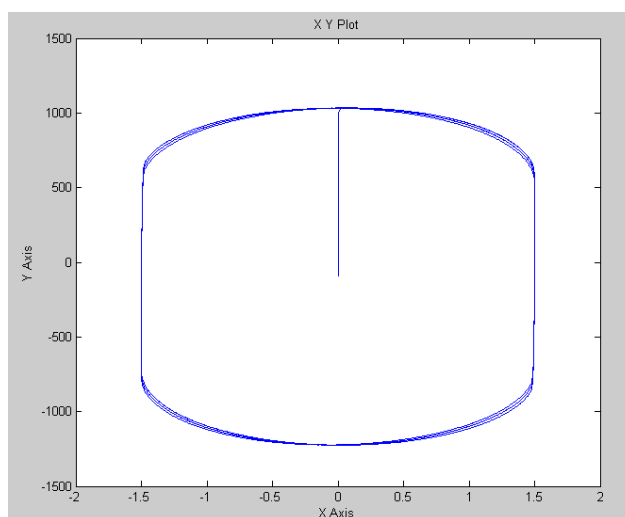


شکل (۳-۳) زیر سیستم (۳) مربوط به مدل تغییر یافته اسپنسر

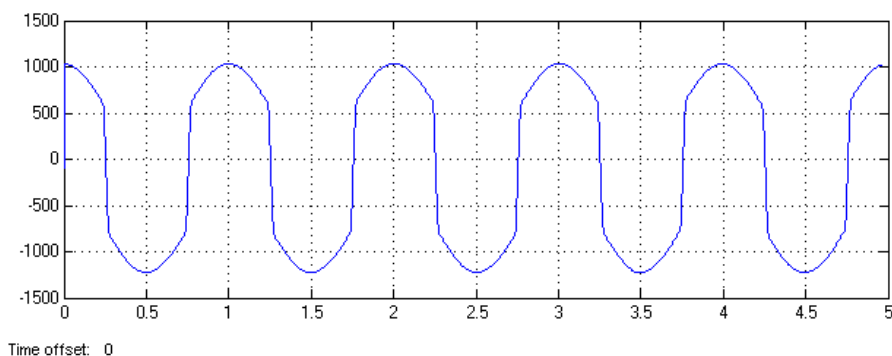
اکنون برای بررسی اثر فنر اضافه شده به مجموعه سیستم، پارامتر مربوط به  $k_1$  را از صفر تا ۵۰ تغییر می‌دهیم و تاثر آن را روی خروجی مدل بررسی می‌کنیم. شکل‌های زیر تغییرات نیروی دمپر با افزایش ثابت فنر  $k_1$  را نشان می‌دهند.



شکل (۳-۴) نیروی دمپر بر حسب سرعت برای مدل تغییر یافته اسپنسر با تغییر  $k_1$  از صفر تا ۵۰



شکل (۳-۵) نیروی دمپر بر حسب جابجایی برای مدل تغییر یافته اسپنسر با تغییر  $k_1$  از صفر تا ۵۰



شکل (۳-۶) نیروی دمپر بر حسب زمان برای مدل تغییر یافته اسپنسر با تغییر  $K1$  از صفر تا ۵۰

### ۳-۱-۲ بررسی اثر فنر اضافه شده در شبیه سازی مدل

هدف از اضافه کردن یک فنر به مجموعه مدل اسپنسر ایجاد یک پارامتر جدید بود تا بتوان به کمک آن سائز حلقه هیستریزس در سرعتهای پایین را کنترل کرد. اما با توجه به شکل (۳-۴) مشخص است که با این تغییر نتوانسته ایم به هدف خود برسیم و فنر اضافه شده نیروی تسلیم و شیب پس از تسلیم را تغییر میدهد، بدین ترتیب اضافه کردن یک فنر به موازات دمپر  $C1$  نمیتواند بهبود مورد نظر را در عملکرد مدل اسپنسر ایجاد کند. بدین ترتیب برای ایجاد مدلی با کارایی بالاتر نسبت به مدل‌های قبلی باید به صورت دیگری عمل کرد که در ادامه توضیح داده میشود.

### ۳-۲ ایجاد یک مدل غیر پارامتریک

مدل‌هایی که تا کنون بررسی شده اند مدل‌های پارامتریک بوده اند، علاوه بر این دسته از مدل‌ها، مدل‌های غیر پارامتریک نیز وجود دارند که مهمترین آنها مدل‌هایی هستند که از توابع  $\tanh$  برای مدل سازی بهره میبرند، این گونه مدل‌ها از این نظر که برای پیاده سازی آنها نیاز به حل معادله دیفرانسیل نیست، سرعت شبیه سازی را



افزایش میدهند. در این قسمت میخواهیم با ارائه این دسته از مدلها کارایی مدل سازی دمپر مگنتوریولوژیک را افزایش دهیم.

بدین منظور ابتدا باید مدل پایه، یعنی مدلی که بتواند به خوبی پدیده هیستریزس نمودار نیرو-سرعت را برای جریانها، فرکانسها و دامنه های مختلف تحریک با تغییر پارامترهای مدل به خوبی هم پوشانی نماید انتخاب شود. پارامترهای مدل پایه تابعی از شرایط تحریک نیستند و صرفا اعداد ثابتی میباشند. مثلا مدل بوک-ون و یا مدلهایی که از توابع سیگموئیدی برای مدل سازی بهره برده اند میتوانند گزینه مناسبی برای مدل پایه باشند. به منظور مدل کردن رفتار دمپر MR، مشخصه هایی در شکل نمودار نیرو-سرعت دمپر تعیین میگردد و سپس سعی میشود مدل ایجاد شده بهترین تطبیق را با این مشخصه ها داشته باشد. بعضی از این مشخصه ها عبارتند از: شیب پیش از تسلیم، شیب پس از تسلیم، سایز حلقه هیستریزس در سرعت های پایین و بالا و نیروی بیشینه. از قبل میدانیم در هر مدل پارامترهایی وجود دارد که وظیفه کنترل این مشخصه ها را بر عهده دارند. همانطور که پیشتر نیز ذکر شد در مدل بوک-ون و مدلهایی که از توابع سیگموئیدی مثل  $\tanh$  استفاده میکنند، بعضا مشخصه های نمودار به یکدیگر وابسته هستند. مثلا در مدل بوک-ون بهبود یافته که در آن نیرویی میرایی هیستریزس از روابط زیر به دست می آید:

$$f = c_1 \cdot \dot{y} + k_1 \cdot (x - x_0) \quad (1-3)$$

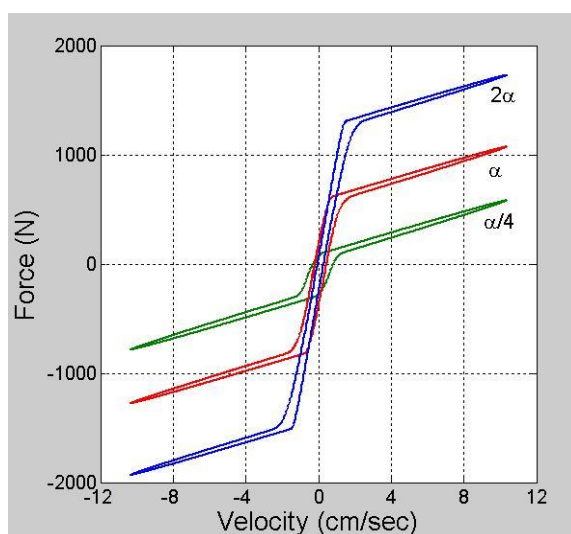
$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A (\dot{x} - \dot{y}) \quad (2-3)$$

$$\dot{y} = \frac{\alpha z + c_0 \dot{x} + k_0 (x - y)}{c_0 - c_1} \quad (3-3)$$

اگر مدل را برای داده های ارائه شده در مقاله اسپنسر<sup>1</sup> ایجاد کنیم (جدول (۲-۲))، با تغییر پارامتر  $\alpha$  که مربوط به نیروی تسلیم است، همانطور که در شکل (۳-۷) دیده میشود، سایز حلقه هیستریزس و شیب پیش از

<sup>1</sup> Spencer et al. (1997)

تسلیم نیز تغییر میکند و یا پارامتر  $c_1$  که مربوط به شیب پیش از تسلیم است، هم نیروی تسلیم وهم سائز حلقه را تغییر میدهد. این وابستگی پارامترها نسبت به هم باعث میشود که اولاً مقدار پیش فرض برای شروع بهینه سازی پارامترهای مدل به راحتی قابل تشخیص نباشد و ثانیاً پیش بینی نحوه تغییر پارامترهای مدل به ازای تغییر مشخصه های نمودار نیرو-سرعت امکان پذیر نباشد



شکل (۳-۷) اثر پارامتر  $\alpha$  در مدل اسپنسر ۲.۵ Hz و ۱.۵ cm و ۱.۵ V

در مدل جدید ارائه شده، مدل پایه با استفاده از تابعی که از سه بخش زیر تعریف میشود، ایجاد شده است :

$$F_1 = f_y \cdot (1 - e^{(k' \cdot (\dot{x} - \dot{x}_h))}) / (1 + e^{(k' \cdot (\dot{x} - \dot{x}_h))}) \quad ; \quad \dot{x} > 0 \quad (۴-۳)$$

$$F_1 = f_y \cdot (1 - e^{(k' \cdot (\dot{x} + \dot{x}_h))}) / (1 + e^{(k' \cdot (\dot{x} + \dot{x}_h))}) \quad ; \quad \dot{x} \leq 0 \quad (۵-۳)$$

که در آن  $f_y$  نیروی تسلیم،  $k'$  شیب پیش از تسلیم و  $\dot{x}_h$  محل برخورد حلقه هیستریزس با محور سرعت میباشد.

اگر شیب  $F_1$  را برای نقاط نیرو صفر در حلقه هیستریزس محاسبه کنیم داریم :

$$F_1'(\pm \dot{x}_h) = 2.k'.f_y \quad (۶-۳)$$

این رابطه نشان میدهد که شیب پیش از تسلیم  $(F_1'(\pm \dot{x}_h))$  علاوه بر پارامتر  $k'$  چگونه با نیروی تسلیم  $f_y$  نیز در ارتباط است، برای حذف این وابستگی  $k'$  را به صورت زیر در نظر میگیریم :

$$k' = k/(2.f_y) \Rightarrow F_1'(\pm \dot{x}_h) = k \quad (۷-۳)$$

که در این رابطه  $k$  شیب پیش از تسلیم میباشد و بدین صورت، شیب پیش از تسلیم مستقل از مقدار نیروی تسلیم خواهد بود.

$$F_2 = C_b.\dot{x} \quad (۸-۳)$$

تابع  $F_2$  در بسیاری از مدل سازی ها مورد استفاده قرار گرفته و معادل نیروی دمپر ویسکوز در مدلسازی پارامتریک میباشد. پارامتر  $C_b$  شیب پس از تسلیم را مشخص میکند.

$$F_3 = h.e^{\frac{-5}{d}.\dot{x}.\dot{x}_h} \quad ; \quad (\dot{x}, \ddot{x} > 0) \quad (۹-۳)$$

$$F_3 = -h.e^{\frac{-5}{d}.\dot{x}.\dot{x}_h} \quad ; \quad (\dot{x}, \ddot{x} < 0) \quad (۱۰-۳)$$

$$F_3 = 0 \quad ; \quad (\dot{x}, \ddot{x} \leq 0) \quad (۱۱-۳)$$

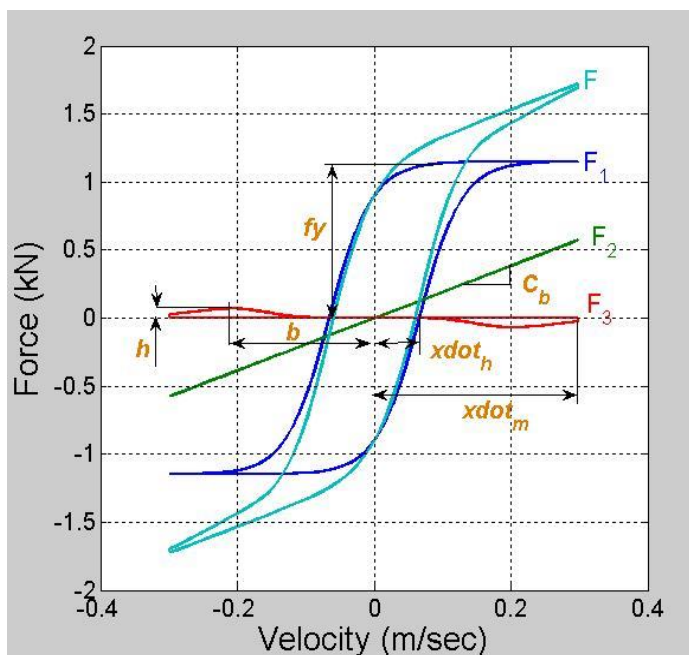
تابع  $F_3$  از دو تابع نمایی با شیبهای متفاوت تشکیل شده که سایز حلقه هیستریزس در سرعتهای بالا را افزایش میدهد و در آن،  $b$  محل ماکزیمم تابع و  $h$  مقدار افزایش سایز حلقه را مشخص میکند. متغیر  $d$  نیز به صورت زیر تعریف میشود :

$$d = 2b \quad ; \quad (|\dot{x}| \leq \frac{\dot{x}_h}{2}) \quad (۱۲-۳)$$

$$d = 2(1.5\dot{x}_m - \frac{\dot{x}_h}{2} - b) \quad ; \quad (|\dot{x}| \geq \frac{\dot{x}_h}{2}) \quad (۱۳-۳)$$

که در آن  $\dot{x}_m$  سرعت بیشینه است و از رابطه زیر به دست می آید،

$$\dot{x}_m = \sqrt{\dot{x}^2 - x \cdot \ddot{x}} \quad (14-3)$$



شکل (۸-۳) توابع  $F, F_1, F_2, F_3$  و پارامترهای مدل برای شرایط تحریک  $0.75 \text{ A}$  و  $2.5 \text{ Hz}$  و  $6.35 \text{ mm}$

بدین ترتیب تابع پایه برای شبیه سازی رفتار دمپر را میتوان به صورت زیر نوشت :

$$F_d = F_1(\dot{x}, k, \dot{x}_h, f_y) + F_2(\dot{x}, C_b) + F_3(\dot{x}, \dot{x}_h, b, h) \quad (15-3)$$

شکل (۸-۳) نحوه رفتار هر یک از سه بخش مدل پایه و همچنین اثر هر یک از پارامترهای مدل را به طور مجزا در وضعیت تحریک خاص نشان میدهد.

برای انطباق مدل پایه روی نمودارهای آزمایشگاهی نیاز به یافتن شش پارامتر مشخصه مدل  $(f_y, k, \dot{x}_h, C_b, b, h)$  است. با توجه به استقلال این پارامترها و آنچه پیشتر بیان شد مقدار حدودی هر کدام از این پارامترها با توجه به نمودارهای آزمایشگاهی برای شرایط تحریک متفاوت به راحتی قابل تخمین زدن است و بنابراین انطباق این

مدل برای شرایط تحریک متفاوت بر روی نمودارهای آزمایشگاهی چه به صورت سعی و خطا و چه با استفاده از روشهای بهینه سازی کاری نه چندان دشوار است که این قابلیت از مزایای این مدل نسبت به مدل‌های ارائه شده دیگر است.

### ۳-۲-۱ به دست آوردن پارامترهای مدل

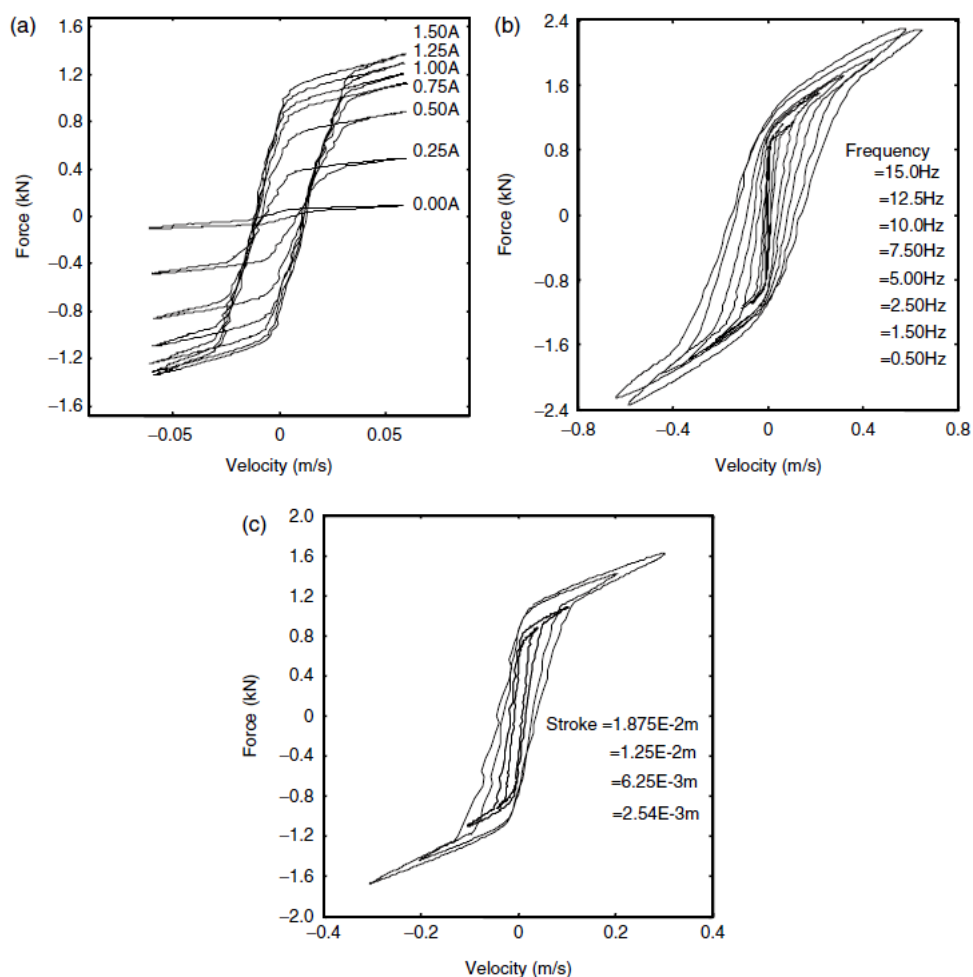
برای به دست آوردن پارامترهای مدل نیاز به داده های آزمایشگاهی داریم که در شرایط مختلف جریان، فرکانس و دامنه تحریک به دست آمده باشند. برای تکمیل مدل ابتدا باید یک جریان، یک دامنه و یک فرکانس به عنوان شرایط تحریک صفر در نظر گرفته شوند. شرایط تحریک صفر را میتوان به صورت میانگین عددی هر کدام از شرایط تحریک در نظر گرفت، مثلا اگر جریان تحریک بین صفر تا ۱.۵A متغیر است، ۰.۷۵A به عنوان جریان تحریک صفر انتخاب میشود. همچنین میتوان مقدار تحریک صفر برای هر یک از شرایط تحریک، را برابر مقداری در نظر گرفت که بیشترین تحریک در محدوده ی آن مقدار صورت میگیرد. مثلا اگر فرکانس تحریک از ۰.۵ تا ۱۵ Hz متغیر است ولی بیشترین فرکانس تحریک اعمالی در محدوده ۰.۵ تا ۷.۵ Hz است، ۵ گزینیه مناسبی برای فرکانس تحریک صفر میباشد. پس از انتخاب شرایط تحریک صفر باید داده های آزمایشگاهی مورد نیاز برای مدل سازی فراهم شود. برای این کار یکی از سه شرط تحریک اولیه را متغیر و دوتای دیگر را برابر مقدار صفر آنها در نظر گرفته و آزمایش را روی دمپر انجام میدهیم تا داده های لازم به دست آید، سپس این کار را برای هر سه شرط تحریک انجام میدهیم. بدین ترتیب دادههای لازم برای مدل سازی، سه دسته نمودار نیرو-سرعت دمپر هستند که در هر کدام از آنها یکی از شرایط تحریک متغیر و دو مقدار دیگر برابر مقادیر صفر خود هستند.

یکی از مدل‌هایی که علاوه بر اثر جریان، اثر دامنه و فرکانس را نیز در مدل سازی خود مد نظر قرار داده مدل ارائه شده توسط وانگ<sup>۱</sup> است.

---

<sup>1</sup> Wang et al.(2003)

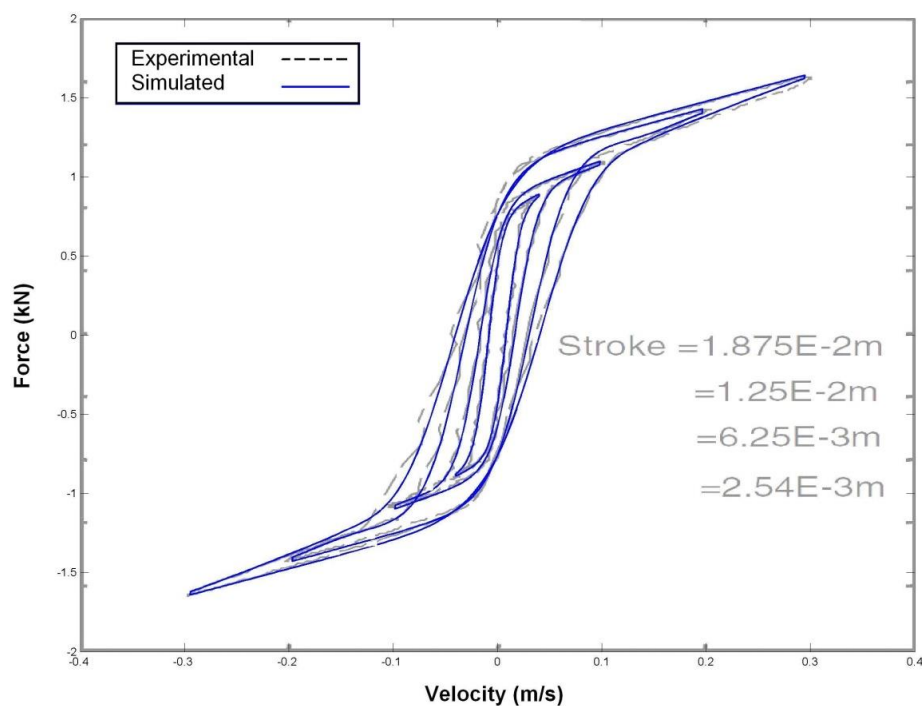
ما<sup>۱</sup> دقت مدل سازی با روش وانگ را با مدل‌هایی مانند مدل اسپنسر مورد مقایسه قرار داده است. در این مقاله کار مدل سازی، بر روی داده های آزمایشگاهی ارائه شده توسط ما (Ma,2007) صورت میگیرد، تا دقت مدل ارائه شده علاوه بر داده های آزمایشگاهی هم با مدل وانگ و هم با مدل اسپنسر مورد مقایسه قرار گیرد. شکل (۳-۹) نمودارهای آزمایشگاهی نیرو-سرعت دمپر MR را برای شرایط تحریک مختلف نشان میدهد که توسط (Ma,2007) ارائه شده.



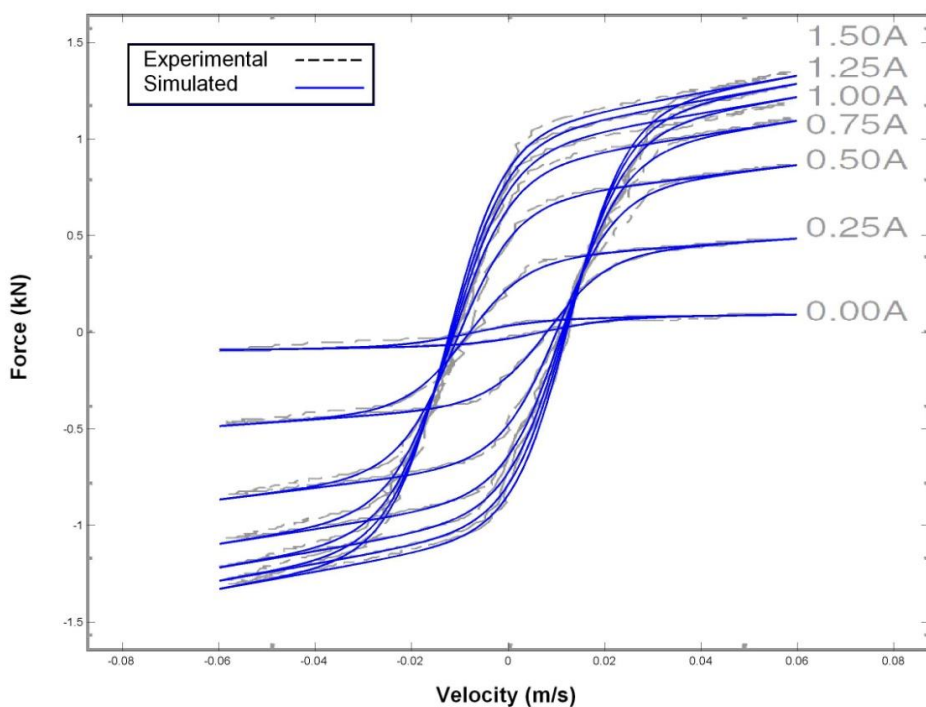
شکل (۳-۹) نمودارهای نیرو-سرعت اندازه گیری شده دمپر MR برای (a) ۶.۳۵ mm و ۱.۵ Hz (b) ۶.۳۵ mm و ۰.۷۵ A و (c) ۲.۵ Hz و ۰.۷۵ A (برگرفته شده از Ma,2007)

<sup>1</sup> Xiao Qing Ma et al.(2007)

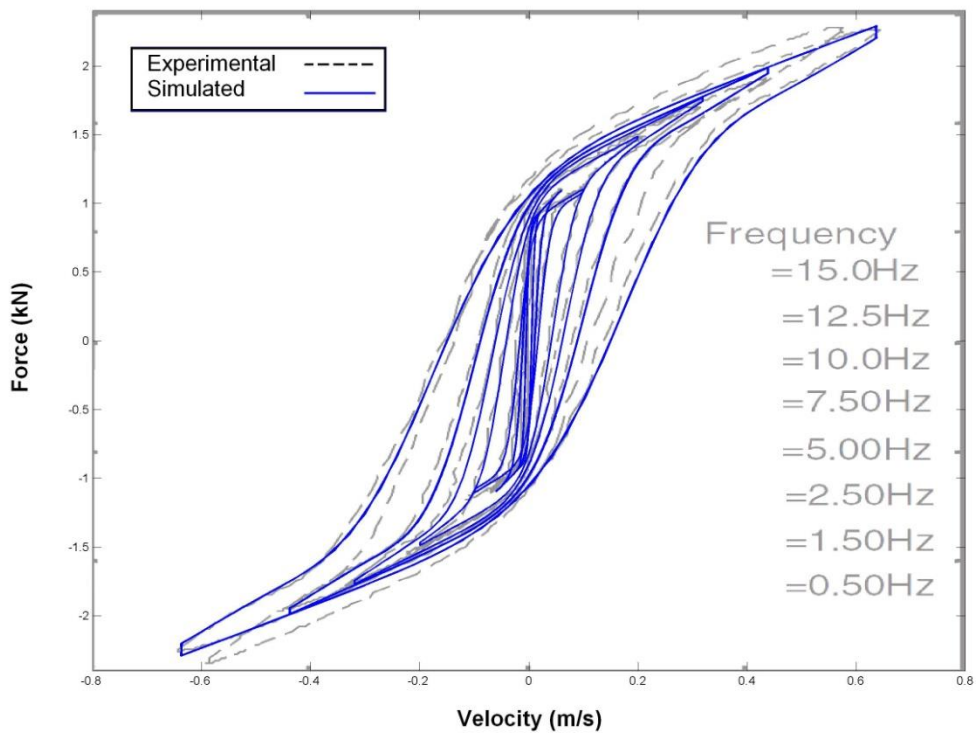
اکنون نوبت انطباق مدل پایه بر روی نمودارهای آزمایشگاهی و به دست آوردن پارامترهای مدل است. چون داده های آزمایشگاهی تابعی از جریان، فرکانس و دامنه تحریک هستند، بنابراین پس از انطباق مدل بر روی تمامی داده های آزمایشگاهی، هر کدام از پارامترهای مدل تابعی از سه متغیر جریان، فرکانس و دامنه تحریک خواهند بود، مگر اینکه پس از انطباق مشخص شود که یک و یا چند پارامتر مدل، تابعی از بعضی شرایط تحریک نیستند. در این مقاله کار انطباق مدل بر نمودارهای آزمایشگاهی با روش سعی و خطا انجام شده است. نتایج انطباق مدل بر داده های آزمایشگاهی در شکل های (۳-۱۰) تا (۳-۱۲) رسم شده است. مقادیر به دست آمده برای هر کدام از پارامترهای مدل در پیوست (۳) آورده شده است.



شکل (۳-۱۰) انطباق مدل بر روی داده های آزمایشگاهی در حالت دامنه متغیر



شکل (۱۱-۳) انطباق مدل بر روی داده های آزمایشگاهی در حالت جریان متغیر



شکل (۱۲-۳) انطباق مدل بر روی داده های آزمایشگاهی در حالت فرکانس متغیر



## ۳-۲-۲ به دست آوردن تابع تغییر پارامترها

در این قسمت برای هر کدام از پارامترهای مدل و به ازای هر کدام از شرایط تحریک تابعی را بر روی نقاطی که پس از انطباق مدل پایه بر نمودارهای آزمایشگاهی، برای آن پارامتر به دست آمده عبور می‌دهیم. بنابراین برای هر پارامتر مدل که میتواند تابعی از هر سه شرط تحریک باشد، برای حالت‌های جریان متغیر، دامه متغیر و فرکانس متغیر توابعی را از داده های به دست آمده عبور می‌دهیم. شکل‌های (۳-۱۳) تا (۳-۱۵) توابع عبور داده شده از مقادیر به دست آمده برای پارامترهای مدل، پس از انطباق مدل پایه بر داده‌های آزمایشگاهی در شرایط تحریک متغیر را نشان می‌دهد. توابع به دست آمده برای هر کدام از پارامترهای مدل که وابسته به شرایط تحریک می‌باشند به صورت روابط زیر ارائه می‌گردد.

$$C_{b_1}(a) = (-0.8325 \tanh(0.2168 a - 1.063) + 2.567) \quad (۳-۱۶)$$

$$C_{b_2}(i) = 2.971 \tanh(1.947 i - 0.4307) + 1.575 \quad (۳-۱۷)$$

$$C_{b_3}(\omega) = -0.5869 \operatorname{atan}(8.602 \omega - 17.79) + 3.082 - 0.02 (\tanh(1.140 \omega - 7.752) + 1) \omega \quad (۳-۱۸)$$

$$\dot{x}_{h_1}(a) = 0.03754 \tanh(0.06511 a - 0.4686) + 0.01978 \quad (۳-۱۹)$$

$$\dot{x}_{h_2}(i) = 0.001876 \operatorname{atan}(4.674 i - 1.843) + 0.009446 + 0.0004807 i - 0.00022 \exp(-40(i - 1.11)^2) \quad (۳-۲۰)$$

$$\dot{x}_{h_3}(\omega) = 0.0004194 \omega^2 + 0.004125 \omega + 0.004690 + 0.014 e^{(-.3630(\omega - 6.07)^2)} \tanh(2.010\omega) \quad (۳-۲۱)$$

$$f_{y_1}(a) = 0.1623 \operatorname{atan}(.2705a - 2.052) + .9234 \quad (۳-۲۲)$$

$$f_{y2}(i) = 0.5475 \operatorname{atan}(2.534i - .6175) + .3743 \quad (23-3)$$

$$f_{y3}(\omega) = 0.1229 \operatorname{tanh}(.8680\omega - 3.684) + 0.9774 + 0.0007855\omega^{2.058} + 0.011 \exp(-4.4(\omega - 1.5)^2) \quad (24-3)$$

$$K_1(a) = 329.8 a^{-0.3956} - 0.001374 a^{3.254} \quad (25-3)$$

$$K_2(i) = -138.2i^3 + 3.291i^2 + 425.8i + 18.56 + (12.35 \operatorname{tanh}(4.59i - 5.967) + 12.35)i^5 \quad (26-3)$$

$$K_3(\omega) = -222.1 \operatorname{atan}(1.654\omega - 1.732) + 428.7 - 3.507\omega \quad (27-3)$$

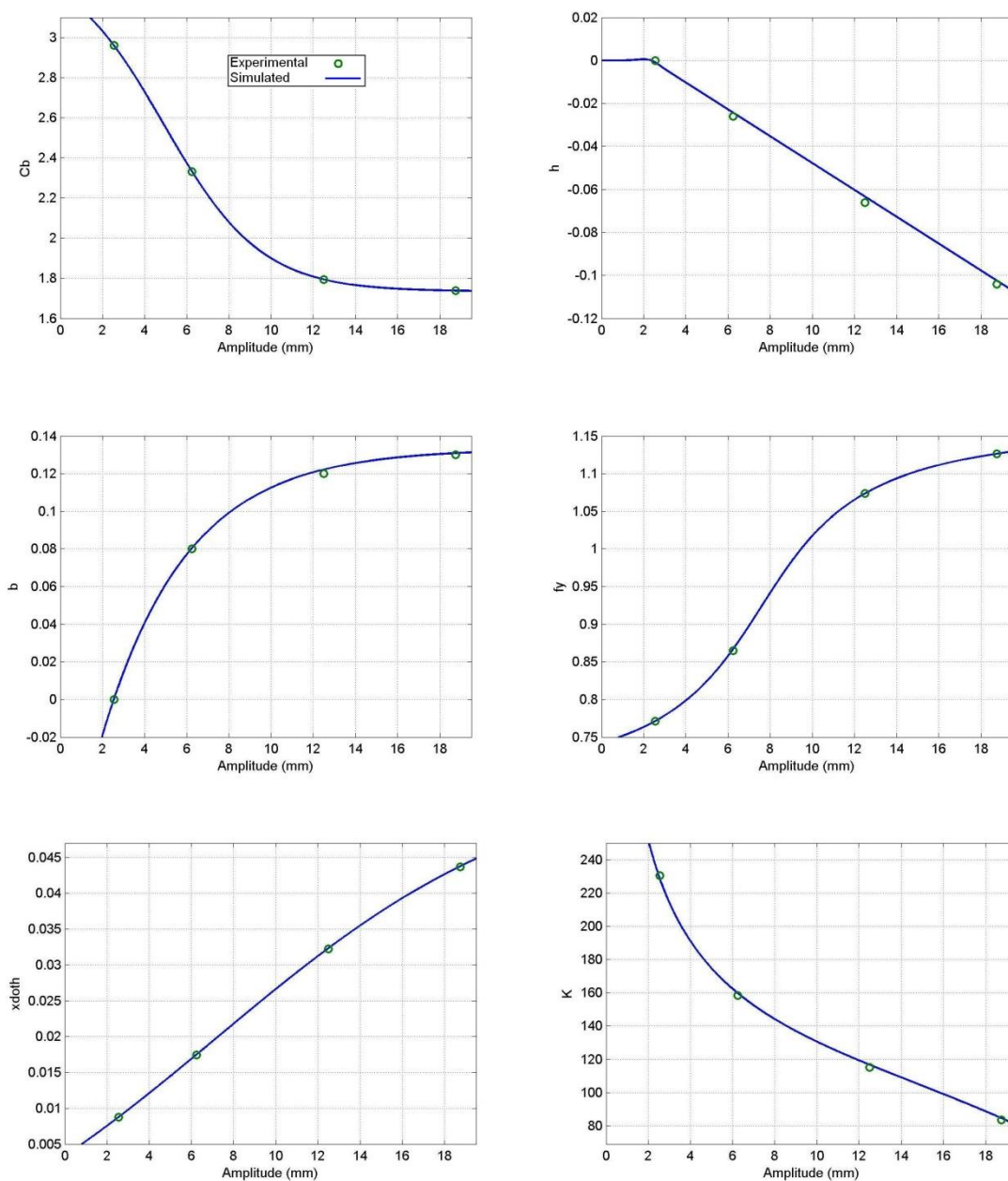
$$b_1(a) = -0.2484e^{(-0.2499a)} + 0.1317 \quad (28-3)$$

$$b_2(\omega) = 0.004788\omega^{1.534} + 0.06231 \quad (29-3)$$

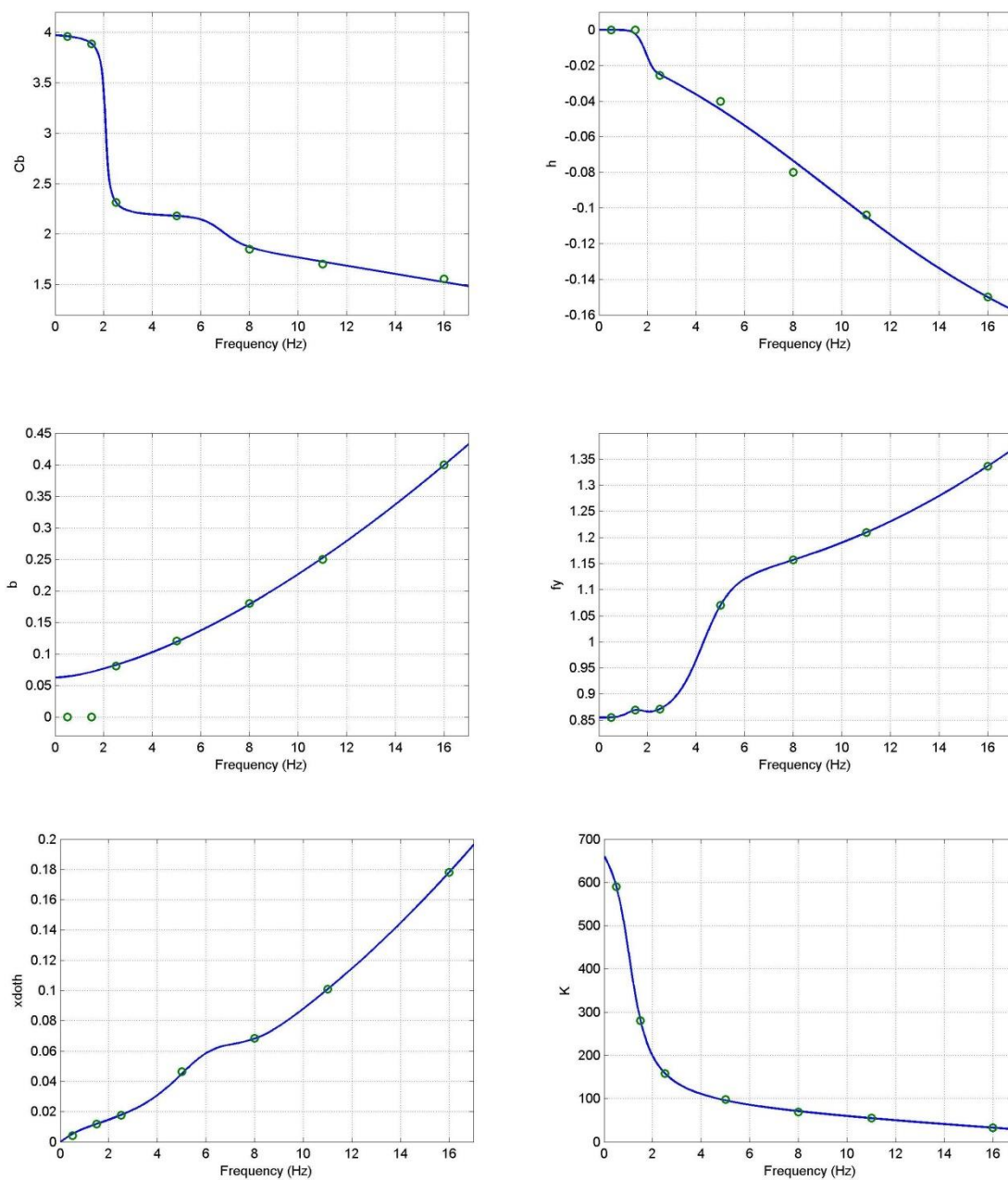
$$h_1(a) = (-0.006396a + 0.01502)(1 - \exp(-0.003a^{6.602})) \quad (30-3)$$

$$h_2(i) = \operatorname{tanh}(5.5i^2) \quad (31-3)$$

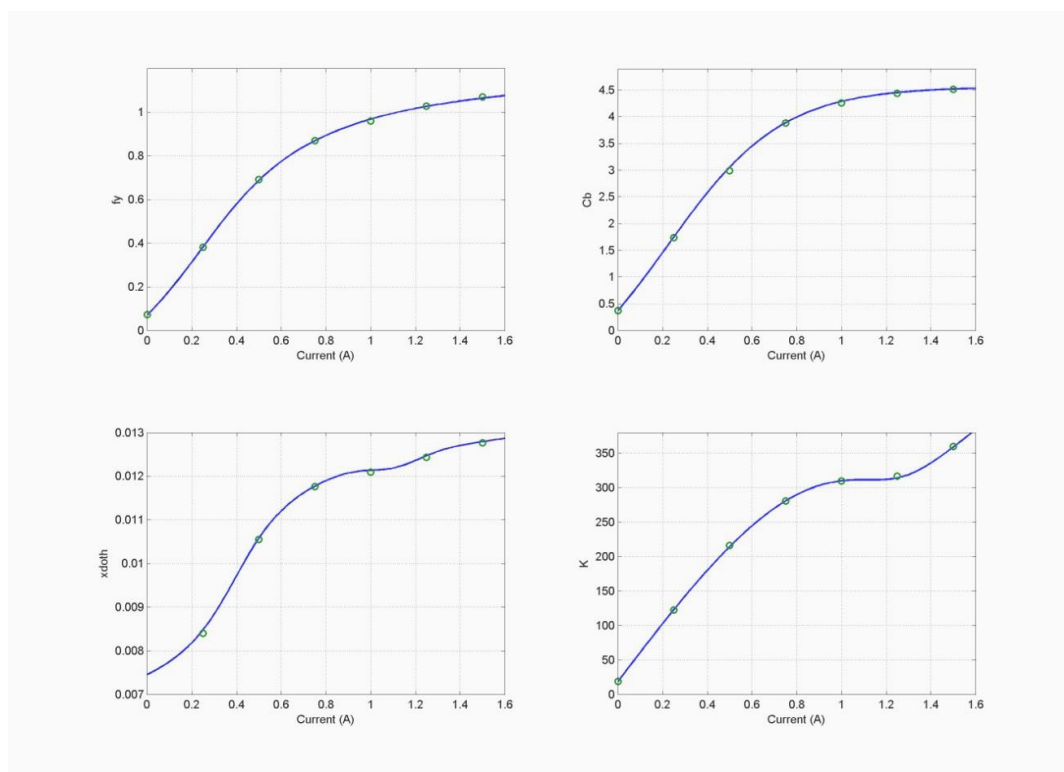
$$h_3(\omega) = (-0.1049 \operatorname{atan}(0.1011\omega - 0.9614) - 0.0898) (1 - e^{-0.007\omega^{7.47}}) \quad (32-3)$$



شکل (۳-۱۳) مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و توابع عبور داده شده برای دامنه تحریک متغیر در  $0.75 A$  و  $2.5 Hz$



شکل (۳-۱۴) مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و توابع عبور داده شده برای فرکانس تحریک متغیر در  $0.75 A$  و  $6.35 mm$



شکل (۳-۱۵) مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و توابع عبور داده شده برای جریان تحریک متغیر در  $6.35 \text{ mm}$  و  $1.5 \text{ Hz}$

دقت توابع فیت شده روی مقادیر به دست آمده برای پارامترها، نقش اصلی در تعیین دقت مدل را داراست. نکته قابل توجه اینکه تابع فیت شده، حتما باید با دقت خوبی نقاط مربوط به شرایط تحریک صفر را تقریب زده باشد، حتی اگر سایر نقاط را بخواهیم با دقت کمتری تقریب بزنیم، چراکه این نقاط اثر کلیدی بر روی دقت نهایی مدل دارند.

### ۳-۲-۳ به دست آوردن توابع چند متغره برای پارامترها

تا اینجا رابطه ی بین هر کدام از پارامترهای مدل و شرایط تحریکی که روی آن پارامتر موثر است به صورت مجزا به دست آمده است (روابط (۳-۱۶) تا (۳-۳۲)). در اینجا میخواهیم این رابطه های جداگانه را به صورت یک تابع چند متغیره از شرایط تحریک برای هر کدام از پارامترهای مدل به دست آوریم.

به عنوان مثال برای پارامتر نمونه  $f_y$  سه تابع به صورت زیر داریم،

$$f_y(a, i_0, \omega_{02}) = f_{y1}(a) \quad (33-3)$$

$$f_y(a_0, i, \omega_{01}) = f_{y2}(i) \quad (34-3)$$

$$f_y(a_0, i_0, \omega) = f_{y3}(\omega) \quad (35-3)$$

که در آن  $a$  متغیر دامنه،  $i$  متغیر جریان،  $\omega$  متغیر فرکانس و  $i_0, a_0, \omega_{01}, \omega_{02}$  مقادیر صفر مشخصه های تحریک هستند. نکته ای که در اینجا باید به آن اشاره کرد این است که، میتوانیم برای فقط یکی از شرایط تحریک صفر دو مقدار را به عنوان مقادیر صفر در نظر بگیریم، مثلا در اینجا برای فرکانس دو مقدار صفر  $(\omega_{01}, \omega_{02})$  در نظر گرفته شده است، با این کار دقت در شناسایی رفتار دمپر به ازای تغییر این شرط تحریک افزایش خواهد یافت، این کار را میتوان برای شرط تحریکی که بازه تغییرات بزرگی را شامل میشود و یا با تغییر آن پیچیدگی خاصی در تغییر رفتار دمپر دیده میشود انجام داد.

برای ایجاد یک تابع چند متغیره از شرایط تحریک برای پارامترهای مدل با توجه روابط (33-3) و (34-3) و (35-3) داریم :

$$f_{y2}(i_0) = f_{y3}(\omega_{01}) \quad (36-3)$$

$$f_{y1}(a_0) = f_{y3}(\omega_{02}) \quad (37-3)$$

و از این رو میتوان میتوان  $f_y$  را به صورت تابع زیر نوشت :

$$f_y(a, i, \omega) = \frac{f_{y1}(a) \cdot f_{y2}(i) \cdot f_{y3}(\omega)}{f_{y1}(a_0) \cdot f_{y2}(i_0)} \quad (38-3)$$

به سادگی میتوان نشان داد که رابطه فوق هر سه رابطه (33-3)، (34-3) و (35-3) را برآورده می سازد. بدین ترتیب پارامتر مدل  $f_y$  به صورت تابع چند متغیره از شرایط تحریک به دست می آید، این کار به طور مشابه برای تمامی پارامترهای مدل انجام میشود و بدین صورت همه پارامترهای مدل به صورت توابع چند متغیره از شرایط تحریک به دست خواهند آمد.

با توجه به شکل (۳-۹) که مدل سازی از روی داده های آن صورت میگیرد مشخصه های تحریک صفر به صورت زیر انتخاب میشوند :

$$i_0 = 0.75A, a_0 = 6.35mm, \omega_{01} = 1.5Hz, \omega_{02} = 2.5Hz \quad (3-39)$$

اکنون با توجه به رابطه نمونه (۳-۳۸) هر یک از پارامترهای مدل را میتوان به صورت یک تابع چند متغیره از شرایط تحریک نوشت و سپس با جایگذاری روابط به دست آمده در مدل پایه، روابط (۳-۴) تا (۳-۱۵)، کار مدل سازی به پایان میرسد. با توجه به رابطه (۳-۳۸) میتوان با ثابت در نظر گرفتن یکی از شرایط تحریک هر یک از پارامترهای مدل را بر حسب دو شرط تحریک دیگر به صورت که در شکل‌های (۳-۱۶) تا (۳-۲۱) دیده میشود رسم کرد.

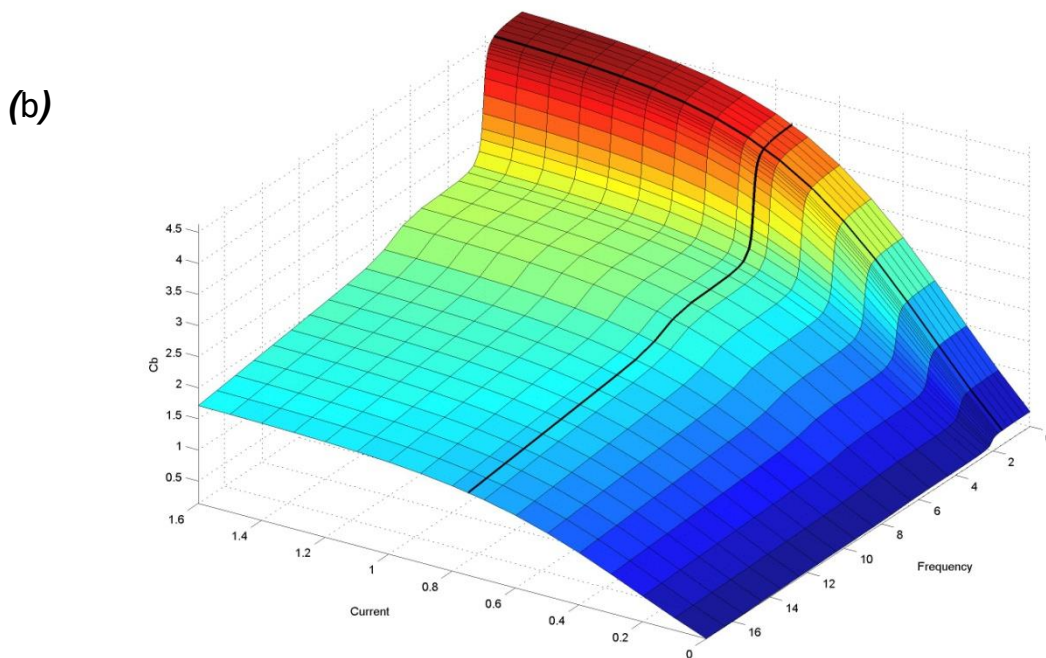
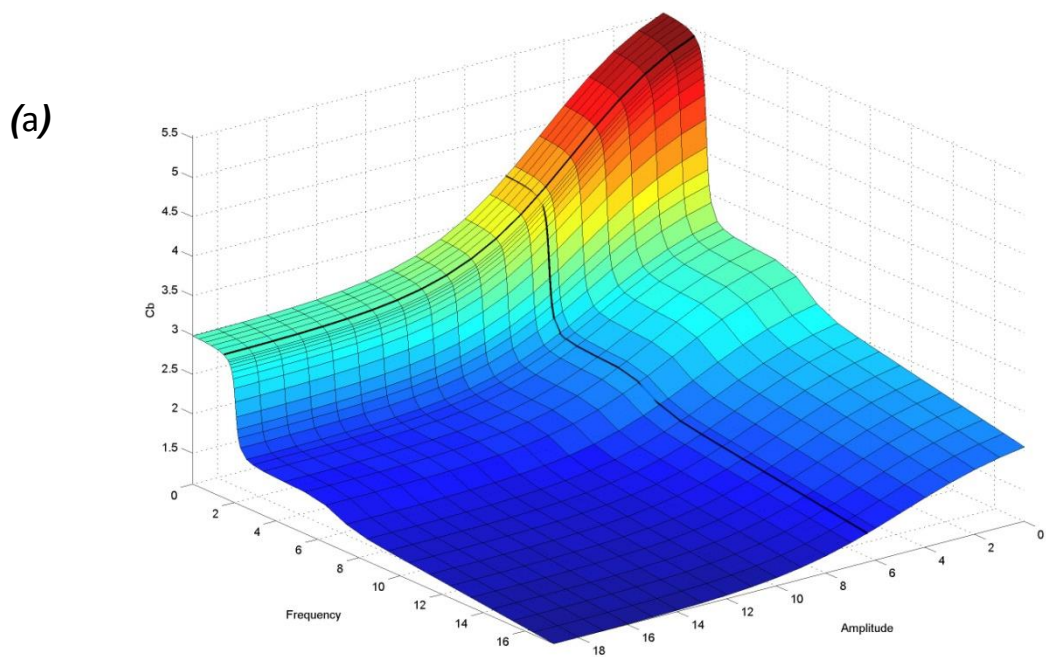
### ۳-۲-۴ ارزیابی مدل

در اینجا مقایسه ای بین خروجی مدل ارائه شده و داده‌های آزمایشگاهی و همچنین مقایسه ای بین مدل ارائه شده و دو مدل وانگ<sup>۱</sup> و مدل بوک-ون اصلاح شده صورت میگیرد.

شکل (۳-۲۲) مقایسه بین نتایج شبیه سازی مدل با داده های آزمایشگاهی را برای جریان، فرکانس و دامنه ی متغیر نشان میدهد، همانطور که در شکل دیده میشود تطبیق خوبی بین مدل و داده های آزمایشگاهی وجود دارد. داده های آزمایشگاهی این شکل همان داده هایی هستند که مدل سازی بر مبنای آنها صورت گرفته است. برای اطمینان از این که مدل ارائه شده قادر به شبیه سازی رفتار دمپر در شرایط تحریک مختلف میباشد، شکل (۳-۲۳) مقایسه بین داده های آزمایشگاهی و شبیه سازی مدل برای شرایط تحریک متفاوت را نشان میدهد، در این جا نیز مدل شبیه سازی خوبی را انجام داده است.

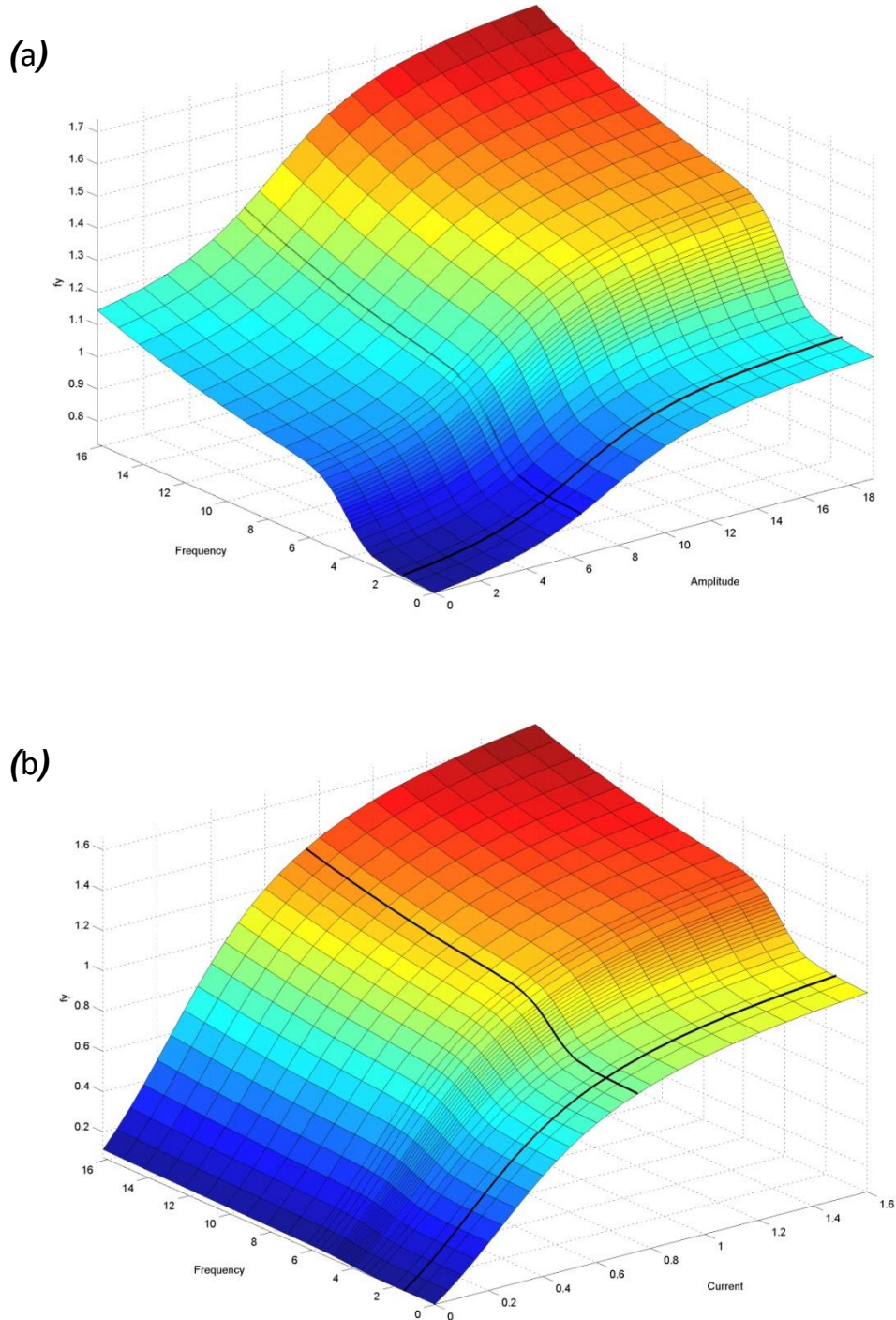
---

<sup>1</sup> Wang et al.(2003)



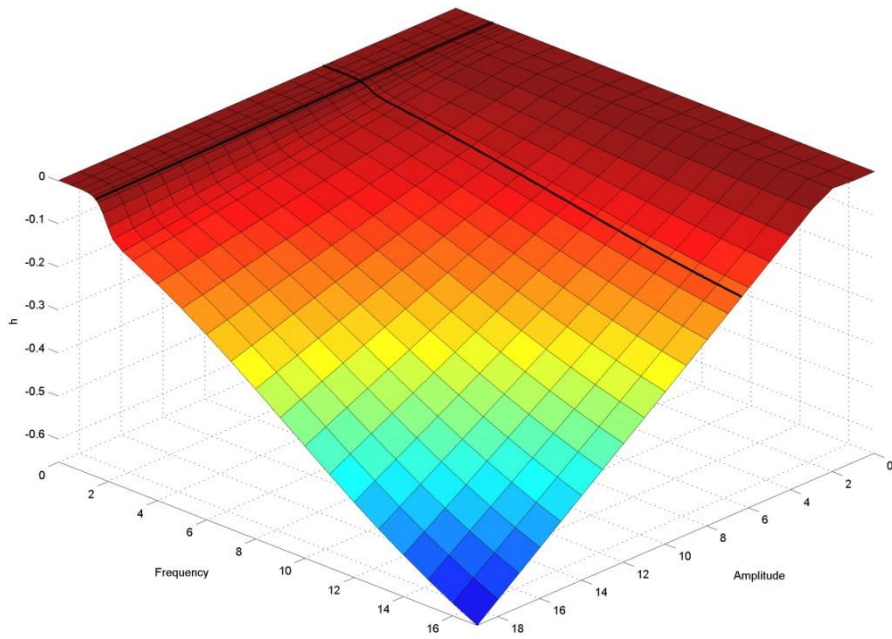
شکل (۳-۱۶) نمودار تغییرات پارامتر  $C_b$  بر حسب، (a) دامنه و فرکانس (b) جریان و فرکانس



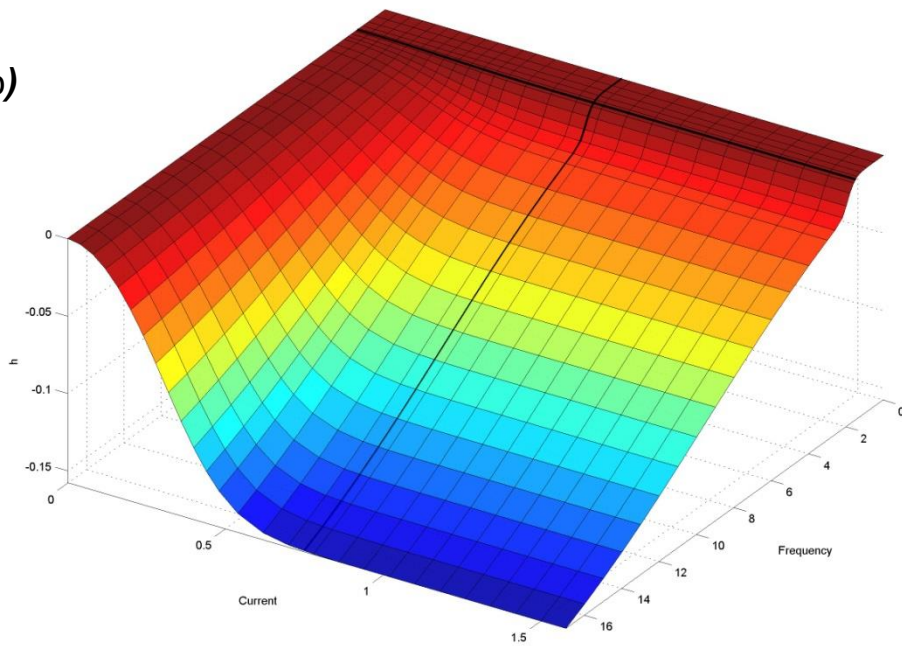


شکل (۳-۱۷) نمودار تغییرات پارامتر  $f_y$  بر حسب، (a) دامنه و فرکانس (b) جریان و فرکانس

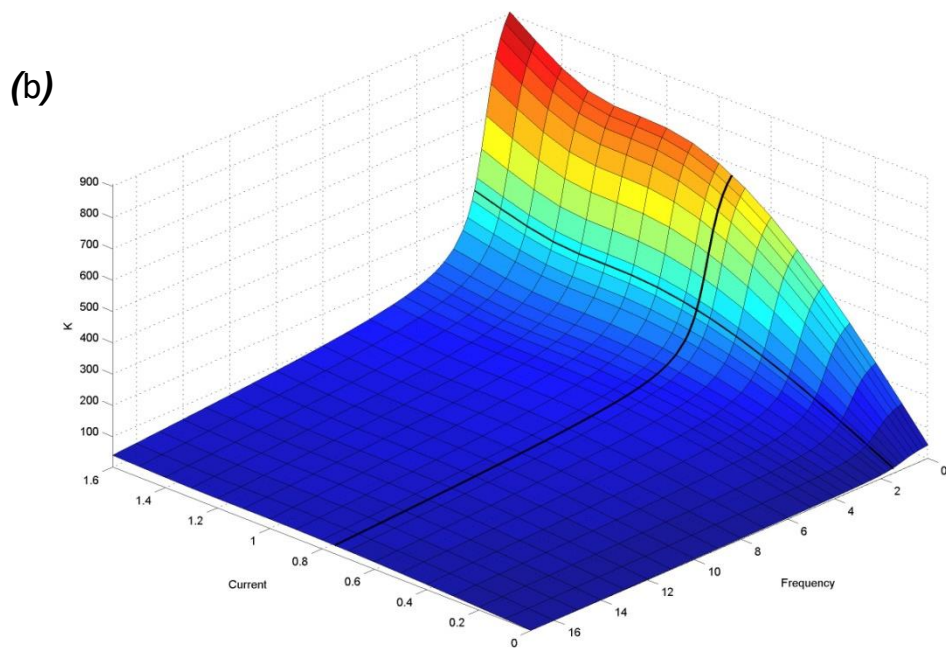
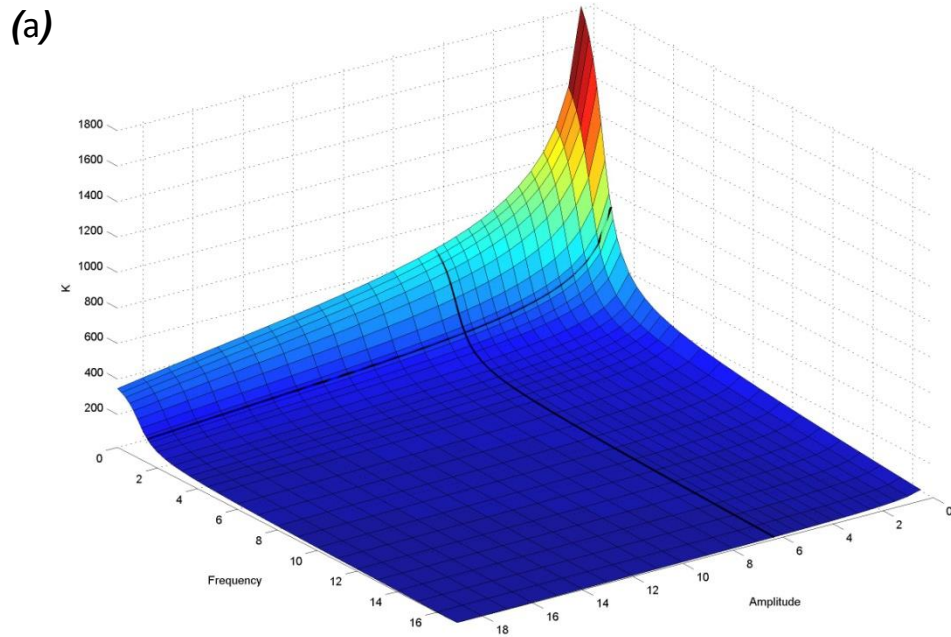
(a)



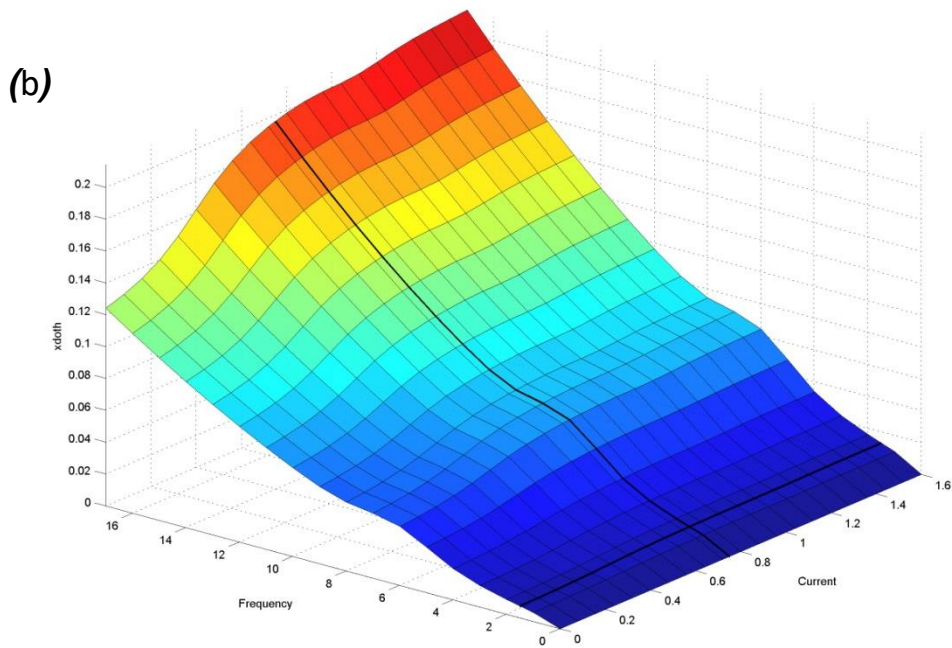
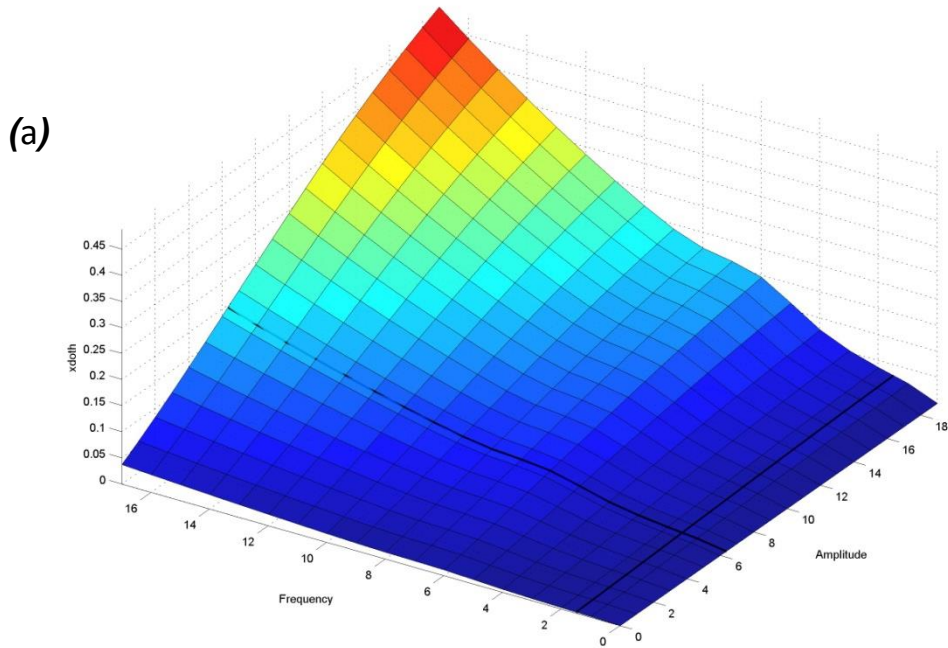
(b)



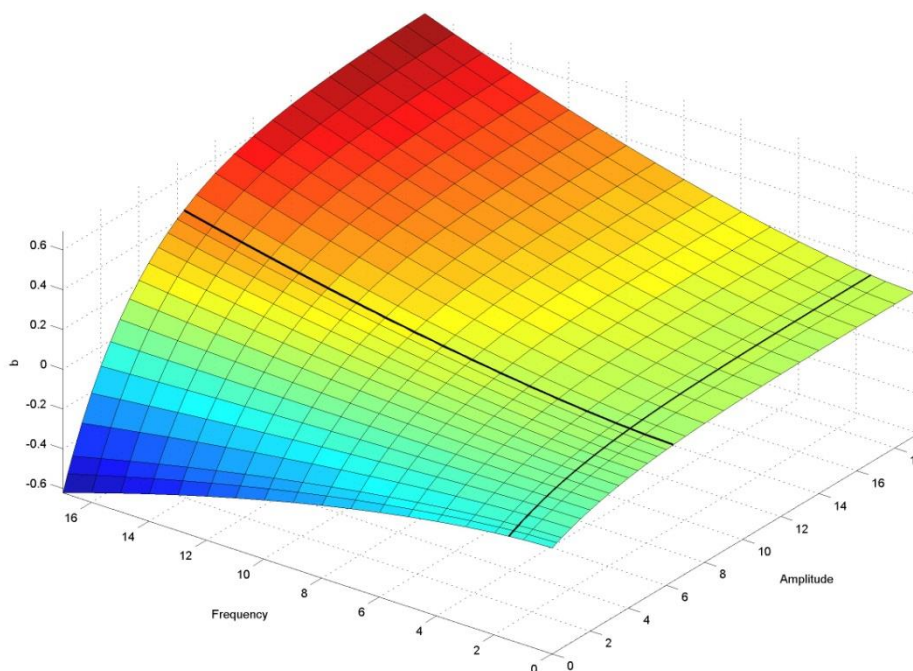
شکل (۳-۱۸) نمودار تغییرات پارامتر  $h$  بر حسب، (a) دامنه و فرکانس (b) جریان و فرکانس



شکل (۳-۱۹) نمودار تغییرات پارامتر  $k$  بر حسب، (a) دامنه و فرکانس (b) جریان و فرکانس

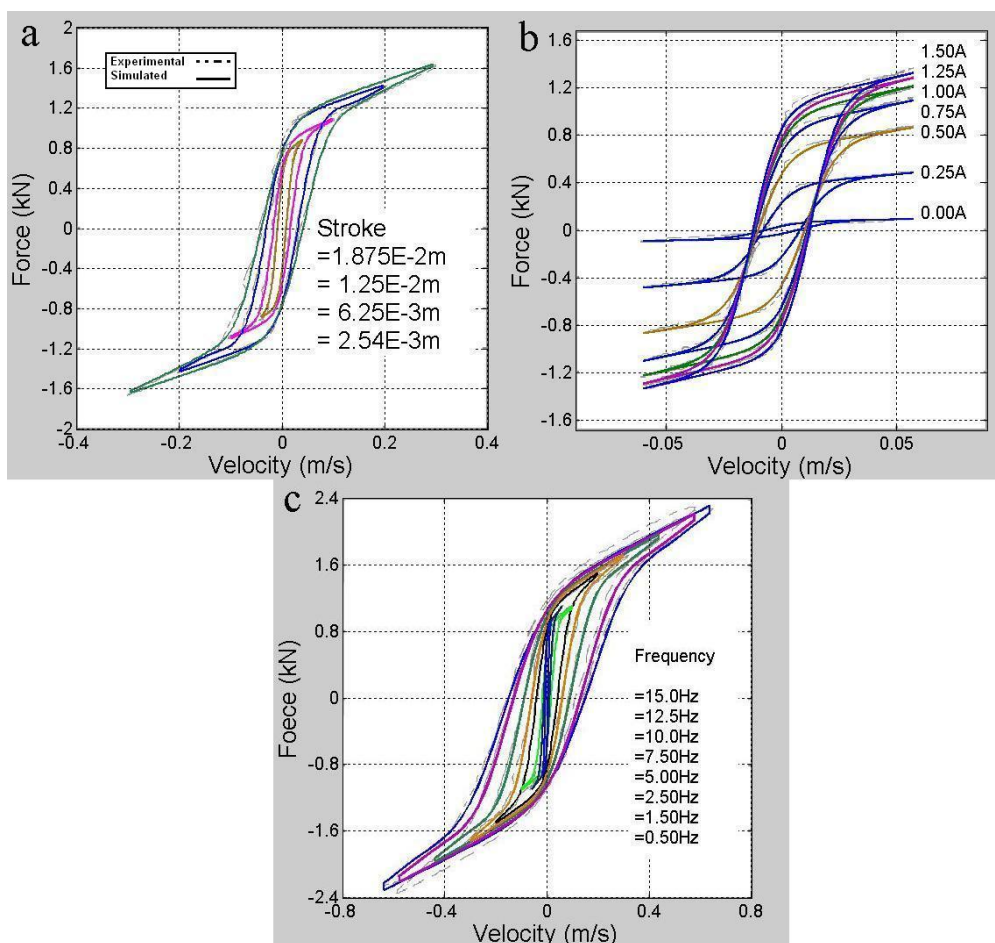


شکل (۳-۲۰) نمودار تغییرات پارامتر  $xdoth$  بر حسب، (a) دامنه و فرکانس (b) جریان و فرکانس



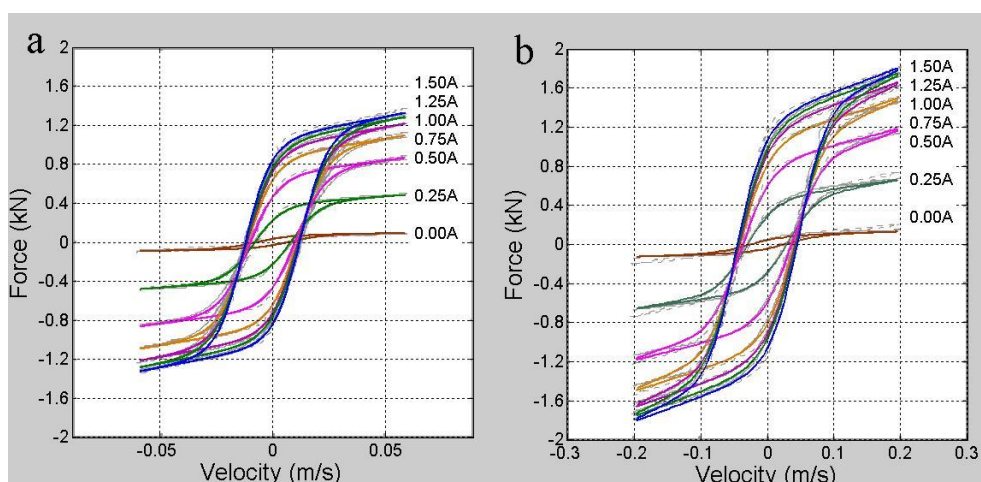
شکل (۳-۲۱) نمودار تغییرات پارامتر  $b$  بر حسب دامنه و فرکانس

برای مقایسه دقت مدل ارائه شده با دو مدل وانگ (Wang,2003) و بوک-ون اصلاح شده، رفتار شبیه سازی شده توسط این دو مدل و داده های آزمایشگاهی برای دامنه متغیر و فرکانس و جریان ثابت در شکل (۳-۲۴) مورد مقایسه قرار گرفته اند (داده های مورد نیاز برای مدل بوک-ون از مدل وانگ (Wang,2003) برداشت شده است). همانگونه که در شکل دیده میشود این دو مدل برای شرایط تحریک متفاوت با آنچه مدلسازی بر مبنای آنها صورت گرفته، دقت خوبی را از خود نشان نمیدهند.

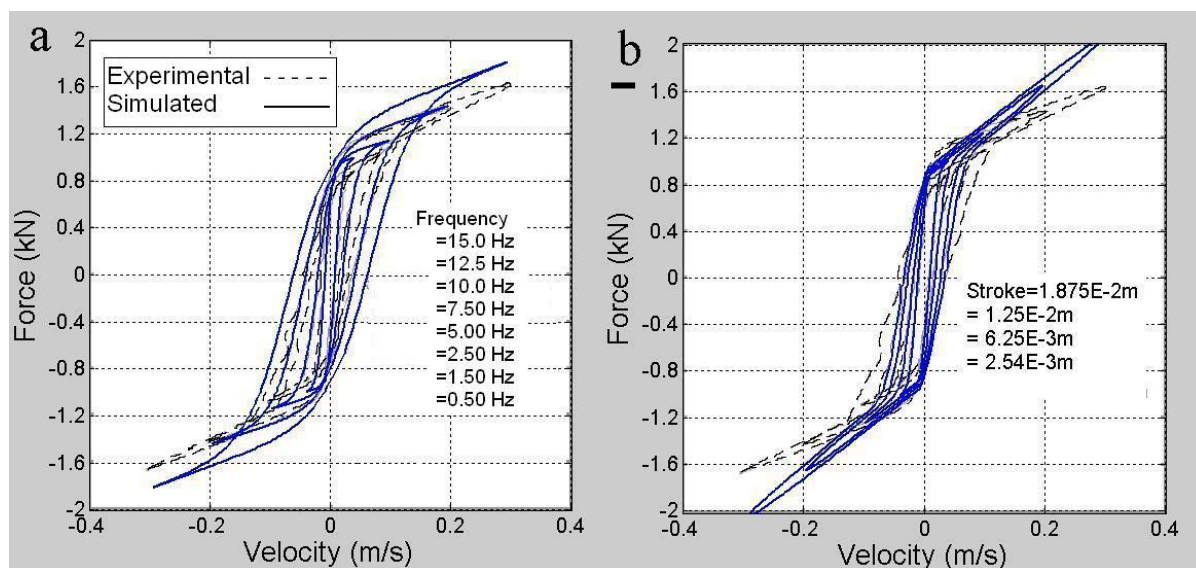


شکل (۲۲-۳) مقایسه بین نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی برای (a) ۲.۵ Hz و ۰.۷۵A.

(b) ۱.۵ Hz و ۶.۳۵ mm (c) ۰.۷۵ A و ۶.۳۵ mm (مقادیر آزمایشگاهی برگرفته شده از X.Q.Ma,2007)



شکل (۲۳-۳) مقایسه بین نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی برای (a) ۱.۵ Hz و (b) ۵ Hz (.... داده آزمایشگاهی و \_\_\_ شبیه سازی مدل) (مقادیر آزمایشگاهی برگرفته شده از X.Q.Ma,2007)



شکل (۳-۲) مقایسه بین نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی در ۲.۵ Hz و ۰.۷۵ A برای مدل Wang,2003 (a) مدل بوک-ون اصلاح شده (مقادیر آزمایشگاهی برگرفته شده از X.Q.Ma,200) (b)

### ۳-۳- بهینه سازی مدل ارائه شده قبلی (بخش ۳-۲) با استفاده از تابع پایه خطی

مدل قبلی که برای شبیه سازی رفتار دمپر ارائه شد از تابع پایه سیگموئیدی بهره میبرد. این نوع مدل پایه باعث شد که توابع عبور داده شده از مقادیر آزمایشگاهی پارامترهای مدل به شکلهای پیچیده ای در آیند (روابط (۳-۱۶) تا (۳-۳۲)). در اینجا با انتخاب مدل پایه به صورت تابع خطی اولاً از پیچیدگی خود تابع مدل پایه کاسته میشود و ثانياً توابع عبور داده شده از مقادیر آزمایشگاهی به صورت توابع چند جمله ای قابل ارائه خواهند بود.

#### ۳-۳-۱- ایجاد مدل پایه خطی

در اینجا مدل پایه به صورت خطی در نظر گرفته شده است. از آنجا که مدل سازی برای شتابهای منفی در نمودار نیرو-سرعت صورت میگیرد، همانطور که در شکل (۳-۲۵) نیز مشخص است چهار نقطه کلیدی A, B, C, D روی نمودار نیرو-سرعت در نظر گرفته میشود. نقطه A مربوط به نیروی بیشینه در سرعت مثبت، نقطه D

مربوط به نیروی بیشینه برای سرعت منفی، نقطه B نیروی تسلیم در سرعت مثبت و نقطه C مربوط به نیروی تسلیم در سرعت های منفی است. همچنین نقاط  $B^*, C^*$  تصویر نقاط B, C نسبت به مرکز مختصات می باشند. بنابراین تابع پایه برای مدل سازی به صورت شش تابع خطی مجزا است که از نقاط مشخص شده در شکل (۳-۳) عبور میکنند. بنا براین تابع پایه مدل سازی به صورت زیر بیان میشود:

برای شتابهای منفی:

$$\begin{cases} F_d = y_A + h_a(\dot{x} - x_A); & \dot{x} > x_B \\ F_d = y_B + h_b(\dot{x} - x_B); & x_C < \dot{x} < x_B \\ F_d = y_C + h_c(\dot{x} - x_C); & \dot{x} < x_C \end{cases} \quad (۴۰-۳)$$

برای شتابهای مثبت:

$$\begin{cases} F_d = y_A + h_{a^*}(\dot{x} - x_A); & \dot{x} > -x_C \\ F_d = -y_C + h_b(\dot{x} + x_B); & -x_B < \dot{x} < -x_C \\ F_d = y_D + h_{c^*}(\dot{x} - x_D); & \dot{x} < -x_B \end{cases} \quad (۴۱-۳)$$

که در آن  $F_d$  نیروی دمپر بوده و همچنین:

$$\begin{cases} h_a = (y_A - y_B)/(x_A - x_B) & (۴۲-۳) \\ h_b = (y_B - y_C)/(x_B - x_C) & (۴۳-۳) \\ h_c = (y_C - y_D)/(x_C - x_D) & (۴۴-۳) \\ h_{a^*} = (y_A + y_C)/(x_A + x_C) & (۴۵-۳) \\ h_{c^*} = (y_D + y_B)/(x_D + x_B) & (۴۶-۳) \end{cases}$$

در روبرو فوق مختصات طولی نقاط A, D  $(x_A, x_D)$  به صورت زیر محاسبه میشود:

$$x_A = -x_D = \dot{x}_m \quad (۴۷-۳)$$



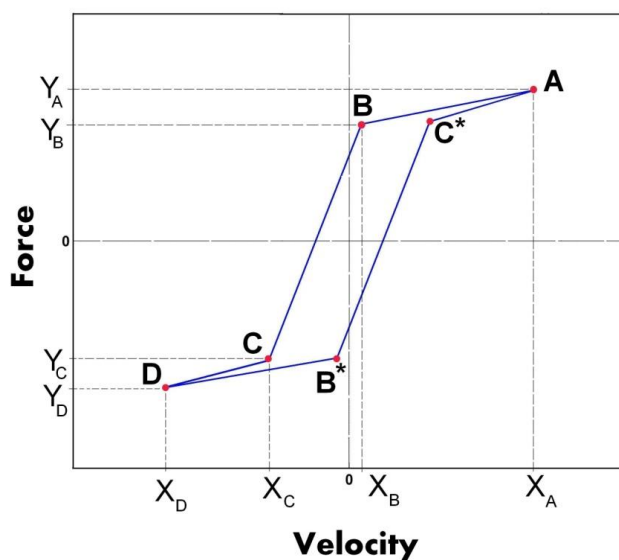
که در آن،  $x, \dot{x}, \ddot{x}$ ، به ترتیب موقعیت، سرعت وشتاب دمپر بوده و  $\dot{x}_m$  سرعت بیشینه دمپر است که از رابطه زیر به دست می آید:

$$\dot{x}_m = 2\pi.a.f = \sqrt{\dot{x}^2 - x.\ddot{x}} \quad (3-48)$$

که  $a$  دامنه تحریک و  $f$  فرکانس تحریک می باشد.

بنابراین با داشتن موقعیت های طولی نقاط  $B, C$  (یعنی پارامترهای  $X_B, X_C$ ) و موقعیت عرضی نقاط  $A, B, C, D$  (یعنی پارامترهای  $Y_A, Y_B, Y_C, Y_D$ ) میتوان مدل را به طور کامل شبیه سازی کرد. بنابراین مدل ارائه شده دارای شش پارامتر مجهول است که بسته به جریان، دامنه و فرکانس تحریک مقادیر آنها تغییر میکند.

برای انطباق مدل پایه روی نمودارهای آزمایشگاهی نیاز به یافتن شش پارامتر مشخصه مدل یعنی  $Y_A, Y_B, Y_C, Y_D, X_B, X_C$  میباشد.



شکل (۳-۲۵) تابع مدل پایه

با توجه به سادگی تابع پایه مقادیر حدودی هر کدام از این پارامترهای مدل با توجه به نمودارهای آزمایشگاهی برای شرایط تحریک متفاوت به راحتی قابل تخمین زدن است و بنابراین انطباق این مدل برای شرایط تحریک

متفاوت بر روی نمودارهای آزمایشگاهی چه به صورت سعی و خطا و چه با استفاده از روشهای بهینه سازی کاری نه چندان دشوار خواهد بود که این قابلیت یکی از مزایای این مدل نسبت به مدل‌های ارائه شده دیگر مانند مدل اسپنسر است.

### ۳-۳-۲ به دست آوردن پارامترهای مدل

برای به دست آوردن پارامترهای مدل نیاز به داده های آزمایشگاهی داریم که در شرایط مختلف جریان، فرکانس و دامنه تحریک به دست آمده باشند. این داده ها دقیقاً همانند مدل قبلی ارائه شده از نمودارهای آزمایشگاهی مدل وانگ<sup>۱</sup> برداشت میشود (شکل (۳-۹)).

برای تکمیل مدل نیز مثل قبل یک جریان، یک دامنه و یک فرکانس به عنوان شرایط تحریک صفر در نظر گرفته میشود در ادامه نوبت انطباق مدل پایه بر روی نمودارهای آزمایشگاهی و به دست آوردن پارامترهای مدل است. چون داده های آزمایشگاهی تابعی از جریان، فرکانس و دامنه تحریک هستند، بنابراین پس از انطباق مدل بر روی تمامی داده های آزمایشگاهی، هر کدام از پارامترهای مدل تابعی از سه متغیر جریان، فرکانس و دامنه تحریک خواهند بود، مگر اینکه پس از انطباق مشخص شود که یک و یا چند پارامتر مدل، تابعی از بعضی شرایط تحریک نیستند. در این اینجا کار انطباق مدل بر نمودارهای آزمایشگاهی با روش سعی و خطا صورت گرفته است.

### ۳-۳-۳ به دست آوردن تابع تغییر پارامترها

در این قسمت نیز مانند قبل عمل میکنیم یعنی برای هر کدام از پارامترهای مدل و به ازای هر کدام از شرایط تحریک تابعی را بر روی نقاطی که پس از انطباق مدل پایه بر نمودارهای آزمایشگاهی، برای آن پارامتر به دست

---

<sup>1</sup> Wang et al.(2007)

آمده عبور میدهیم. مثلا برای پارامتر نمونه  $y_A$  که تابعی از هر سه شرط تحریک است، برای حالت‌های جریان متغیر، دامنه متغیر و فرکانس متغیر سه تابع از نقاط آزمایشگاهی به دست آمده عبور میدهیم.

توابع عبور داده شده توابع چند جمله ای و حداکثر از مرتبه ی ۴ هستند، توابع عبور داده شده از نقاط مربوط به حالت فرکانس متغیر به خاطر پیچیده بودن شکل توابع عبوری کمی متفاوت هستند.

شکل (۳-۲۶) توابع فیت شده روی مقادیر آزمایشگاهی پارامترهای مدل در شرایط جریان متغیر را نشان میدهد. شکل کلی این توابع نیز به صورت زیر است :

$$Z(i) = C_1 i^4 + C_2 i^3 + C_3 i^2 + C_4 i + C_5 \quad (۴۹-۳)$$

که در آن  $Z$  پارامتر مدل،  $i$  جریان تحریک و  $C$  ها ضرایب ثابتی هستند که برای هر یک از پارامترهای مدل در جدول (۳-۱) آورده شده اند.

شکل (۳-۲۷) توابع فیت شده روی مقادیر آزمایشگاهی پارامترهای مدل در شرایط دامنه متغیر را نشان میدهد. شکل کلی این توابع به صورت زیر است :

$$Z(a) = C_1 a^3 + C_2 a^2 + C_3 a + C_4 \quad (۵۰-۳)$$

که در آن  $Z$  پارامتر مدل،  $a$  دامنه تحریک و  $C$  ها ضرایب ثابتی هستند که برای هر یک از پارامترهای مدل در جدول (۳-۲) آورده شده اند. شکل (۳-۲۸) توابع فیت شده روی مقادیر آزمایشگاهی پارامترهای مدل در شرایط فرکانس متغیر را نشان میدهد. از آنجا که تغییرات پارامترهای مدل نسبت به فرکانس تحریک از پیچیدگی بیشتری در مقایسه با دو حالت قبل برخوردار است لذا توابع فیت شده نیز کمی پیچیده تر خواهند بود. بدین ترتیب که فرم کلی توابع فیت شده از دو بخش تشکیل میشوند، بخش اول یک تابع چند جمله ای به صورت زیر است :

$$Z^*(f) = C_1 f^3 + C_2 f^2 + C_3 f + C_4 \quad (۵۱-۳)$$

که در آن  $Z^*$  پارامتر مدل،  $f$  فرکانس تحریک و  $C$  ضرایب ثابتی هستند که برای هر یک از پارامترهای مدل در جدول (۳-۳) آورده شده اند. بخش دوم یک تابع اصلاحی است که با تابع اولی جمع میشود و یا در آن ضرب میگردد. در نهایت تابع فیت شده روی هر یک از پارامترهای مدل به صورتی که در جدول (۴-۳) ارائه شده خواهد بود

جدول (۱-۳) ضرایب ثابت توابع چندجمله ای در حالت جریان متغیر

	Z					
	y_A	y_B	y_C	y_D	x_B	x_C
C1	0.6526	0	0	0	0	0
C2	-1.705	0.2533	-0.08733	-0.03493	0.001146	-0.002419
C3	0.6023	-1.08	0.7448	0.7535	-0.0002025	0.01223
C4	1.596	1.736	-1.652	-1.879	-0.005822	-0.02017
C5	0.09428	0.06339	-0.02713	-0.08569	0.007927	-0.01634

جدول (۲-۳) ضرایب ثابت توابع چندجمله ای در حالت دامنه متغیر

	Z					
	y_A	y_B	y_C	y_D	x_B	x_C
C1	0	0	89.79	0	0	0
C2	-11.62	-13.99	-17	8.541	1.051	0.2497
C3	7.128	5.527	-2.431	-6.523	-0.08838	-0.615
C4	0.7196	0.594	-0.7336	-0.7386	0.006501	-0.01005

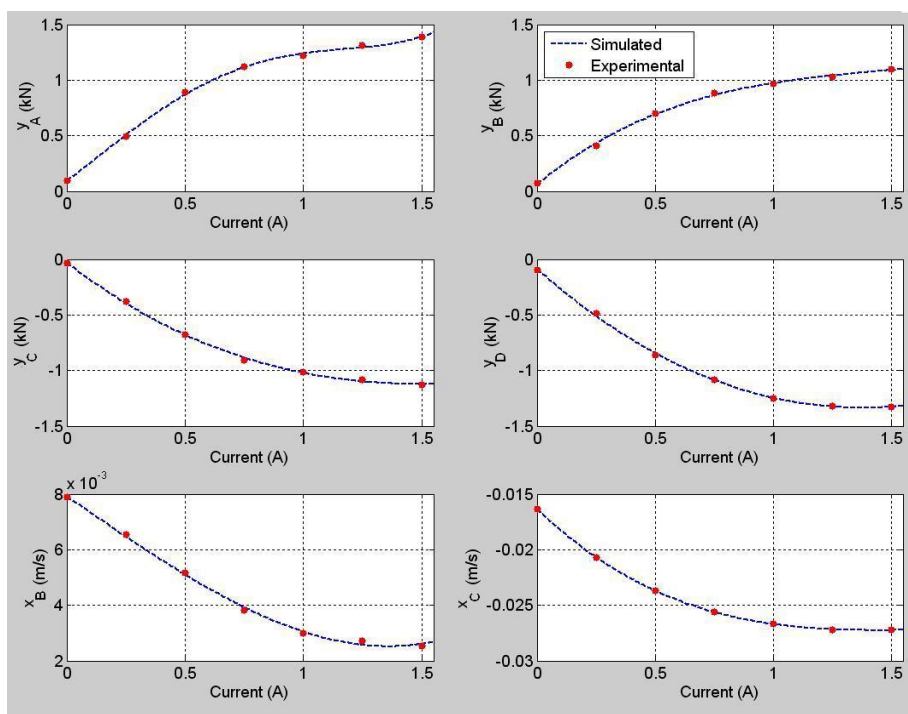
جدول (۳-۳) ضرایب ثابت توابع چندجمله ای در حالت فرکانس متغیر

	Z*					
	y*_A	y*_B	y*_C	y*_D	x*_B	x*_C
C1	0.0001101	0	0.0002395	0	0	0
C2	-0.004522	-0.001307	-0.004377	0.003625	-0.0001159	-0.000339
C3	0.1364	0.02832	-0.03523	-0.1469	0.00187	-0.01691
C4	0.9223	0.9386	-0.8218	-0.8741	-0.000898	0.000356

جدول (۳-۴) توابع فیت شده برای هر یک از پارامترهای مدل در حالت فرکانس متغیر

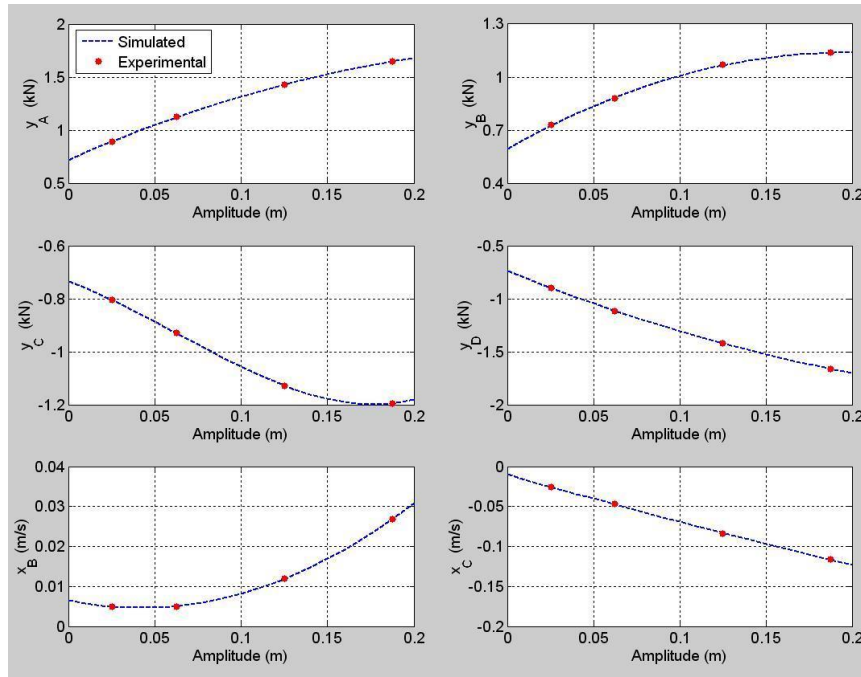
$Z(f)$	$y_A$	$= y_A^* \times [ -0.091 * \exp(-5.292 * (f-2.54) .^2) + 1 ]$
	$y_B$	$= y_B^* + [ 0.057 * (\tanh(3.072 * (f-3.38)) - 1)$
	$y_C$	$= y_C^* \times [ 0.115 * \exp(-0.532 * (f-5.43) .^2) + 1 ]$
	$y_D$	$= y_D^* \times [-0.0825 * \exp(-5.292 * (f-2.49) .^2) + 1 ]$
	$x_B$	$= x_B^* \times [ 1.419 * \exp(-0.5 * (f-1.246) .^2) + 1 ]$
	$x_C$	$= x_C^* \times [ 0.37 * \exp(-0.92 * (f-3.746) .^2) + 1 ]$

دقت توابع فیت شده روی مقادیر به دست آمده برای پارامترها، نقش اصلی را در تعیین دقت مدل بازی میکند. نکته قابل توجه اینکه تابع فیت شده، حتما باید با دقت خوبی نقاط مربوط به شرایط تحریک صفر را تقریب زده باشد، حتی اگر سایر نقاط را بخواهیم با دقت کمتری تقریب بزنیم، چراکه این نقاط اثر کلیدی بر روی دقت نهایی مدل دارند.



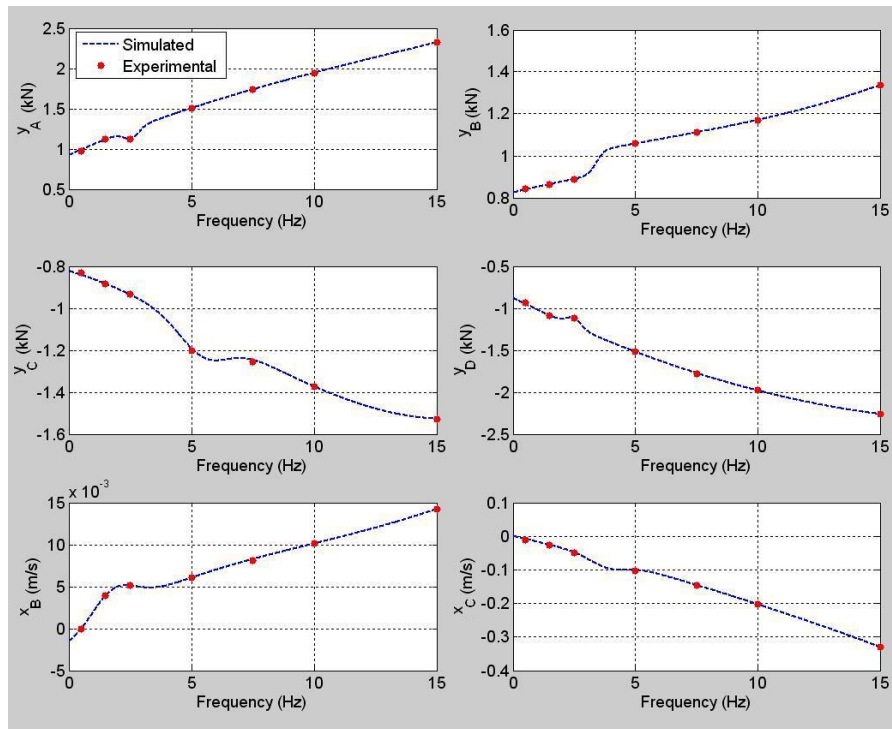
شکل (۳-۲۶) توابع چند جمله ای فیت شده روی داده های آزمایشگاهی پارامترهای مدل در حالت جریان متغیر  $f=1.5\text{Hz}$

$$a=6.35\text{mm}$$



شکل (۳-۲۷) توابع چند جمله ای فیت شده روی داده های آزمایشگاهی پارامترهای مدل در حالت دامنه متغیر و  $f=1.5\text{Hz}$

$$i=0.75A$$



شکل (۳-۲۸) توابع چند جمله ای فیت شده روی داده های آزمایشگاهی پارامترهای مدل در حالت فرکانس متغیر و

$$a=6.35\text{mm}, i=0.75A$$

### ۳-۳-۴ به دست آوردن توابع چند متغره برای پارامترها

تا اینجا رابطه ی بین هر کدام از پارامترهای مدل و شرایط تحریکی که روی آن پارامتر موثر است به صورت روابط مجزا به دست آمده است. در اینجا میخواهیم این رابطه های جداگانه را به صورت یک تابع چند متغیره از شرایط تحریک برای هر کدام از پارامترهای مدل به دست آوریم.

به عنوان مثال پارامتر نمونه  $y_A$  همانطور که قبلا نیز بیان شد تابعی از هر سه شرط تحریک است و میتوان آن را به صورت زیر نوشت :

$$y_A(a, i_0, f_{02}) = F(a) \quad (52-3)$$

$$y_A(a_0, i, f_{01}) = G(i) \quad (53-3)$$

$$y_A(a_0, i_0, f) = K(f) \quad (54-3)$$

که در آن  $a$  متغیر دامنه،  $i$  متغیر جریان،  $f$  متغیر فرکانس و  $i_0, a_0, f_{01}, f_{02}$  مقادیر صفر مشخصه های تحریک هستند.

همانطور که در مدل قبلی نیز دیدیم با توجه به روابط (52-3)، (53-3) و (54-3) داریم،

$$G(i_0) = K(f_{01}) \quad (55-3)$$

$$F(a_0) = K(f_{02}) \quad (56-3)$$

و از این رو میتوان  $y_A$  را به صورت تابع سه متغیره زیر نوشت :

$$y_A(a, i, f) = \frac{F(a).G(i).K(f)}{F(a_0).G(i_0)} \quad (57-3)$$

میتوان به سادگی نشان داد که رابطه (۵۷-۳) هر سه معادله (۵۲-۳)، (۵۳-۳) و (۵۴-۳) را برآورده می سازد.

بدین ترتیب پارامتر مدل  $YA$  به صورت تابع چند متغیره از شرایط تحریک به دست می آید.

با توجه به شکل (۹-۳) که مدل سازی از روی داده های آن صورت میگیرد مشخصه های تحریک صفر به صورت زیر انتخاب میشوند :

$$i_0 = 0.75A, a_0 = 6.35mm, f_{01} = 1.5Hz, f_{02} = 2.5Hz \quad (58-3)$$

اکنون با توجه به رابطه نمونه (۵۷-۳) میتوان هر یک از پارامترهای مدل را به صورت یک تابع چند متغیره از شرایط تحریک نوشت. سپس با جایگذاری روابط به دست آمده در مدل پایه (روابط (۴۰-۳) تا (۴۶-۳))، مدل کاملی خواهیم داشت که هر کدام از پارامترهای آن تابع شرایط تحریک خواهد بود.

### ۳-۳-۵ ارزیابی مدل

در اینجا مقایسه ای بین خروجی مدل ارائه شده و داده های آزمایشگاهی و همچنین مقایسه ای بین مدل ارائه شده و دو مدل ما<sup>۱</sup> و مدل بوک-ون اصلاح شده صورت میگیرد.

شکل (۲۹-۳) مقایسه بین نتایج شبیه سازی رفتار دمپر با داده های آزمایشگاهی را برای جریان، فرکانس و دامنه ی متغیر نشان میدهد. همانطور که در شکل دیده میشود تطبیق خوبی بین مدل و داده های آزمایشگاهی وجود دارد. داده های آزمایشگاهی در این شکل همان داده هایی هستند که مدل سازی بر مبنای آنها صورت گرفته است.

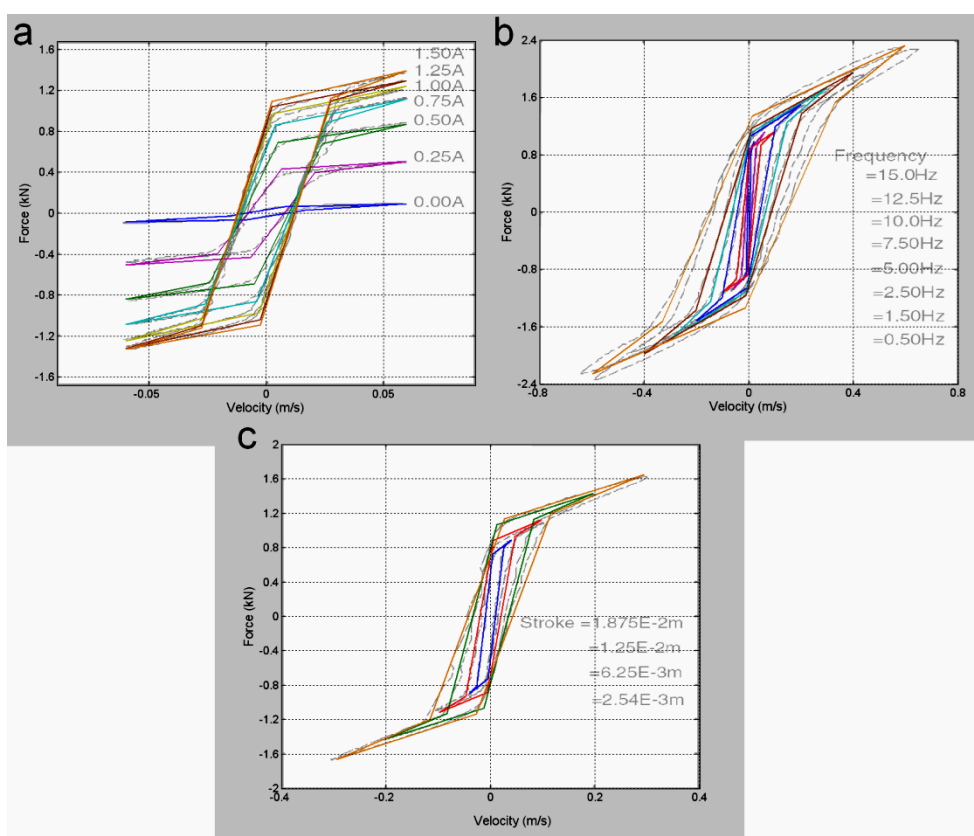
---

<sup>1</sup> X Q Ma et al.(2007)



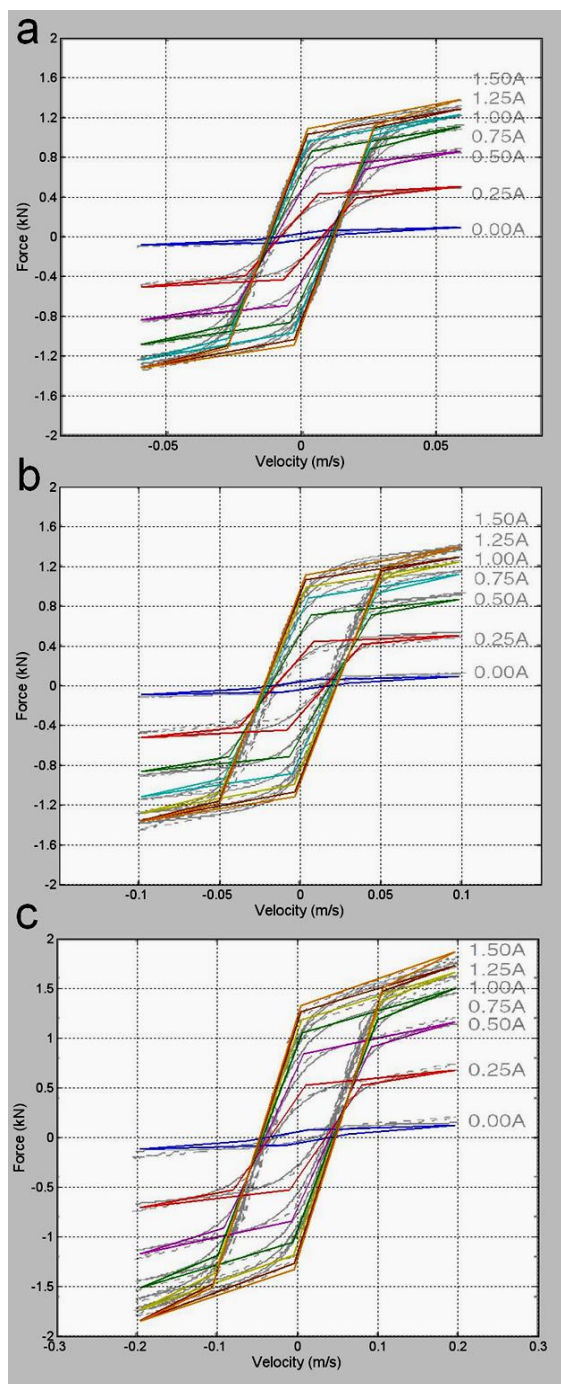
برای اطمینان از این که مدل ارائه شده قادر به شبیه سازی رفتار دمپر در شرایط تحریک متفاوت نیز میباشد، شکل (۳-۳۰) مقایسه بین داده های آزمایشگاهی و نتایج شبیه سازی مدل در شرایط تحریک متفاوت را نشان میدهد، در این جا نیز مدل شبیه سازی خوبی را از خود نشان میدهد.

برای مقایسه دقت مدل ارائه شده با دو مدل  $(X, Q, Ma)$  و بوک-ون اصلاح شده، رفتار شبیه سازی شده توسط این دو مدل و داده های آزمایشگاهی برای فرکانس متغیر و جریان ثابت در شکل (۳-۳۱) مورد مقایسه قرار گرفته اند (داده های مورد نیاز برای مدل بوک-ون از *X Q Ma et al. (2007)* برداشت شده است). با توجه به شکل این دو مدل برای شرایط تحریک متفاوت با آنچه مدلسازی بر مبنای آنها صورت گرفته، دقت خوبی را از خود نشان نمیدهند.

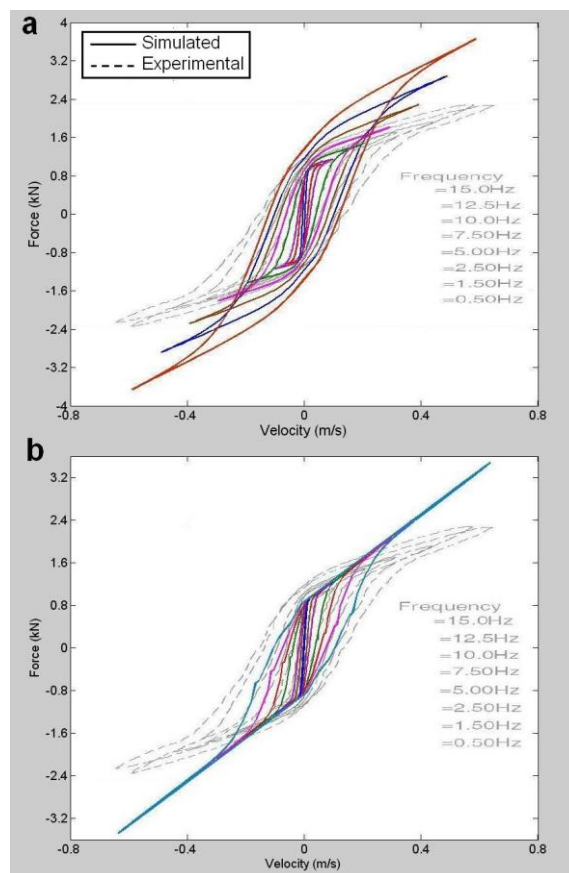


شکل (۳-۲۹) مقایسه بین نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی برای (a) ۲.۵ Hz و ۰.۷۵ A

(b) ۱.۵ Hz و ۶.۳۵ mm (c) ۰.۷۵ A و ۶.۳۵ mm (مقادیر آزمایشگاهی برگرفته شده از *X.Q.Ma et al. (2007)*)



شکل (۳-۳۰) مقایسه بین نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی برای ۶.۳۵ mm (a) ۱.۵ Hz (b) ۲.۵ Hz (c) ۵ Hz (مقادیر آزمایشگاهی برگرفته شده از (X.Q.Ma et al.(2007)



شکل (۳-۳۱) مقایسه بین نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی در شرایط تحریک ۲.۵ Hz و ۰.۷۵ A برای (a) مدل Xia,2007 (b) بوک-ون اصلاح (مقادیر آزمایشگاهی برگرفته شده از (X.Q.Ma et al.(2007)

### ۳-۴- ارائه مدل شبکه عصبی

روش دیگری که برای مدلسازی رفتار دمپر مگنتوریولژیک میتواند مورد استفاده قرار گیرد، استفاده از شبکه های عصبی است. شبکه های عصبی توانایی خوبی را در مدل سازی این نوع دمپرها از خود نشان داده اند. در ادامه، ابتدا به بیان توضیحاتی پیرامون مبانی شبکه های عصبی میپردازیم و سپس به ارائه یک مدل جدید شبکه عصبی با توجه به همان رویکرد کلی دو مدل ارائه شده قبلی، میپردازیم.

#### ۳-۴-۱- مبانی شبکه های عصبی مصنوعی

شبکه های عصبی مصنوعی (ANN<sup>۱</sup>) یا به زبان ساده تر شبکه های عصبی، سیستمها و روشهای محاسباتی نوینی هستند برای یادگیری ماشینی، نمایش دانش، و در انتها اعمال دانش به دست آمده در جهت پیش بینی پاسخهای خروجی از سامانه های پیچیده. ایده اصلی این گونه شبکه ها (تا حدودی) الهام گرفته از شیوه<sup>۲</sup> کارکرد سیستم عصبی زیستی، برای پردازش داده ها، و اطلاعات به منظور یادگیری و ایجاد دانش است. عنصر کلیدی این ایده، ایجاد ساختارهایی جدید برای سامانه<sup>۲</sup> پردازش اطلاعات است. این سیستم از شمار زیادی عناصر پردازشی فوق العاده بهم پیوسته با نام نرون تشکیل شده که برای حل یک مسأله با هم هماهنگ عمل می کنند. با استفاده از دانش برنامه نویسی رایانه می توان ساختار داده ای طراحی کرد که همانند یک نرون عمل نماید. سپس با ایجاد شبکه ای از این نرون های مصنوعی به هم پیوسته، ایجاد یک الگوریتم آموزشی برای شبکه و اعمال این الگوریتم به شبکه آن را آموزش داد. اگر یک شبکه را هم ارز با یک گراف بدانیم، فرآیند آموزش شبکه تعیین نمودن وزن هر یال و بایاس<sup>۲</sup> اولیه<sup>۲</sup> خواهد. روش کلی کار بدین صورت است که ابتدا ورودیهای شبکه و خروجیهای مطلوب به ازای این ورودیها تعیین می شوند. سپس، شبکه ای با ساختار معینی انتخاب می شود. این شبکه دارای چندین ضریب ثابت است که در ابتدا مقادیر آنها نامعلوم است. سپس مجموعه ای از داده ها که

---

<sup>۱</sup> Artificial Neural Network

<sup>۲</sup> Bias

خروجی مطلوب به ازای آنها معلوم است، برای تعیین این ضرایب استفاده می‌شوند. برای این منظور، یک تابع خطا برای خروجی تعریف می‌شود تا با استفاده از آن، میزان انحراف خروجی شبکه از مقدار مطلوب بصورت کمی بیان شود. حال ضرایب ثابت باید به گونه‌ای انتخاب شوند، که این تابع خطا به حداقل برسد. اصطلاحاً به این عمل آموزش<sup>۱</sup> شبکه گفته می‌شود. حال با استفاده از شبکه بدست آمده، می‌توان خروجیها را به ازای هر داده دیگری بدست آورد. شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای انواع و کاربردهای متنوعی می‌باشند. از این میان شبکه پرسپترون<sup>۲</sup> دارای کاربرد وسیع و انعطافپذیری بالایی است. در ادامه، به اجزا تشکیل دهنده و نحوه طراحی این شبکه اشاره خواهد شد

### ۳-۴-۱-۱-۱ نرون (واحد شبکه عصبی)

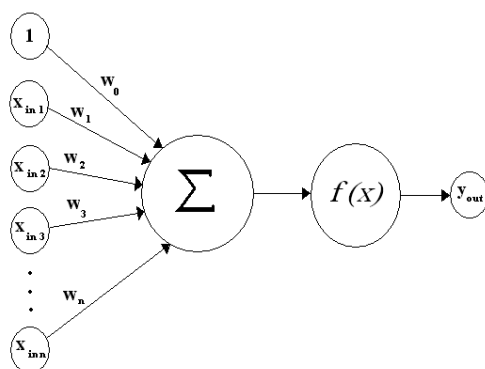
شبکه از ترکیب اجزایی تحت عنوان نرون<sup>۳</sup> تشکیل می‌شود. بطور نمونه یک نرون در شکل (۳-۳۲) نمایش داده شده است.

هر نرون دارای چند ورودی و یک خروجی می‌باشد که هر خروجی تابعی از مجموع وزنی ورودیها می‌باشد. ورودیهای یک نرون می‌تواند ورودیهای شبکه، خروجیهای سایر نرونها یا مقادیر ثابت باشد. تمامی نرونها یک ورودی با مقدار ثابت ۱ را دارا می‌باشند. به این ترتیب خروجی نرون از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$y_{out} = f\left(w_0 + \sum_{i=1}^{N_n} x_{in_i} w_i\right) \quad (۳-۵۹)$$

که  $y_{out}$  خروجی نرون،  $w_i$  وزن مربوط به ورودی  $i$  ام،  $w_0$  وزن مربوط به ورودی ۱،  $x_{in_i}$  ورودی  $i$  ام،  $N_n$  تعداد ورودیهای نرون (باستثنای ورودی ۱) و  $f$  تابع تحریک نرون است.

<sup>۱</sup> Train  
<sup>۲</sup> Perceptron  
<sup>۳</sup> Neuron



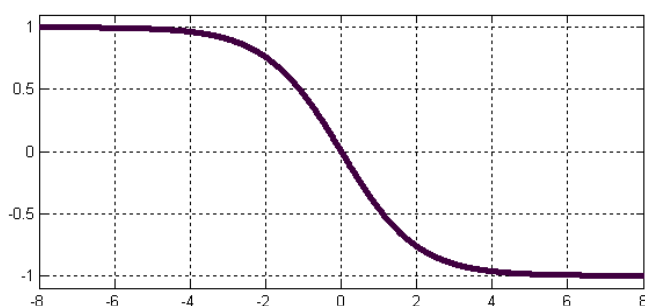
شکل (۳-۳۲): نمایش یک نرون

روابط مختلفی را میتوان برای تابع تحریک به کار برد. از این جمله، تابع همانی<sup>۱</sup>، تابع پله و تابع سیگموئید<sup>۲</sup> می‌باشند. از این میان، تابع سیگموئید پرکاربرد می‌باشد. نوع دو قطبی این تابع که در شکل (۳-۳۳) نمایش داده شده است، بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(x) = \frac{1 - e^{-\alpha x}}{1 + e^{-\alpha x}} \quad (۳-۶۰)$$

و مشتق آن نیز بصورت زیر بدست می‌آید:

$$f'(x) = \frac{\sigma}{2} [1 - f^2(x)] \quad (۳-۶۱)$$



شکل (۳-۳۳)- تابع سیگموئید

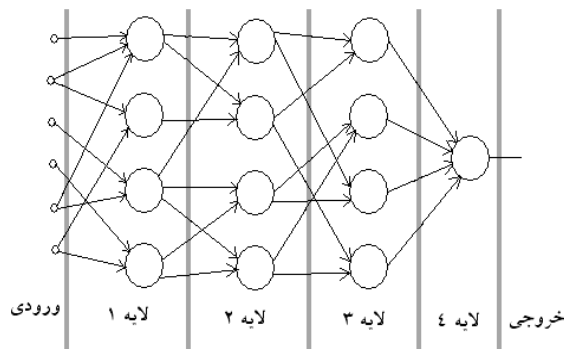
2-Identity function

3-Sigmoid function

مشق تابع تحریک برای آموزش شبکه کاربرد دارد و سادگی محاسبه آن باعث افزایش سرعت آموزش شبکه می شود.

### ۳-۴-۱-۲ ساختار شبکه عصبی

یکی از مهمترین مسایل در تعریف شبکه عصبی، نحوه ترکیب نرونها یا اصطلاحاً توپولوژی<sup>۱</sup> شبکه می باشد. همانطور که گفته شد خروجی یک نرون، می تواند ورودی نرون دیگر باشد. از این رو هر شبکه به چند لایه تقسیم بندی می شود. هر لایه متشکل از یک یا چند نرون می باشد که خروجی هیچ یک از نرونها ورودی دیگری نمی باشد. ورودی هر لایه، خروجی لایه قبل می باشد، باستثنای لایه اول که ورودی آن، ورودیهای شبکه می باشد. به لایه آخر، لایه خروجی و به سایر لایهها، لایههای پنهان گفته می شود. یک نمونه از شبکه در شکل (۳-۳۴) نمایش داده شده است. بر اساس یک قاعده، برای هر نوع دسته بندی، حداکثر سه لایه کافی است، اگرچه ممکن است برای رسیدن به پاسخهای بهتر از لایههای بیشتر استفاده شود.



شکل (۳-۳۴) - نمایش ساختار یک شبکه عصبی ۴ لایه. دایره بزرگ نشاندهنده نرونها و دایره کوچک، ورودیهای شبکه می باشند.

<sup>1</sup> Topology

### ۳-۴-۱-۳ - آموزش شبکه پرسپترون

روشهای متعدد بهینه سازی برای به حداقل رسانیدن تابع خطا وجود دارد. اما متداولترین روش برای آموزش شبکه پرسپترون، استفاده از الگوریتم انتشار برگشتی<sup>۱</sup> است. روابط مورد استفاده در این الگوریتم بر اساس به حداقل رسانیدن مجموع مجذورات خطاهای خروجی شبکه بدست آمده اند.

در ادامه روابط مربوطه بیان می شوند، برای کسب اطلاعات بیشتر می توان به مراجع مراجعه نمود. الگوریتم مربوط به انتشار برگشتی شبکه سه لایه که در شکل (۳-۳۵) نشان داده شده، بصورت زیر می باشد:

در ابتدا برای اوزان مقادیر اولیه ای فرض می شود. سپس تا زمانی که حداکثر تغییرات بدست آمده برای اوزان از حد معینی کوچکتر شود، یا نمونه ها به تعداد دفعات معینی برای آموزش بکار روند حلقه زیر تکرار می شود: نمونه های آموزش به ترتیب، به شبکه داده شده و مراحل (الف) تا (ز) طی می شوند:

الف- خروجی شبکه محاسبه می شود. مقادیر برای لایه اول محاسبه می گردد

$$z_{in_h} = u_{0h} + \sum_{i=1}^n u_{ih} \cdot x_i$$

$$z_h = f(z_{in_h})$$

ب- حال اطلاعات به لایه دوم فرستاده می شوند و خروجی این لایه محاسبه می گردد.

$$zz_{in_j} = v_{0j} + \sum_{h=1}^q v_{hj} z_h$$

$$zz_j = f(zz_{in_j})$$

ج- اطلاعات به لایه سوم منتقل می شوند.

$$y_{in_k} = w_{0k} + \sum_{j=1}^p w_{jk} zz_j$$

$$y_k = f(y_{in_k})$$

<sup>1</sup> Back propagation

د- اکنون خطا در لایه آخر محاسبه شده و به لایه‌های قبلی منتقل می‌گردد. برای هر دسته خروجی  $Y_k, (k = 1, \dots, m)$  خطا محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} e_k &= Tou_k - y_k \\ \delta_k &= e_k f'(y_{in_k}) \\ \Delta w_{jk} &= \alpha \delta_k z_{j,k} \\ \Delta w_{0k} &= \alpha \delta_k \end{aligned}$$

ه- برای هر لایه  $ZZ_j, (j = 1, \dots, p)$

$$\begin{aligned} \delta_{in_j} &= \sum_{k=1}^m \delta_k w_{jk} \\ \delta_j &= \delta_{in_j} f'(z_{in_j}) \\ \Delta v_{hj} &= \alpha \delta_j z_{h,j} \\ \Delta v_{0j} &= \alpha \delta_j \end{aligned}$$

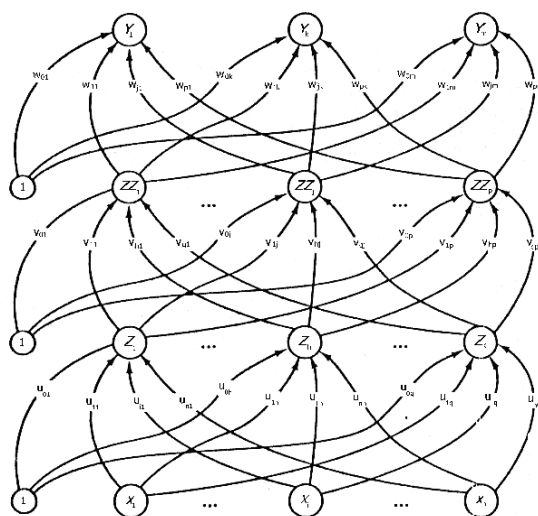
و- برای هر لایه  $Z_h, (h = 1, \dots, q)$

$$\begin{aligned} \delta_{in_h} &= \sum_{j=1}^p \delta_j v_{hj} \\ \delta_h &= \delta_{in_h} f'(z_{in_h}) \\ \Delta u_{ih} &= \alpha \delta_h x_i \\ \Delta u_{0h} &= \alpha \delta_h \end{aligned}$$

ز- تمامی تغییرات بدست آمده اعمال می‌گردد.

که  $\alpha$  پارامتر تعیین کننده نرخ یادگیری و  $Tou_k$  خروجی مطلوب  $k$ ام است. الگوریتم برای شبکه‌هایی با تعداد لایه کمتر یا بیشتر به سادگی از این الگوریتم قابل استخراج می‌باشد.





شکل (۳-۳۵) - شبکه عصبی ۳ لایه

### ۳-۴-۲ تاریخچه شکلگیری مدل‌های شبکه عصبی

شوارتر<sup>۱</sup> مدلی را برای دمپر مگنتوریولوژیک بر پایه ANFIS<sup>۲</sup> ارائه داد که رفتار دمپر را به خوبی پیش بینی کرده و به طور قابل ملاحظه ای مقدار محاسبات انجام شده را کاهش میداد، با این وجود برای این مدل، سیکل های آموزش یا تمرین زیادی مورد نیاز بود.

وانگ<sup>۳</sup> شبکه بازگشتی عصبی را ارائه داد که نیروی میرایی را پیش بینی میکرد.

چانگ<sup>۴</sup> مدل دمپر مگنتوریولوژیک را به وسیله شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP<sup>۵</sup>) ارائه داد. آموزش این شبکه به وسیله روش لیونبرگ-مارکوارت<sup>۶</sup> و به وسیله ی داده هایی که از مدل اسپنسر<sup>۷</sup> به دست آمده بود صورت گرفت. شبکه های عصبی MLP خود را به عنوان روشی قابل اعتماد و کارآمد برای مشخص کردن رفتار

<sup>1</sup> Schurter,2000

<sup>2</sup> adaptive neuro-fuzzy inference system

<sup>3</sup> Wang,2001

<sup>4</sup> Chang,1998

<sup>5</sup> Multilayer perceptron

<sup>6</sup> Levenberg-Marquardt

<sup>7</sup> Spenser,1997

دمپر مگنتوریولوژیک نشان داده اند. با این وجود انتخاب ساختار شبکه و آموزش شبکه گاهی کاری پیچیده است.

دو<sup>۱</sup> مدلی دیگر بر پایه ی شبکه های عصبی با تابع پایه ی شعاعی RBF<sup>۲</sup> برای شناسایی دمپر مگنتوریولوژیک ارائه داد. شبکه های RBF ابزار محاسباتی قدرتمندی هستند و به طور گسترده در مدل کردن سیستم ها مورد استفاده قرار گرفته اند. بزرگترین مزیت شبکه ها RBF ساختار و آموزش ساده، سرعت بالای آموزش و امکان مشارکت جنبه های کیفی تجربه انسانی در انتخاب مدل و آموزش آن است، با این وجود این نوع شبکه ها مشکلاتی را نیز در زمینه انتخاب ساختار شبکه و محاسبه پارامترهای مدل دارا هستند.

شبکه هاب عصبی را میتوان برای پیش بینی رفتار دمپر مگنتوریولوژیک به صورت مستقیم و یا معکوس آموزش داد. شبکه معکوس شبکه ای است که خروجی آن ولتاژ اعمالی به دمپر است و نیرو به عنوان یک ورودی به مدل داده میشود. این گونه مدل ها برای استفاده در سیستم های کنترل نسبت به مدل های مستقیم که در آنها ولتاژ به عنوان ورودی مدل و نیرو خروجی مدل میباشد مناسب تر هستند.

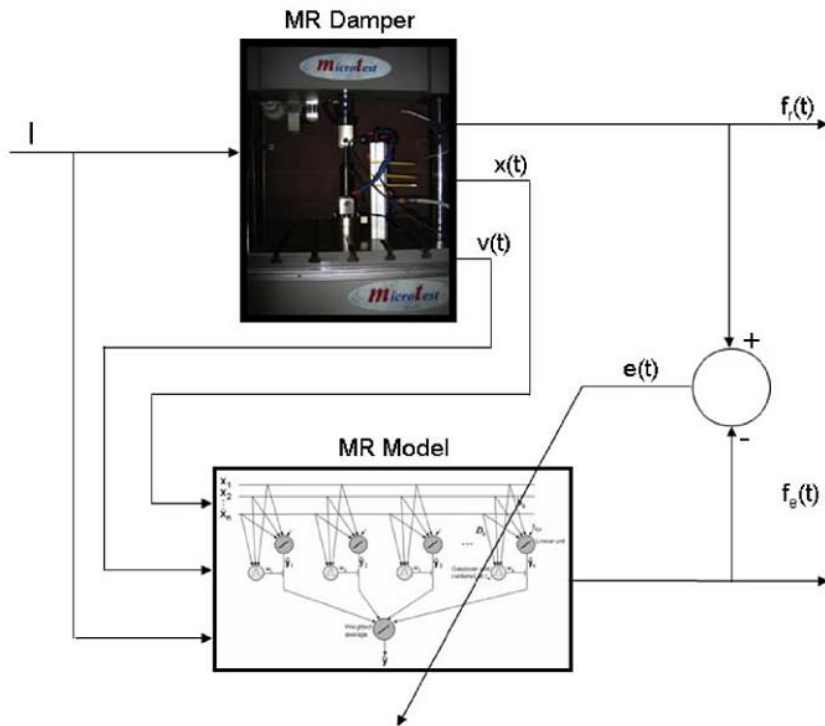
بودا مدلی را بر پایه ی روش RLL<sup>۳</sup> ارائه داده است که نتایج آن تناسب خوبی بین داده های آزمایشگاهی و شبیه سازی از خود نشان میدهد. ساختار کلی این مدل در شکل (۳-۳۶) مشاهده میشود.

---

<sup>1</sup> Du, 2006

<sup>2</sup> Radial Basis Function

<sup>3</sup> Recursive Lazy Learning

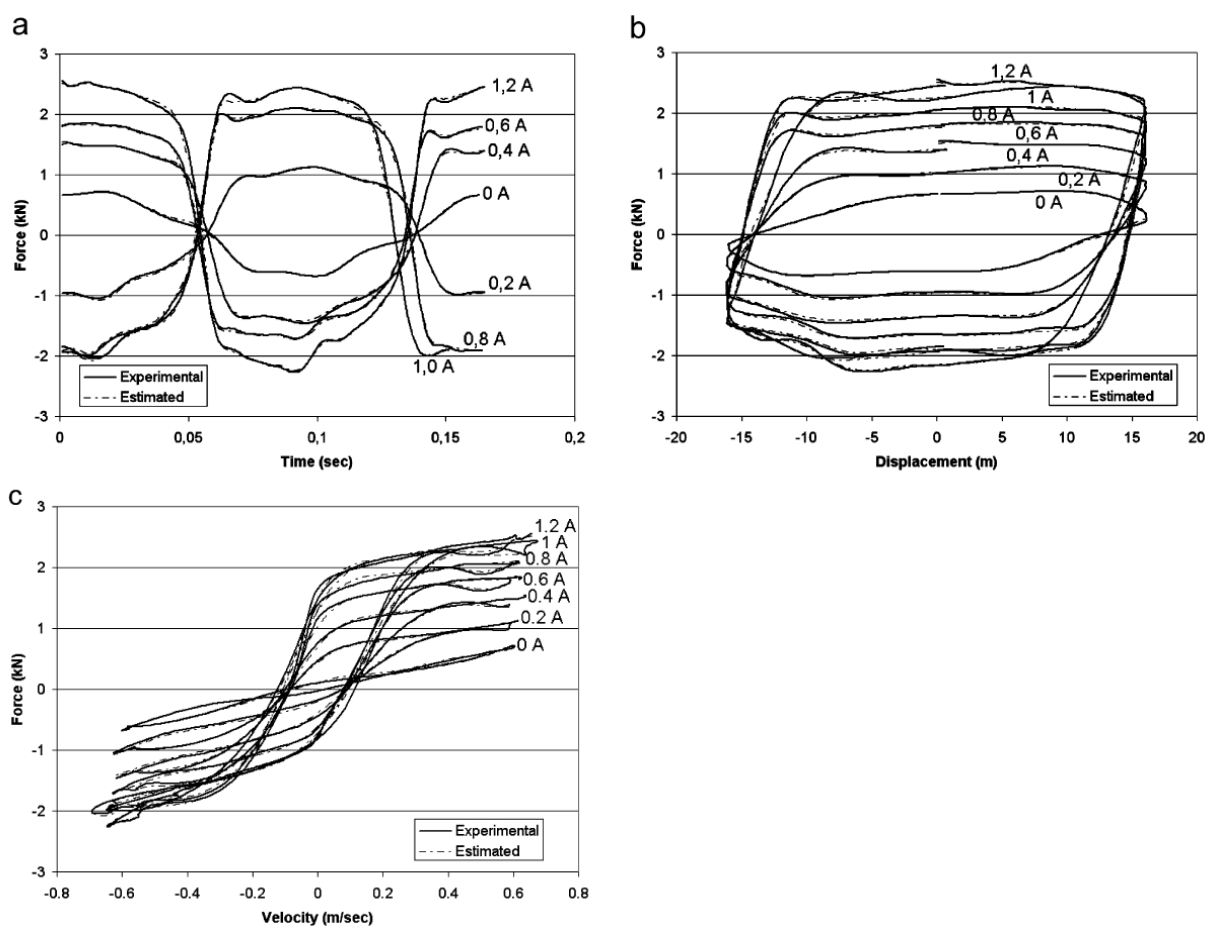


شکل (۳-۳۶) طرح مدل بودا

همانطور که در شکل دیده میشود دمپر شبیه آنچه برای مدل پارامتریک گفته شد مورد تست قرار میگیرد. یعنی جابجایی سیسنوسی تحت فرکانس ثابت و برای چندین ولتاژ (جریان) متفاوت. سپس داده ها به مدل عصبی وارد میشوند.

مدل دارای سه ورودی جابجایی، سرعت و جریان الکتریکی محرک میباشد. و تنها خروجی، نیروی دمپر مگنتوریولوژیک است. هر بار که داده های ورودی به مدل وارد میشوند مدل خروجی را تولید میکند که این خروجی نیروی دمپر است. سپس نیروی خروجی مدل  $f_r(t)$  با نیروی خروجی دمپر  $f_e(t)$  مقایسه میشود و در صورت وجود خطا  $e(t)$  پارامترهای شبکه با استفاده از الگوریتم آموزش شبکه به گونه تغییر داده میشود که خطا به مقدار در نظر گرفته شده پیش فرض کاهش یابد.

شکل (۳-۳۷) مقایسه ای بین نمودارهای نیرو-جابجایی، نیرو-سرعت و نیرو-زمان به دست آمده از داده های آزمایشگاهی در جریان های  $0$  تا  $1.2A$  را با داده های به دست آمده از مدل ارائه میدهد.



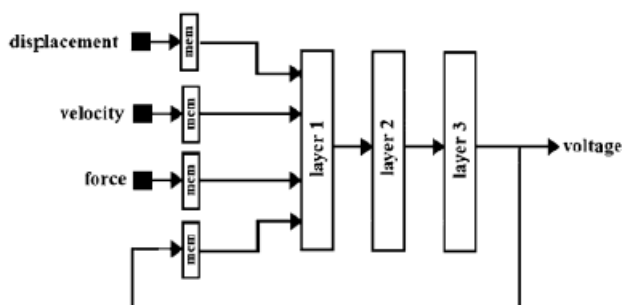
شکل (۳-۳۷) مقایسه بین پاسخ پیش بینی شده و داده های آزمایشگاهی مدل بودا برای تحریک 9Hz, 16mm

نتایج آزمایشگاهی به صورت خطوط ممتد و رفتار مدل شده با خط چین نشان داده شده است. همانگونه که دیده میشود مدل تخمینی با داده های آزمایشگاهی به دست آمده تطبیق خوبی دارد. همانطور که در شکل دیده میشود در سرعت های کم تغییرات سرعت، رفتار پسماندی زیادی را از خود نشان میدهد. در حالی که برای سرعت های بیشتر، نیرو تقریباً با سرعت به صورت خطی تغییر میکند. این دو ناحیه متفاوت از نظر عملکرد دمپر نواحی پیش از تسلیم و پس از تسلیم هستند.

زاپاترو<sup>۱</sup> مدل معکوسی برای دمپر مگنتوریولوژیک توسط یک شبکه عصبی بازگشتی ارائه داده است. یعنی طراحی شبکه عصبی به گونه ای است که ولتاژ کنترلی را با داشتن جابجایی و سرعت پیستون و نیروی مورد

<sup>1</sup> Zapateiro, 2008

نیاز برای دمپر پیش بینی میکند. خروجی (ولتاژ) در این مدل به ورودی برگشت داده میشود. ساختار این شبکه عصبی بازگشتی در شکل (۳-۳۸) دیده میشود.



شکل (۳-۳۸) مدل شبکه عصبی معکوس برای دمپر مگنتوریولوژیک

این شبکه دارای سه لایه با ۱۲ نورون در لایه اول، ۴ نورون در لایه دوم و ۱ نورون در لایه خروجی است. تمام ورودی ها به علاوه فیدبک دارای تاخیری برابر ۴ واحد زمان هستند. شبکه عصبی با الگوریتم انتشار برگشتی عدول کننده<sup>۱</sup> و با استفاده از ورودی های تصادفی جابجایی و ولتاژی آموزش دیده است که از مدل بوک-ون ارائه شده توسط رودریگز<sup>۲</sup> برداشت شده است.

### ۳-۴-۳ مدل پایه به کمک شبکه عصبی

در دو مدل قبلی ارائه شده برای شبیه سازی رفتار دمپر MR برای تکمیل مدل پایه از توابع سیگموئیدی و خطی استفاده کردیم که در آنها پارامترهای مدل می باید به گونه ای انتخاب میشدند که شکل نهایی مدل میتواند تقریب خوبی از رفتار نهایی مدل را ارائه دهد. این فرآیند انتخاب مدل پایه و سپس تعیین پارامترهای مدل و در ادامه به دست آوردن تابع تغییر هر یک از این پارامترها فرآیندی طولانی را ایجاد میکند. برای ایجاد سادگی بیشتر در فرآیند مدل سازی رفتار دمپر مگنتوریولوژیک میتوان از شبکه های عصبی به عنوان مدل پایه

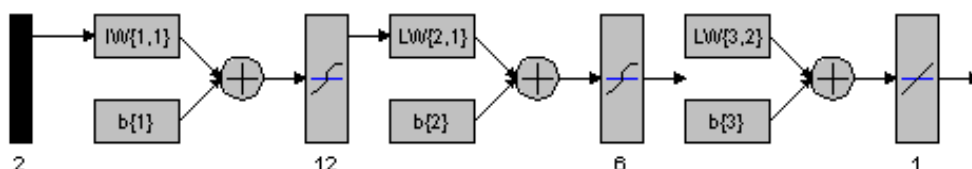
<sup>1</sup> Resilient backpropagation

<sup>2</sup> Rodriguez, 2008

استفاده کرد. شبکه های عصبی برای تقریب توابع از توانایی های گسترده ای برخوردار هستند تا جایی که از شبکه های عصبی به عنوان تقریب زنده های عمومی<sup>۱</sup> نام برده میشود. با استفاده از شبکه های عصبی برای تابع پایه در واقع ما یک تابع کاملا انعطاف پذیر خواهیم داشت که به خوبی میتواند داده های آزمایشگاهی را تقریب بزند.

شبکه عصبی مورد استفاده در اینجا یک شبکه MLP است که درباره این نوع شبکه ها پیشتر توضیحاتی ارائه شد. این شبکه عصبی از نوع feed-forward backprop است که از سه لایه تشکیل شده. لایه اول شامل ۱۲ نورون، لایه دوم شامل ۶ نورون و لایه سوم شامل ۱ نورون است. توابع انتقال برای دو لایه اول از نوع TANSIG و برای لایه آخر تابع خطی است. شمای کلی شبکه در شکل (۳-۳۹) دیده میشود.

این شبکه دارای دو ورودی و یک خروجی است. ورودی اول مربوط به سرعت دمپر است و ورودی دوم مربوط به یکی از سه شرط تحریک یعنی جریان، دامنه و یا فرکانس است.



شکل (۳-۳۹) شبکه عصبی ایجاد شده برای مدل

برای تکمیل مدل پایه نیاز به سه شبکه عصبی است که برای شبیه سازی داده های آزمایشگاهی برای شرایط تحریک جریان، دامنه و فرکانس متغیر به کار میروند، به این ترتیب که هرکدام از این شبکه ها مربوط به شبیه سازی نمودارهای آزمایشگاهی برای یکی از سه شرط تحریک است. جزئیات مربوط به هر یک از این سه شبکه که مشابه یکدیگر هستند در پیوست (۴) آمده است.

<sup>1</sup> Global fitter

## ۳-۴-۳-۱ تعیین پارامترهای مدل

در مورد شبکه های عصبی تعیین پارامترهای مدل که در اینجا همان وزن‌ها و بایاسهای شبکه هستند با استفاده از فرآیند آموزش شبکه صورت میگیرد. سه شبکه ارائه شده فوق به کمک روش Levenberg-Marquart مورد آموزش قرار میگیرد. پارامترهای مربوط به آموزش شبکه به صورتی که در پیوست (۵) آورده شده تنظیم میشوند. همانطور که پیشتر بیان شد هر یک از سه شبکه عصبی ایجاد شده دارای دو ورودی هستند یکی مربوط به سرعت و دیگری مقدار عددی یکی از سه شرط تحریک می باشد. هر یک از سه شبکه عصبی یکی از سه نمودار آزمایشگاهی را مدل سازی میکنند. آموزش شبکه از روی نمودارهای آزمایشگاهی برای شتابهای منفی صورت میگیرد. پس از اتمام فرآیند آموزش شبکه، سه شبکه عصبی مجزا خواهیم داشت که هر یک نیروی دمپر مگنتوریولوژیک را برای یکی از شرایط تحریک متغیر تقریب می زنند.

برای تکمیل مدل مانند آنچه برای مدل سازی در روشهای قبلی صورت گرفت و روابط جداگانه برای شرایط تحریک متفاوت به یک رابطه نهایی تبدیل شد، در اینجا هم از ترکیب سه شبکه مجزا یک شبکه واحد را ایجاد میکنیم که بتواند مدل مناسبی برای دمپر باشد. به عنوان مثال اگر شبکه ای که جریان ورودی آن است را  $net\_cur$  بنامیم داریم،

$$F_d(i, 1.5Hz, 6.35mm) = net\_cur(\dot{x}, i) \quad (۳-۶۲)$$

که در آن  $F_d$  نیروی دمپر،  $i$  جریان ورودی، مقادیر  $1.5Hz$  و  $6.35mm$  شرایط تحریک صفر و  $\dot{x}$  سرعت دمپر است.

مانند آنچه در روشهای قبلی برای مدل سازی ارائه شد، نیروی نهایی دمپر را میتوان به صورت زیر ارائه داد :

$$F_d(a, i, \omega) = \frac{net\_amp(\dot{x}, a).net\_cur(\dot{x}, i).net\_freq(\dot{x}, f)}{net\_amp(\dot{x}, a_0).net\_cur(\dot{x}, i_0)} \quad (۳-۶۳)$$

که در آن  $net\_amp$  شبکه عصبی ایجاد شده برای حالت دامنه متغیر و  $net\_freq$  شبکه عصبی ایجاد شده برای حالت فرکانس متغیر است و  $a$  دامنه،  $f$  فرکانس و  $i$  جریان تحریک می باشد همچنین شرایط تحریک صفر نیز همانند قبل به صورت زیر خواهد بود :

$$i_0 = 0.75A, a_0 = 6.35mm, f_{01} = 1.5Hz, f_{02} = 2.5Hz \quad (3-64)$$

برنامه ای که در پیوست (۶) آمده است برای ترکیب سه شبکه مجزا و ایجاد یک مدل واحد و همچنین مقایسه مقادیر شبیه سازی شده و داده های آزمایشگاهی نوشته شده است.

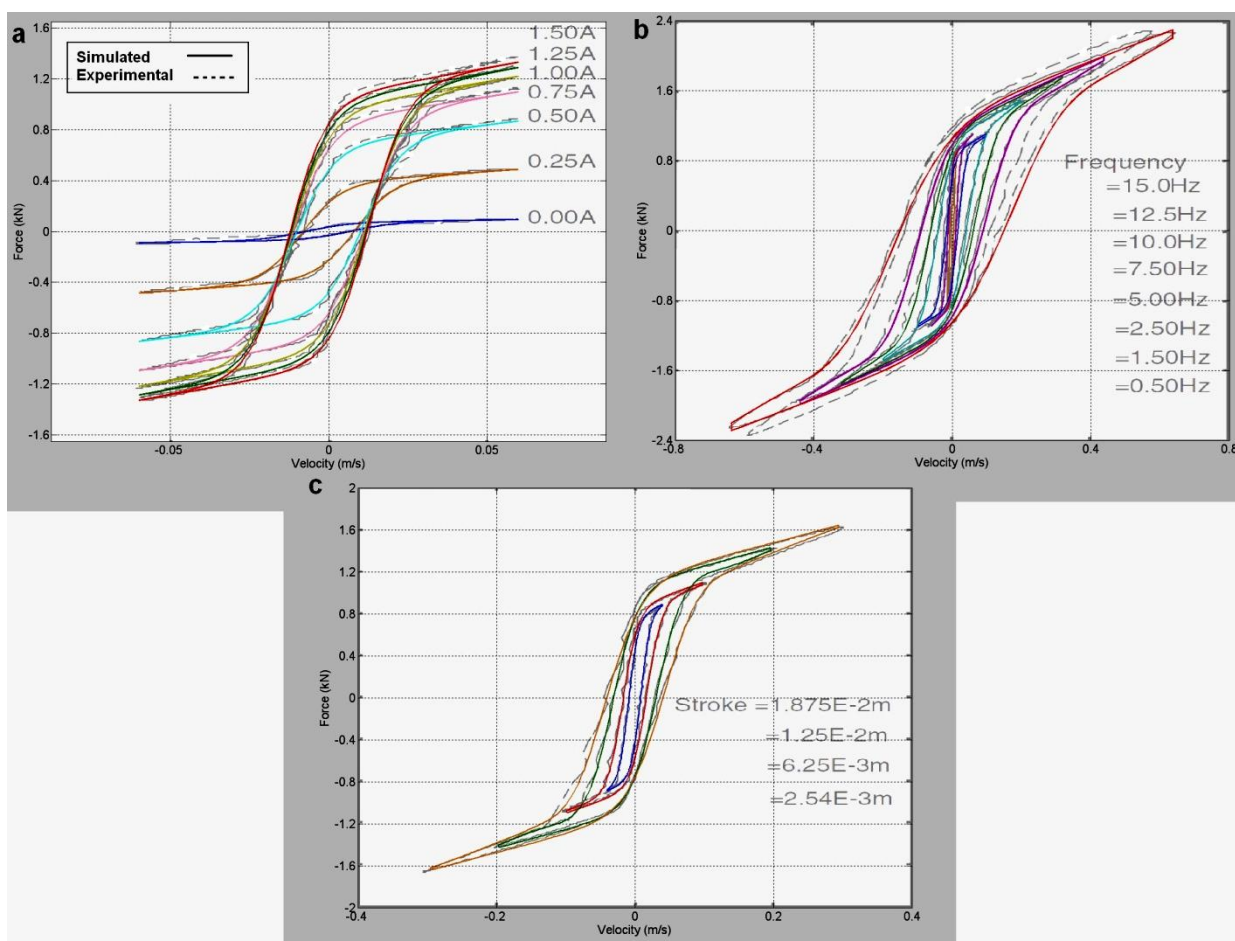
### ۳-۴-۲ ارزیابی مدل

در اینجا مقایسه ای بین خروجی مدل ارائه شده و داده های آزمایشگاهی و همچنین مقایسه ای بین مدل ارائه شده و مدل ما (X.Q.Ma) صورت میگیرد.

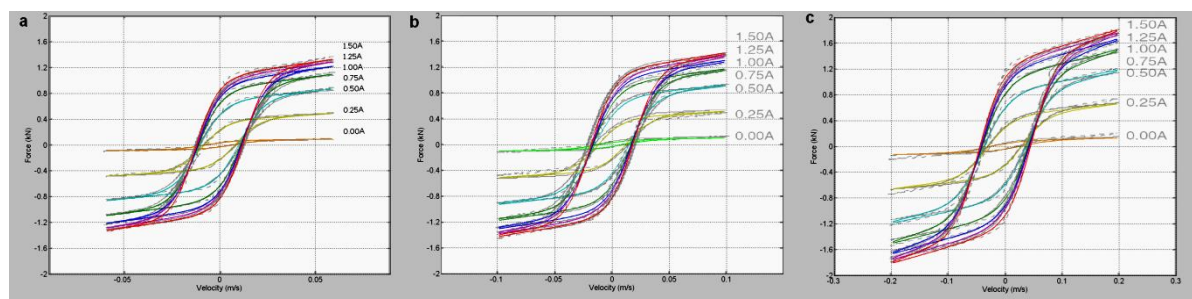
شکل (۳-۴۰) مقایسه بین نتایج شبیه سازی رفتار دمپر با داده های آزمایشگاهی را برای جریان، فرکانس و دامنه ی متغیر نشان میدهد. همانطور که در شکل دیده میشود تطبیق خوبی بین مدل و داده های آزمایشگاهی وجود دارد. داده های آزمایشگاهی در این شکل همان داده هایی هستند که مدل سازی بر مبنای آنها صورت گرفته است.

برای اطمینان از این که مدل ارائه شده قادر به شبیه سازی رفتار دمپر در شرایط تحریک متفاوت نیز می باشد، شکل (۳-۴۱) مقایسه بین داده های آزمایشگاهی و نتایج شبیه سازی مدل در شرایط تحریک متفاوت را نشان میدهد، در این جا نیز مدل شبیه سازی خوبی را از خود نشان میدهد.





شکل (۳-۴۰) مقایسه بین نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی برای (a) 6.35mm , 0.75A (b) 1.5Hz , 6.35mm (c) 2.5Hz , 0.75A



شکل (۳-۴۱) مقایسه بین نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی برای ۶.۳۵ mm (a) ۱.۵ Hz (b) ۲.۵Hz (c) ۵ Hz

(.... داده آزمایشگاهی و \_\_\_ شبیه سازی مدل) (مقادیر آزمایشگاهی برگرفته شده از X.Q.MA,2007)

## فصل چهارم

### بررسی اثر کنترل نیمه فعال در پایداری سیستم تعلیق خودرو با استفاده از دمپر مگنتوریولوژیک

کنترل ارتعاش سیستم تعلیق خودرو از آنجا که میتواند راحتی سرنشینان و کنترل پذیری خوبی را برای خودرو ایجاد نماید یکی از موضوعات مهم در خودرو سازی به شمار میرود. برای مدت طولانی تلاشها در جهت ایجاد سیستم تعلیقی صورت میگرفت که بتواند با بهینه سازی پارامترهای سیستم تعلیق در شرایط بهینه کار کند. اما با توجه به محدودیتهای سیستم تعلیق غیر فعال بهینه سازی های صورت گرفته تنها در شرایط خاص کاری موثر بود و بنابر حالت کنترل بهینه با تغییر شرایط سیستم و یا با تغییر وضعیت کاری از بین میرفت. در مقایسه با سیستم کنترل غیر فعال، سیستم تعلیق فعال عملکرد سیستم را در دامنه کاری وسیعی بهبودمی بخشد و میتواند خود را با تغییرات سیستم هماهنگ کند و عملکرد موثر تری نسبت به سیستم تعلیق غیر فعال داشته باشد. سیستم های کنترل نیمه فعال در دهه ۱۹۷۰ ارائه شدند<sup>۱</sup>. این سیستم ها تقریباً میتوانند به اندازه سیستمها تعلیق فعال در بهبود کیفیت رانندگی موثر باشند. در مقایسه با سیستمهای تعلیق فعال و غیر فعال، سیستم تعلیق نیمه فعال مزایای هر دو سیستم را باهم دارا میباشد. مثلاً اگر سیستم کنترل نیمه فعال از کار بیفتد، در مقایسه با سیستم فعال، سیستم تعلیق نیمه فعال هنوز میتواند در حالت غیر فعال به کار خود ادامه دهد. سیستمهای نیمه فعال در مقایسه با سیستم های غیر فعال عملکرد بهتری را از خود نشان میدهند و در

---

<sup>۱</sup> Karnopp et al 1974

مقایسه با سیستمهای فعال اقتصادی تر و امن تر هستند و نیاز به منبع انرژی زیادی ندارند<sup>۱</sup>. در سیستمهای تعلیق نیمه فعال اولیه تغییر نیروی دمپر به کمک تغییر مساحت اریفیس دمپر روغنی امکان پذیر میشد ولی این مکانیسم از سرعت پاسخ پائینی برخوردار بود.

همانطور که در فصلهای قبل نیز بیان شد، کاربرد سیالات الکتروریولوژیک (ER) و مگنتوریولوژیک (MR) در دمپره‌های قابل کنترل مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. سیالت ER,MR دو نوع از مواد هوشمند هستند که از مخلوط کردن ذرات ریز در یک سیال با ویسکوزیته پائین به دست می آیند.

با اعمال میدان الکتریکی یا مغناطیسی به دمپر حاوی سیال هوشمند ویسکوزیته سیال افزایش یافته و با حذف میدان ویسکوزیته سیال به حالت اولیه بر میگردد. این فرآیند تغییر ویسکوزیته بسیار سریع اتفاق می افتد یعنی در کمتر از چند میلی ثانیه و به راحتی قابل کنترل است و انرژی بسیار کمی در حدود چند وات مصرف میکند. این ویژگی های دمپر های سیال هوشمند آنها را به ابزاری کارآمد برای استفاده در سیستمهای کنترل نیمه فعال تبدیل کرده است.

#### ۴-۱- الگوریتمهای کنترل نیمه فعال

برای کنترل نیمه فعال تاکنون روشهای مختلفی در مقالات ارائه شده است. بعضی از این روشها از انطباق کنترل فعال روی سیستم نیمه فعال به دست آمده اند و بعضی دیگر به صورت مستقیم از شرایط فیزیکی استخراج شده اند. در یک ابزار نیمه فعال تنها اتلاف انرژی وجود دارد و به سیستم انرژی افزوده نمیشود. این نوع از ابزارها مانند دمپره‌های غیر فعالی هستند که مشخصه های آنها میباید در حین کار تنظیم گردد. در ادامه به بعضی از پرکاربردترین استراتژی های کنترل نیمه فعال مورد استفاده در سیستم تعلیق خودرو اشاره میگردد.

#### ۴-۱-۱. منطق گیره فضایی<sup>۲</sup>

---

<sup>۱</sup> Yi K, Song BS; 1994

<sup>۲</sup> Sky-hook

این منطق به وسیله کارپ<sup>۱</sup> ارائه شد و به این دلیل گیره فضایی نامیده شد که دمپر به گونه ای در نظر گرفته میشود که انگار در نقطه ای در فضا در گیر شده است. مشخصا چنین تقریبی ممکن نیست بنابراین تقریب گیره فضایی ایده آل به صورت زیر ارائه میشود :

$$F_d = F_{\text{skyhook}} = \begin{cases} c_{\text{sky}} \dot{x}_1 & \dot{x}_1 > 0 \\ 0 & \dot{x}_1 \leq 0 \end{cases} \quad (1-4)$$

که در آن  $\dot{x}$  سرعت نسبی و  $\dot{x}_1$  سرعت جسم متحرک میباشد.

#### ۴-۱-۲ منطق گیره فضایی روشن-خاموش<sup>۲</sup>

این منطق کنترلی مانند منطق گیره فضایی است با این تفاوت که نیروی دمپر دارای دو مقدار حداقل و حداکثر خواهد بود. در این روش نیروی دمپر به صورت زیر محاسبه میشود.

$$F_d = F_{\text{skyhook}} = \begin{cases} F_{\text{max}} & \dot{x}_1 > 0 \\ F_{\text{min}} & \dot{x}_1 \leq 0 \end{cases} \quad (2-4)$$

#### ۴-۱-۳ کنترل مد لغزنده<sup>۳</sup>

کنترل مد لغزنده (SMC) یکی از پر کاربردترین روشهای کنترل غیر خطی است که توانایی دکوپله کردن سیستمهایی با ابعاد بزرگ به چندین سیستم با ابعاد کوچک را دارا میباشد. در اینجا منطق کنترل مد لغزنده برای یک سیستم دو درجه آزادی به صورت زیر ارائه میگردد ((Vijay et al (2007)).

<sup>1</sup> Karnopp et al. (1974)

<sup>2</sup> Skyhook on-of

<sup>3</sup> Sliding mode control

$$F = \begin{cases} F_{\max}, & \text{if } \text{sign}((\dot{x}_2 - \dot{x}_1)s) = +1 \\ 0, & \text{if } \text{sign}((\dot{x}_2 - \dot{x}_1)s) = 0 \text{ or } -1 \end{cases} \quad (3-4)$$

که در آن،

$$s = G^T X \quad (4-4)$$

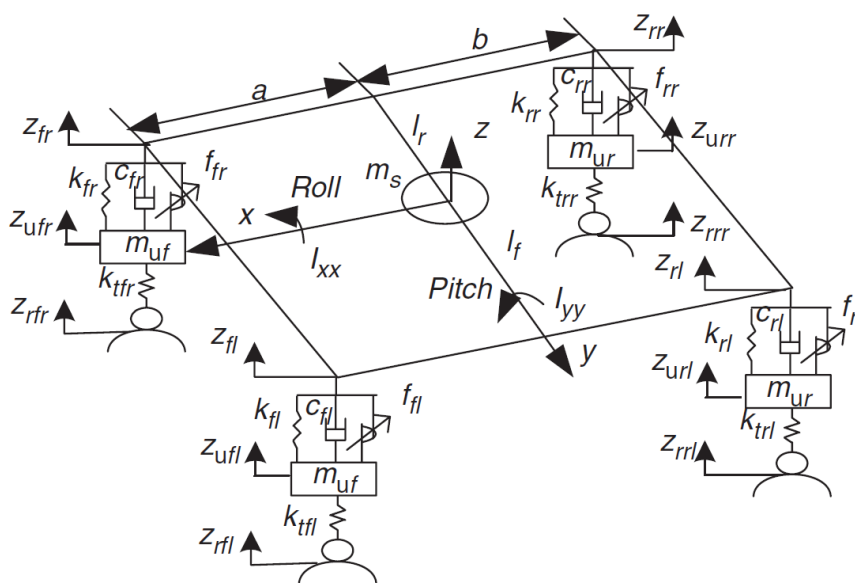
$$X = (x_1 \quad x_2 \quad \dot{x}_1 \quad \dot{x}_2)^T \quad (5-4)$$

و  $G$  به صورت زیر است :

$$G = (1 \quad 1 \quad 2 \quad 2)^T \quad (6-4)$$

#### ۴-۲- مدل کامل خودرو

به منظور بررسی اثر کنترل نیمه فعال در پایداری سیستم تعلیق خودرو ابتدا باید مدلی از سیستم تعلیق ارائه شود، در اینجا مدل دینامیکی کامل خودرو که به دمپر MR مجهز شده است ایجاد شده و در شکل (۴-۱) قابل ملاحظه است. همانطور که در شکل دیده میشود برای مدل خودرو حرکت‌های عمودی، رول و پیچ در نظر گرفته شده است.



شکل (۴-۱) مدل کامل خودرو

با توجه به دینامیک مدل در شکل (۴-۱) معادلات حرکت کامل خودرو در پیوست (7) ارائه شده اند.

برای یک خودروی چهار سرنشین معمولی مقادیر عددی هر یک از پارامترهای مدل خودرو در جدول (۴-۱) آورده شده است (جدول از مقاله یو<sup>۱</sup> برداشت شده است).

جدول (۴-۱) پارامترهای شبیه سازی برای مدل نمونه خودرو

Parameter	Value	Parameter	Value
$m_s$ (Kg)	745.2	$b$ (m)	1.2319
$m_{uf}$ (Kg)	25.35	$l_f$ (m)	0.6490
$m_{ur}$ (Kg)	34.4	$l_r$ (m)	0.6280
$I_{xx}$ (Kgm <sup>2</sup> )	375.2	$K_{sf}$ (N/m)	17,000
$I_{yy}$ (Kgm <sup>2</sup> )	768.8	$K_{sr}$ (N/m)	22,000
$a$ (m)	1.1161	$K_t$ (N/m)	200,000
$C_{sf}$ (N.S/m)	1200	$C_{sr}$ (N.S/m)	1200

#### ۴-۲-۱ ایجاد مدل simulink برای مدل کامل خودرو

اکنون معادلات لازم برای تحلیل یک سیستم تعلیق کامل خودرو و مقادیر عددی هر یک از پارامترهای آن را در اختیار داریم. برای انجام فرایند تحلیل سیستم تعلیق نیاز به پیاده سازی مدل در نرم افزار MATLAB داریم. در این قسمت دستگاه معادلات دیفرانسیل مدل خودرو در محیط SIMULINK نرم افزار پیاده سازی میشود.

شکل (پ-۴) (که در پیوست آورده شده است)، مدل ایجاد شده را نشان میدهد. مدل SIMULINK ایجاد شده

داری هفت زیر سیستم<sup>۲</sup> بوده که در ادامه هر یک مورد اشاره قرار میگیرد.

<sup>1</sup> M. Yu et al(2009)

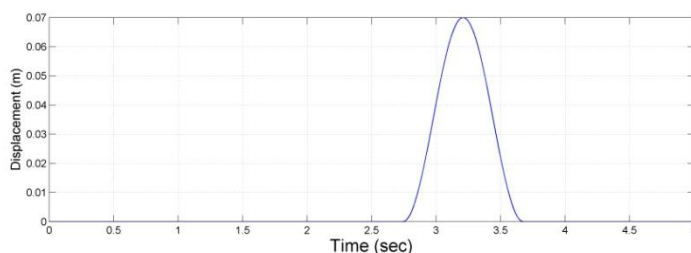
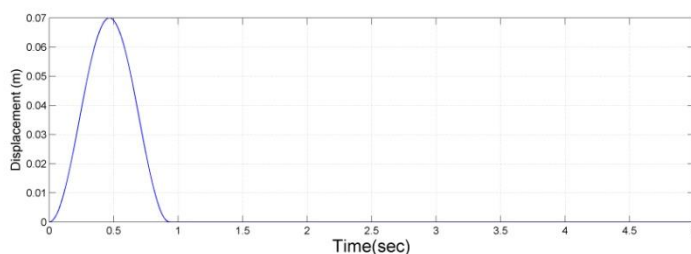
<sup>2</sup> SUBSYSTEM

#### ۴-۲-۱-۱ زیر سیستم CONSTANTS

در این زیر سیستم مقادیر پارامترهای ثابت مدل قرار داده شده است. همانطور که در شکل (پ-۴-۳) دیده میشود این مقادیر، ضرایب سختی فنرها، ضرایب دمپرها، ابعاد مدل و جرم هر یک از اجزای مدل است که با توجه به جدول (۴-۱) در زیر سیستم قرار داده شده است.

#### ۴-۲-۱-۲ زیر سیستم INPUTS

در این زیر سیستم همانگونه که از نام آن نیز مشخص است مقادیر ورودی مدل، یعنی جابجایی هر یک از چرخهای جلو و عقب ( $Z_{r1}, Z_{r2}, Z_{r3}, Z_{r4}$ ) به مدل اعمال میشود (شکل (پ-۴-۴)). این جابجاییها با این فرض محاسبه میشوند که خودرو با سرعت  $0.856 \text{ m/s}$  در حال عبور از روی دست اندازی به ارتفاع  $0.07 \text{ m}$  و عرض  $0.8 \text{ m}$  است. جابجایی چرخهای جلو و عقب در شکل (۴-۵) دیده میشود.



شکل (۴-۵) جابجایی ورودی به چرخهای جلو و عقب در اثر عبور از دست انداز

#### ۴-۲-۱-۳ زیر سیستمهای (۲و۳و۴)

این چهار زیر سیستم که در شکلهای (پ-۴-۶) و (پ-۴-۷) و (پ-۴-۸) و (پ-۴-۹) دیده میشوند برای دسته بندی و مرتب کردن معادلات مدل جهت ورود به زیرسیستم INTEGRATOR طراحی شده اند.

#### ۳-۱-۲-۴ زیر سیستم INTEGRATOR

همانطور که از اسم این زیر سیستم نیز مشخص است، بخش انتگرال گیر و هسته اصلی مدل در این زیر سیستم قرار دارد. در این قسمت به طوری که در شکل (پ-۴-۱۰) دیده میشود پس از انتگرال گیری از مقادیر ورودی، خروجی های مدل یعنی مقدار جابجایی عمودی، رول و پیچ مدل و همچنین مشتقات آنها نسبت به زمان به دست می آید.

#### ۳-۴ ایجاد مدل SIMULINK برای کنترلرها

تا اینجا مدل مربوط به سیستم تعلیق کامل خودرو در حالت غیر فعال در محیط SIMULINK نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده است. در ادامه کنترلرهای نیمه فعال متفاوت روی این مدل پیاده سازی میشود تا کارایی هر کدام از آنها مورد بررسی قرار گیرد.

#### ۱-۳-۴ کنترل به روش گیره فضایی

معادله مربوط به این روش کنترل به صورت رابطه (۴-۱) می باشد. شکل (پ-۴-۱۱) مدل کامل خودرو را نشان میدهد که با این روش کنترل میشود. تنها تفاوت این مدل با مدل کامل خودرو که پیشتر ارائه شد در زیر سیستم اضافه شده controller می باشد. این زیر سیستم اثر کنترل نیمه فعال به روش گیره فضایی را به مدل می افزاید. شکل (پ-۴-۱۲) جزئیات زیر سیستم Controller که با این روش کار میکند را نشان میدهد.



#### ۴-۳-۲ کنترل به روش گیره فضایی روشن-خاموش<sup>۱</sup>

رابطه مربوط به این کنترلر قبلا در رابطه (۴-۲) بیان شده است. در این قسمت زیر سیستم مربوط به این کنترلر به سیستم تعلیق خودرو اضافه میشود. شکل (پ-۴-۱۳) مدل SIMULINK سیستم تعلیق کامل خودرو را نشان میدهد که به این کنترلر مجهز شده است. در اینجا نیز مثل حالت قبل تنها تفاوت مدل با مدل حالت غیر فعال در زیر سیستم اضافه شده Controller میباشد. این زیر سیستم همانطور که در شکل (پ-۴-۱۴) دیده میشود، استراتژی کنترل گیره فضایی روشن-خاموش را به مدل اعمال میکند.

#### ۴-۳-۳ کنترل به روش مد لغزنده<sup>۲</sup>

روابط مربوط به این کنترلر در معادلات (۴-۳) تا (۴-۶) بیان شد. شکل (پ-۴-۱۵) مدل کامل خودرو مجهز شده به این کنترلر را نشان میدهد. جزئیات مربوط به زیر سیستم CONTROLLER که با این استراتژی کنترلی کار میکند نیز در شکل (پ-۴-۱۶) قابل ملاحظه است.

#### ۴-۴ مقایسه کارایی استراتژی های کنترل نیمه فعال

اکنون نوبت به تحلیل رفتار سیستم تعلیق خودرو با توجه به کاربرد هر یک از سه نوع کنترلر نیمه فعال و حالت کنترل غیر فعال رسیده است. بدین منظور همانطور که قبلا هم بیان شد فرض میکنیم خودرو با سرعت 0.856 m/s از روی دست اندازی به ارتفاع 0.07m و عرض 0.8 m عبور میکند. با اجرای مدل‌های SIMULINK ایجاد شده برای هر یک از حالت‌های کنترل، پاسخ سیستم یعنی نمودارهای جابجایی مرکز جرم، شتاب مرکز جرم، نیروی اعمالی از طرف هر کدام از کنترلرها و میزان تغییر شکل لاستیکهای جلو و عقب را به دست می آوریم.

---

<sup>1</sup> Sky-hook On-Off

<sup>2</sup> Sliding mode control

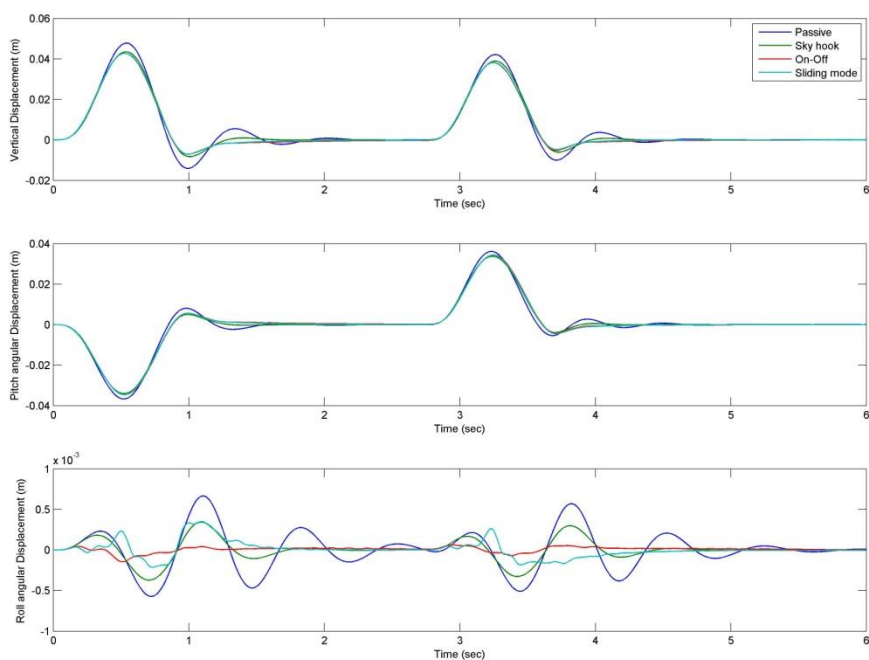
شکل (۴-۱۷) نمودار جابجایی مرکز جرم خودرو را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشخص است بیشترین جابجایی مربوط به حالت غیر فعال می‌باشد. سایر استراتژی‌های کنترل تقریباً یک خروجی واحدی را برای جابجایی مرکز جرم از خود نشان می‌دهند به جز در مورد مقدار جابجایی زاویه ای رول<sup>۱</sup> که در این مورد استراتژی کنترل گیره فضایی روشن-خاموش نسبت به بقیه عملکرد بهتری را نشان می‌دهد.

شکل‌های (۴-۱۸) و (۴-۱۹) و (۴-۲۰) و (۴-۲۱) شتاب مرکز جرم را به ترتیب در حالت کنترل غیر فعال، کنترلر گیره فضایی، کنترلر گیره فضایی روشن-خاموش و کنترل به روش مد لغزنده را نشان می‌دهد. با مقایسه این چهار نمودار می‌بینیم که در مورد کنترلر به روش گیره فضایی نسبت به سیستم غیر فعال نوسانات شتاب مرکز جرم کاهش یافته، همچنین مقادیر بیشینه شتاب نیز کاهش می‌یابد. اما در مورد دو کنترلر با روش‌های گیره فضایی روشن-خاموش و مد لغزنده به خاطر ویژگی این دو کنترلر در قطع و وصل دائمی جریان دمپر، نوسانات شتاب مرکز جرم نسبت به حالت پس‌پس افزایش می‌یابد.

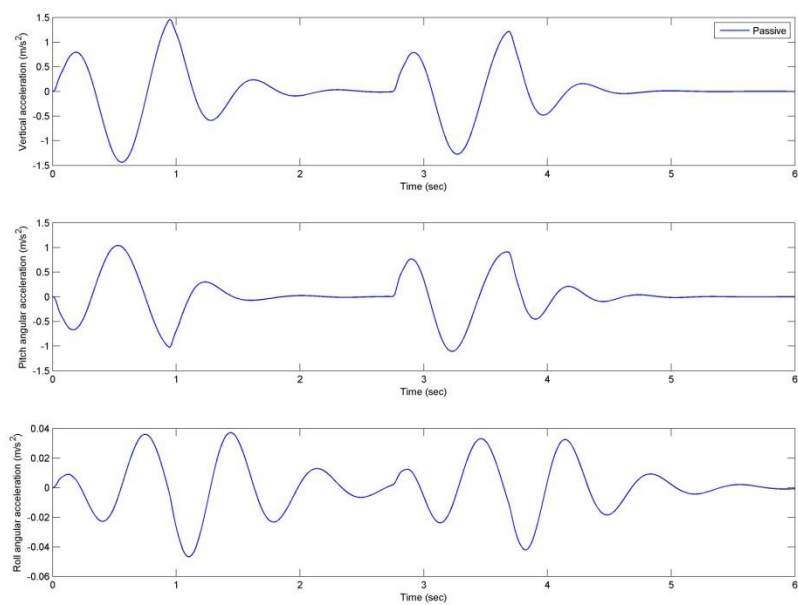
شکل‌های (۴-۲۲) و (۴-۲۳) و (۴-۲۴) به ترتیب نیروی خروجی کنترلر گیره فضایی و گیره فضایی روشن-خاموش و مد لغزنده را نشان می‌دهند. همانطور که در شکل (۴-۲۲) دیده می‌شود نیروی اعمالی کنترلر گیره فضایی در مقایسه با کنترلرهای گیره فضایی روشن-خاموش و مد لغزنده (شکل‌های (۴-۲۳) و (۴-۲۴)) از نوسانات کمتری برخوردار است و از این نظر نسبت به دو کنترلر دیگر برتری دارد. شکل (۴-۲۵) مقدار تغییر شکل لاستیک‌های جلو عقب را نشان می‌دهد. با توجه به شکل در حالت کنترل غیر فعال بیشترین تغییر شکل در لاستیک ایجاد می‌شود و کنترلر گیره فضایی کمترین تغییر شکل را در لاستیک ایجاد می‌کند.

---

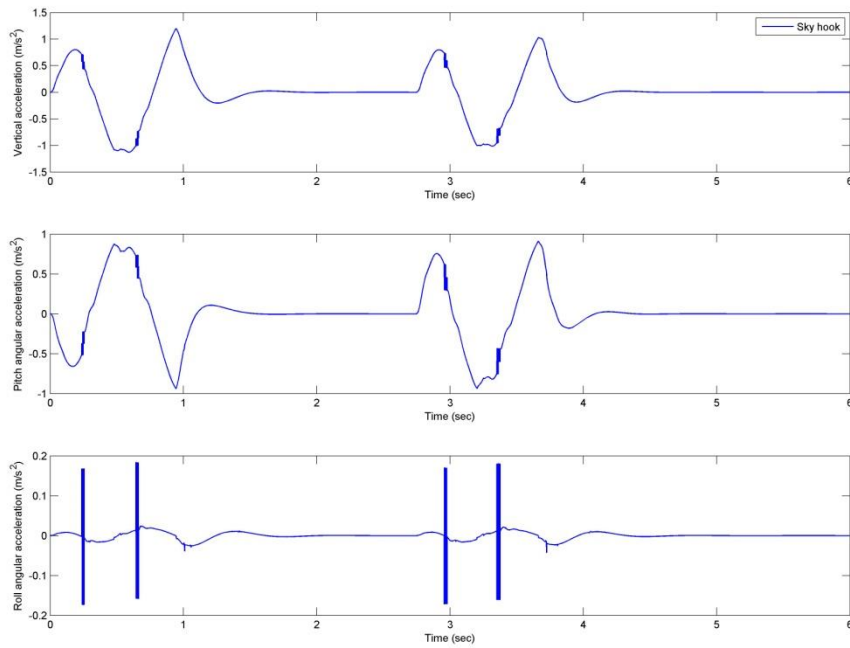
<sup>۱</sup>Roll angular displacement



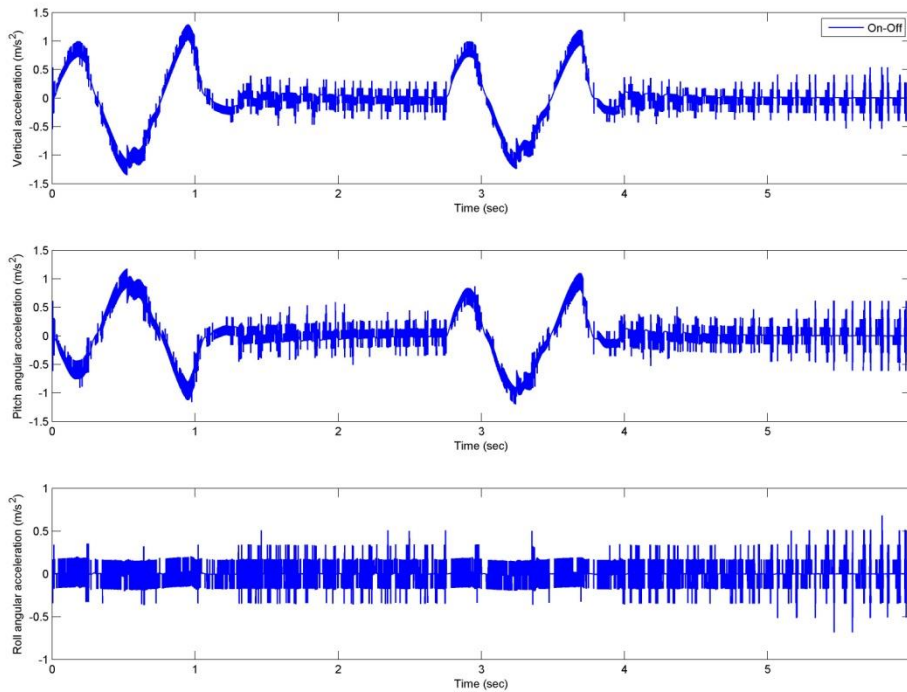
شکل (۴-۱۷) جابجایی های مرکز جرم



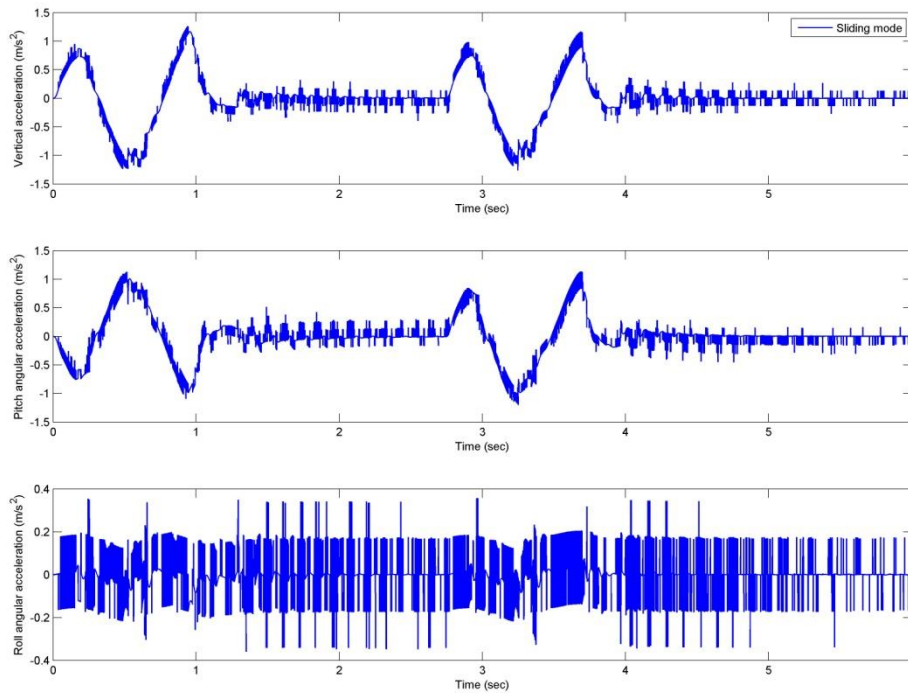
شکل (۴-۱۸) شتاب مرکز جرم برای حالت پسیو



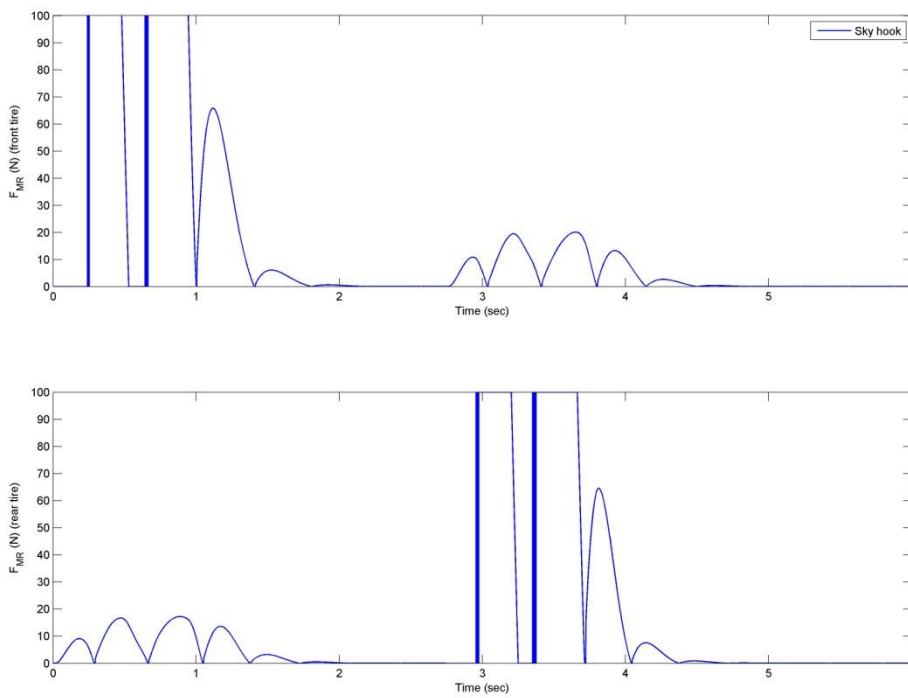
شکل (۴-۱۹) شتاب مرکز جرم با کنترلر skyhook



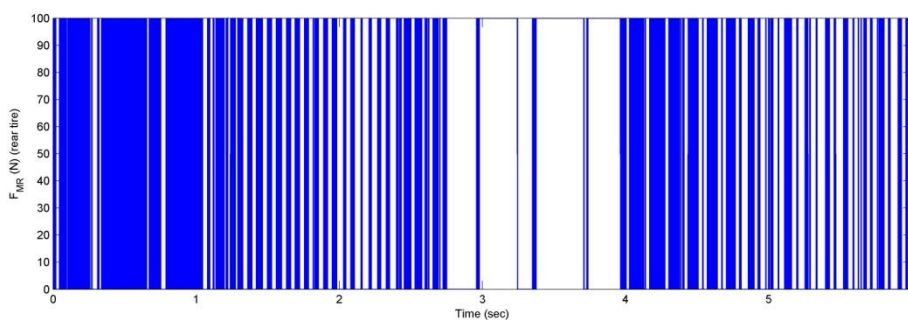
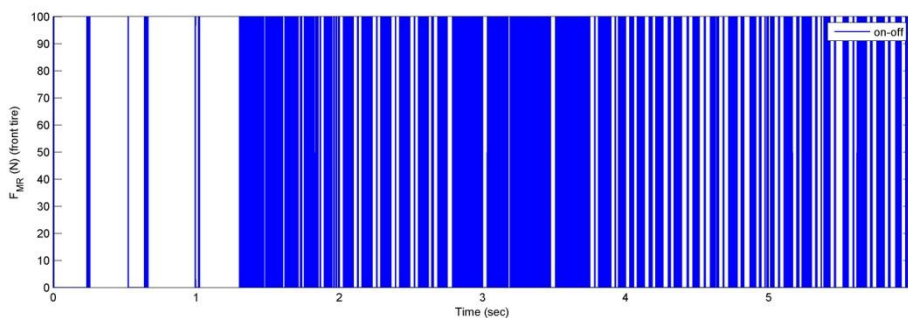
شکل (۴-۲۰) شتاب مرکز جرم با کنترلر on-off



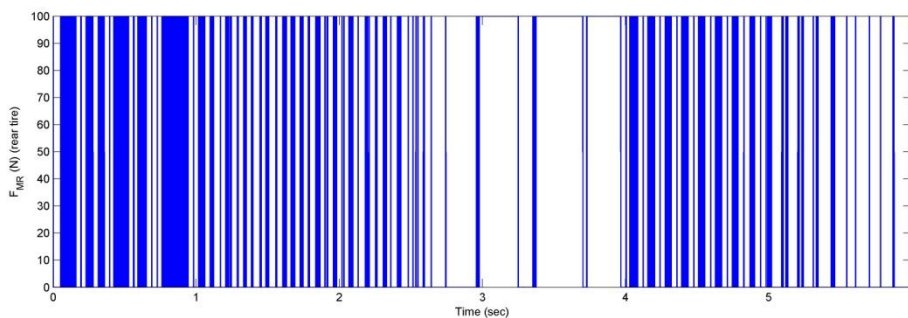
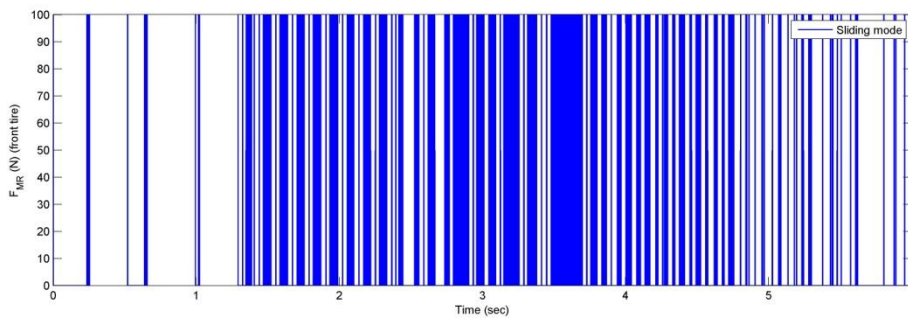
شکل (۴-۲۱) شتاب مرکز جرم با کنترلر Sliding mode



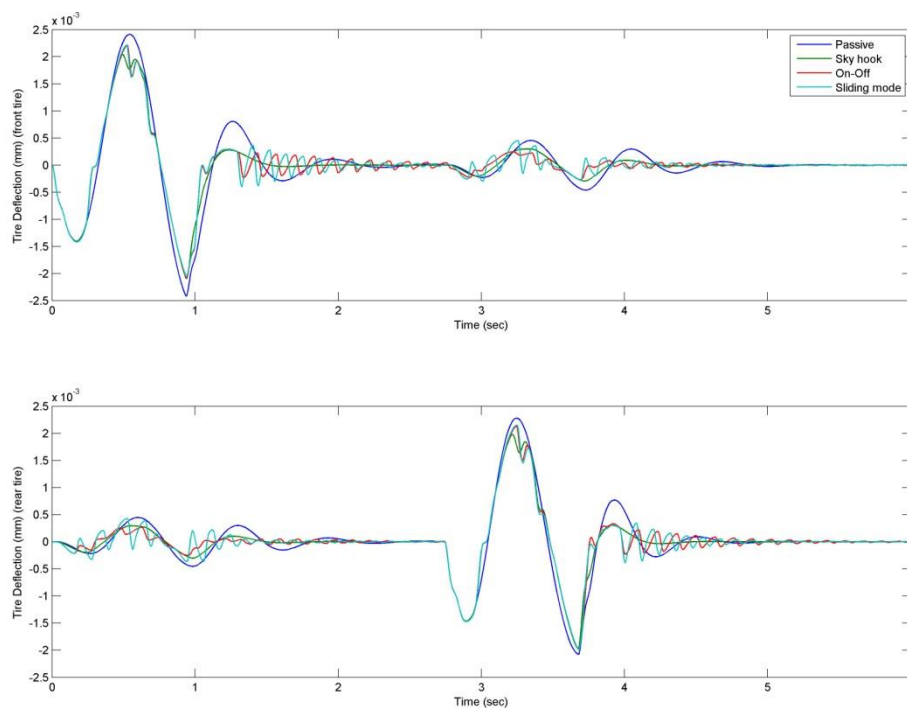
شکل (۴-۲۲) نیروی کنترلر sky-hook برای چرخهای جلو و عقب



شکل (۴-۲۳) نیروی کنترل on-off برای چرخهای جلو و عقب



شکل (۴-۲۴) نیروی کنترل sliding mode برای چرخهای جلو و عقب



شکل (۴-۲۵) تغییر شکل لاستیکهای جلو و عقب

## نتیجه گیری

آنچه در این پایان نامه صورت گرفت، ابتدائاً شناخت رفتار دمپر MR تحت شرایط کاری مختلف، سپس بررسی مدل‌های ارائه شده برای این نوع دمپر و در نتیجه تلاش در بهبود کارایی مدل‌های ارائه شده و ایجاد مدل‌های جدیدی بود که بتواند تا حد ممکن نقیصه های مدل‌های قبل را برطرف سازد و راهکارهای جدیدی را در مدلسازی رفتار این نوع دمپرها ارائه دهد. بدین منظور فصل‌های اول و دوم شناخت سیالات و دمپرها، مگنتوریولوژیک و همچنین ارائه و بررسی مدل‌های موجود، برای دمپر اختصاص داده شد. در فصل سوم سه مدل جدید برای شبیه سازی دمپر مگنتوریولوژیک ارائه شده. مدل اول از یک تابع پایه سیگموئیدی برای شبیه سازی رفتار دمپر استفاده میکند. مراحل تکمیل این مدل شامل انطباق تابع پارامترهای مدل روی داده های آزمایشگاهی و سپس ایجاد یک تابع چند متغیره از ورودی های تحریک برای هر پارامتر و در انتها جایگذاری توابع به دست آمده در مدل پایه میباشد. مدل ارائه شده از چندین جنبه، نوآوری های منحصر به فردی را ارائه داده که از جمله میتوان به عدم وابستگی یا تداخل هیچ کدام از پارامترهای مدل نسبت به یکدیگر اشاره کرد. از آنجا که به طور مثال با افزایش هر کدام از سه شرط تحریک ویژگی های منحنی نیرو سرعت، مثل شیب پیش از تسلیم و یا نیروی تسلیم، افزایش یا کاهش می یابند این ویژگی مدل موجب صعودی یا نزولی شدن تغییرات پارامترهای مدل شده که این خود، سبب تسهیل در امر مدل سازی میشود.

نکته دیگر اینکه در اینجا از یک تابع سیگموئیدی به عنوان تابع پایه استفاده شد ولی در روش ارائه شده هیچ اجباری به استفاده ی مطلق از این تابع نیست و هر تابع دیگری که بتواند تطبیق خوبی با نمودارهای نیرو-سرعت دمپر داشته باشد میتواند مورد استفاده قرار گیرد، چرا که مراحل بعدی مدلسازی مستقل از نوع تابع پایه انتخاب شده میباشد. دقت تابع فیت شده بر پارامترهای مدل، مشخص کننده دقت نهایی مدل است، با افزایش دقت، پیچیدگی تابع نیز افزایش خواهد یافت. همچنین مدل ارائه شده مدلی دارای مراحل تکمیل مجزا و با قابلیت انعطاف بالاست. این مدل را با توجه به کلیت آن میتوان برای هر نوع دمپر مگنتوریولوژیک و با هر دقت دلخواه برای مدلسازی مورد استفاده قرار داد. از دیگر ویژگیهای این مدل فقدان پیچیدگی در فرآیند مدل



سازی و دقت نهایی تضمین شده نسبت به مدل‌هایی است که نیاز به بهینه‌سازی پارامترهای مدل در فضای بینهایت دارند، که هم کاری وقت گیر بوده و هم دقت نهایی مدل تضمین شده نخواهد بود.

در ادامه مدل جدید دیگری ارائه شد. این مدل همانند مدل قبلی بود ولی با این تفاوت که از تابع پایه خطی بجای تابع پایه سیگموئیدی استفاده میکرد. مزیت استفاده از تابع پایه خطی، ساده تر شدن توابع منطبق شده روی نقاط آزمایشگاهی برای هر یک از پارامترهای مدل است. در مدل قبلی هر یک از پارامترهای مدل از طریق رابطه‌های نسبتاً طولانی و متفاوتی از نظر نوع تابع با شرایط تحریک مرتبط میشدند ولی در این مدل با ساده سازی ایجاد شده، توابع مربوط به هر کدام از پارامترهای مدل اکثراً به صورت توابع چند جمله‌ای ارائه شدند. تنها مزیت مدل قبلی نسبت به این مدل این است که توابع خطی نمیتوانند در سرعت‌های نزدیک به سرعت شکست منحنی هیستریزس نمودار نیرو-سرعت را پوشش دهند، اما با توجه به کوچک بودن این ناحیه، مدل نهایی اختلاف جزئی با نمودارهای آزمایشگاهی از خود نشان میدهد.

مدل دیگری که در فصل سوم ارائه شد، مدل شبکه عصبی بود. این مدل به کمک سه شبکه عصبی MLP مجزا که هر کدام داری سه لایه بودند با داده‌های آزمایشگاهی مورد آموزش قرار گرفت. همانطور که قبلاً نیز توضیح داده شد در دو مدل اول ارائه شده برای شبیه سازی رفتار دمپر MR برای تکمیل مدل از توابع سیگموئیدی و خطی استفاده کردیم که در آنها پارامترهای مدل می باید به گونه‌ای انتخاب میشدند که شکل نهایی مدل میتواند تقریب خوبی از رفتار نهایی مدل را ارائه دهد. این فرآیند انتخاب مدل پایه و سپس تعیین پارامترهای مدل و در ادامه به دست آوردن تابع تغییر هر یک از این پارامترها فرآیندی طولانی را ایجاد میکند. برای ایجاد سادگی بیشتر در فرآیند مدل سازی رفتار دمپر مگنتوریولوژیک میتوان از شبکه‌های عصبی به عنوان مدل پایه استفاده کرد. با استفاده از شبکه‌های عصبی برای تابع پایه در واقع ما یک تابع کاملاً انعطاف پذیر خواهیم داشت که به خوبی میتواند داده‌های آزمایشگاهی را تقریب بزند. اما مشکلی که پیش روی این گونه مدل سازی است این است که کمیت نمودارهای آزمایشگاهی نباید از یک میزانی کمتر باشد. در واقع همانطور که قبلاً اشاره شد؛ داده‌های آزمایشگاهی مورد نیاز، سه نمودار نیرو-سرعت دمپر هستند که در هر کدام از آنها دوتا از شرایط تحریک ثابت و یکی متغیر میباشد. اگر میخواهیم که شبیه سازی با شبکه‌های عصبی به نتیجه مطلوب

برسد نباید گام تغییر شرط تحریک متغیر خیلی بزرگ انتخاب شده باشد. چرا که با این کار فاصله بین نمودارهای آزمایشگاهی زیاد شده و شانس شبکه برای میان یابی صحیح نمودارها ی آزمایشگاهی کاهش میابد. این موضوع به علاوه سرعت کمتر شبیه سازی نسبت به دو مدل دیگر از معایب مدل شبکه عصبی میباشد که در برابر مزایای بیان شده برای آن قرار میگیرد.

فصل آخر این پایان نامه مربوط به بررسی عملکرد دمپر در کنترل نیمه فعال ارتعاش سیستم تعلیق خودرو بوده و همچنین در کنار این کار مقایسه ای نیز بین استراتژیهای کنترلی نیمه فعال پر کاربرد صورت گرفته است. به طور خلاصه آنچه در این فصل انجام گرفت در ابتدا ارائه استراتژی های کنترلی نیمه فعال پر کاربرد (گیره فضایی، گیره فضایی روشن-خاموش و مد لغزنده) و سپس ایجاد یک مدل کامل خودرو و در نهایت بررسی عملکرد سیستم کنترلی نیمه فعال نسبت به کنترل غیر فعال و در انتها مقایسه ای بین عملکرد استراتژی های کنترلی مختلف بود. به عنوان نتیجه کارهای صورت گرفته میتوان گفت که استراتژی کنترل گیره فضایی هم از نظر کاهش بیشینه شتاب مرکز جرم و هم از نظر نیروی اعمالی از طرف کنترلر نسبت به سایر کنترلر ها عملکرد بهتری را از خود نشان داد. همچنین این نوع کنترلر نیمه فعال در کاهش بیشینه جابجایی مرکز جرم و کاهش نوسانات جابجایی مرکز جرم نیز عملکرد قابل قبولی را از خود نشان داده است. در مورد تغییر شکل لاستیک های جلو و عقب نیز کنترلر گیره فضایی نسبت به سایر کنترلر ها کارایی بیشتری را از خود نشان میدهد. بنابراین در مجموع میتوان این گونه گفت که کنترلر گیره فضایی نسبت به حالت کنترل غیر فعال و نسبت به کنترلرهای نیمه فعال گیره فضایی روشن-خاموش و مد لغزنده عملکرد بهتری را در کاهش ارتعاشات سیستم تعلیق از خود نشان میدهد.

## پیوستها

### • پیوست (۱)

برنامه نوشته شده برای مدل اسپنسر شامل یک برنامه اصلی و چهار زیر تابع است که به طور جداگانه نوشته شده و در برنامه اصلی مورد استفاده قرار میگیرد.

بدنه اصلی برنامه به صورت زیر نوشته میشود :

```
% *****  
%      **** Spenser MR damper model simulator ****  
% *****  
  
clc  
clear all  
  
%      ***** Parameters *****  
  
starttime=clock;  
  
V=1.5;  
  
c0A= 21;      c0B= 3.5;  
c1A= 283;     c1B= 2.95;  
alphaA=140;   alphaB=695;  
k0=46.9;     n=2;          beta=363;  
  
a=1.5; %cm  
w=2.5;%(Hz) ( a and w are amplitude and frequency of damper displacement )  
A=301;      eta=190;  
k1=5;      x0=14.3;      gamma=363 ;  
  
%      ***** Time domain *****  
  
tspan= 0:.001:1 ;  
  
%      ***** Compute vectors alpha , C0 and C1 whit first order filter*****  
  
alpha=@(t) alphaA+alphaB* V*(1-exp(-eta*t));  
c1=@(t) c1A+c1B* V*(1-exp(-eta*t));  
c0=@(t) c0A+c0B* V*(1-exp(-eta*t));  
  
%      ***** Initial conditions of Z and Y ( Z(0) and Y(0) ) *****  
  
ic=[0 0];  
  
%      ***** Solving differential equitions Zdot=0 and Ydot=0 *****  
  
option=odeset('reltol',1e-6,'abstol',[1e-6,1e-6]);
```

```

[t,Q]=ode45('Spenserequ',tspan,ic,option,gamma,c0,c1,alpha,k0,n,beta,A,a,w);
% ***** Get Z and Y values *****
z=Q(:,1);
y=Q(:,2);
% ***** Compute Force (F) *****
F= c1(tspan)'.*ydot(z,y,c0(tspan),c1(tspan),alpha(tspan),k0,t,a,w) + k1*( x(t,a,w)-x0
);
% ***** Plot Force_Time , Force_Displacement and Force_Velocity curves *****
subplot(2,2,1:2)
plot(t,F)
xlabel('time (Sec)');ylabel('Force (N)')
grid on
subplot(2,2,3)
plot(x(t,a,w),F)
xlabel('Displacement (cm)');ylabel('Force (N)')
grid on
subplot(2,2,4)
plot(xdot(t,a,w),F)
xlabel('Velocity (cm/Sec)');
grid on
endtime=clock;
runningtime = etime(endtime,starttime);
disp([' running time = ',num2str(runningtime),' Sec'])

```

چهار زیر تابع برنامه اصلی به صورت زیر هستند :

```
function f=x(t,a,w)
```

```
f=a*sin(2*pi*w*t);
```

```
function f=xdot(t,a,w)
```

```
f=a*2*pi*w*cos(2*pi*w*t);
```

```
function f=ydot(z,y,c0,c1,alpha,k0,t,a,w)
```

```
f= (1./(c0+c1))' .* ( alpha' .*z +c0' .*xdot(t,a,w)+ k0*( x(t,a,w)-y ) );
```

```
function f=Spenserequ(t,Q,dummy,gamma,c0,c1,alpha,k0,n,beta,A,a,w)
```

```
***** Q(1)=z and Q(2)=y *****
```

```
f = [ -gamma * abs( xdot(t,a,w) -
    ydot(Q(1),Q(2),c0(t),c1(t),alpha(t),k0,t,a,w) ) *Q(1)*abs(Q(1))^(n-1)+...
    ( xdot(t,a,w) - ydot(Q(1),Q(2),c0(t),c1(t),alpha(t),k0,t,a,w) )*( A-...
    beta*abs(Q(1))^n ) ;
    ydot(Q(1),Q(2),c0(t),c1(t),alpha(t),k0,t,a,w); ];
```

• پیوست (۲)

```
function Fd = fcn(Cpre,Cpost,Fyield,xldot)
```

```
% This block supports an embeddable subset of the MATLAB language.
```

```
% See the help menu for details.
```

```
Fd=0;
```

```
x1=Fyield/Cpre;
```

```
if abs(xldot)<= x1 ; Fd =Cpre*xldot ;end;
```

```
if xldot>x1 ; Fd =Cpost*(xldot-x1)+Fyield ;end;
```

```
if xldot<-x1 ; Fd =Cpost*(xldot+x1)-Fyield ;end;
```

## • پیوست (۳)

*frq = 1.5Hz , amp = 6.35mm*

```
----- Currrent (A) -----
curD = [ 0      0.25    0.5     0.75    1      1.25    1.5     ];
-----
Cb_c = [ 0.37    1.739   2.9915  3.885   4.255   4.44    4.514   ];
xdoth_c = [ 0.007392 0.0084  0.01055 0.01176 0.012096 0.012432 0.012768 ];
fy_c = [ 0.07182  0.38178 0.69253 0.8694  0.96012 1.0282  1.0697  ];
K_c = [ 18.72    122.4   216     280.8   309.6   316.8   360     ];
b_c = [ 0      0      0      0      0      0      0      ];
h_c = [ 0      0      0      0      0      0      0      ];
```

*cur = 0.75A , amp = 6.35mm*

```
----- Frequency (Hz) -----
frqD = [ 0.5     1.5     2.5     5      8      11     16     ];
-----
Cb_f = [ 3.96     3.885   2.3141  2.183   1.85    1.702   1.554   ];
xdoth_f = [ 0.004032 0.01176 0.0177  0.046368 0.068544 0.1008  0.17808 ];
fy_f = [ 0.855    0.8694  0.87097 1.0697  1.1567  1.2096  (1.3366) ];
K_f = [ 590.4    280.8   158.17  97.92   69.12   54.72   33.12   ];
b_f = [ 0      0      0.0809  0.12    0.18    0.25    0.4      ];
h_f = [ 0      0      -0.0256 -0.04   -0.08   -0.104  (-0.15) ];
```

*cur = 0.75A , frq = 2.5Hz*

```
----- Amplitude (mm) -----
AmpD = [ 2.54     6.25    12.5    18.75   ];
-----
Cb_a = [ 2.96     2.331   1.7945  1.739   ];
xdoth_a = [ 0.008736 0.017472 0.032256 0.04368 ];
fy_a = [ 0.77112  0.865   1.0735  1.1264  ];
K_a = [ 230.4    158.4   115.2   83.52   ];
b_a = [ 0      0.08    0.12    0.13    ];
```

## • پیوست (۴)

**Neural Network object:**

**architecture:**

*numInputs: 1*

*numLayers: 3*

*biasConnect: [1; 1; 1]*

*inputConnect: [1; 0; 0]*

*layerConnect: [0 0 0; 1 0 0; 0 1 0]*

*outputConnect: [0 0 1]*

*targetConnect: [0 0 1]*

*numOutputs: 1 (read-only)*

*numTargets: 1 (read-only)*

*numInputDelays: 0 (read-only)*

*numLayerDelays: 0 (read-only)*

**subobject structures:**

*inputs: {1x1 cell} of inputs*

*layers: {3x1 cell} of layers*

*outputs: {1x3 cell} containing 1 output*

*targets: {1x3 cell} containing 1 target*

*biases: {3x1 cell} containing 3 biases*

*inputWeights: {3x1 cell} containing 1 input weight*

*layerWeights: {3x3 cell} containing 2 layer weights*

**functions:**

*adaptFcn: 'trains'*

```
gradientFcn: 'calcjx'  
    initFcn: 'initlay'  
    performFcn: 'mse'  
    trainFcn: 'trainlm'
```

parameters:

```
    adaptParam: .passes  
gradientParam: (none)  
    initParam: (none)  
performParam: (none)  
trainParam: .epochs, .goal, .max_fail, .mem_reduc,  
            .min_grad, .mu, .mu_dec, .mu_inc,  
            .mu_max, .show, .time
```

weight and bias values:

```
IW: {3x1 cell} containing 1 input weight matrix  
LW: {3x3 cell} containing 2 layer weight matrices  
b: {3x1 cell} containing 3 bias vectors
```

• پیوست (5)

```
epochs: 100  
goal: 0  
max_fail: 5  
mem_reduc: 1  
min_grad: 1.0000e-010  
mu: 1.0000e-003  
mu_dec: 0.1000  
mu_inc: 10  
mu_max: 1.0000e+010  
show: 25  
time: Inf
```



## • پیوست (6)

```

%%
file='C:\Documents and Settings\msh8248\Desktop\graph\Xia Qing Ma\curl';
%-----
X= imread(file, 'jpg');
Y = flipdim(X,1);
Y = imadjust(Y,[0 0.7],[0.5 1]);

image([-0.089 0.089],[-1.68 1.68],Y)
set(gca, 'YTick',-1.6:.4:1.6)
set(gca, 'XTick',-0.05:0.05:0.05)
xlabel 'Velocity (m/s)';ylabel 'Force (kN)';
clc
F=[];
F_cur=[];
xxdot=[];
for cur=[0.25.5.75 1 1.25 1.5]
    amp = 6.35;
    frq = 1.5;
    amp2=amp/1000;
    i=1;
    time=linspace(0,1/frq,1000);

    xxdot = amp2 * (frq*2*pi) * cos(frq*2*pi*time);
F_amp=sim(net_amp,[xxdot;amp*ones(1,length(xxdot))]);
F_frq=sim(net_frq,[xxdot;frq*ones(1,length(xxdot))]);
F_cur=sim(net_cur,[xxdot;cur*ones(1,length(xxdot))]);
F_amp0=sim(net_amp,[xxdot;6.35*ones(1,length(xxdot))]);
F_cur0=sim(net_cur,[xxdot;0.75*ones(1,length(xxdot))]);
F=(F_amp.*F_cur.*F_frq)./(F_amp0.*F_cur0);
hold on;plot(xxdot,F,'b',-xxdot,-F,'b', 'LineWidth',1.5)

```

```

end

axis xy

%% Amplitude

file='C:\Documents and Settings\msh8248\Desktop\graph\Xia Qing Ma\amp1'; %
<~~1

%-----

X= imread(file, 'jpg');
Y = flipdim(X,1);
Y = imadjust(Y,[0 0.7],[0.5 1]);

image([-0.4 0.4],[-2 2],Y) % Amplitude

set(gca, 'XTick',-0.4:.2:0.4)
set(gca, 'YTick',-2:0.4:2)

xlabel 'Velocity (m/s)';ylabel 'Force (kN)';

clc

F=[];
F_cur=[];
xxdot=[];

for amp=[2.54 6.25 12.5 18.75];
    cur=0.75;

    frq =2.5;

    amp2=amp/1000;

    i=1;

%----- Time Period -----

    time=linspace(0,1/frq,1000);

    xxdot = amp2 * (frq*2*pi) * cos(frq*2*pi*time);
F_amp=sim(net_amp, [xxdot; amp*ones(1,length(xxdot))] );
F_frq=sim(net_frq, [xxdot; frq*ones(1,length(xxdot))] );
F_cur=sim(net_cur, [xxdot; cur*ones(1,length(xxdot))] );
F_amp0=sim(net_amp, [xxdot; 6.35*ones(1,length(xxdot))] );
F_cur0=sim(net_cur, [xxdot; 0.75*ones(1,length(xxdot))] );
F=(F_amp.*F_cur.*F_frq)./(F_amp0.*F_cur0);

hold on;plot(xxdot,F, 'b',-xxdot,-F, 'b', 'LineWidth',1.5)

end

```

```

axis xy
%% Frequency
file='C:\Documents and Settings\msh8248\Desktop\graph\Xia Qing Ma\frq1'; %
<~~1
%-----
X= imread(file, 'jpg');
Y = flipdim(X,1);
Y = imadjust(Y,[0 0.7],[0.5 1]);
image([-0.8 0.8],[-2.4 2.4],Y) % Frequency
set(gca, 'XTick', -0.8:.4:0.8)
set(gca, 'YTick', -2.4:0.8:2.4)
xlabel 'Velocity (m/s)';ylabel 'Force (kN)';
clc
F=[];
F_cur=[];
xxdot=[];
for frq=[.5 1.5 2.5 5 7.5 12.5 15]
    cur=0.75;
    amp = 6.35;
amp2=amp/1000;
    i=1;
%----- Time Period -----
    time=linspace(0,1/frq,1000);
    xxdot = amp2 * (frq*2*pi) * cos(frq*2*pi*time);
    F_amp=sim(net_amp, [xxdot; amp*ones(1, length(xxdot))] );
    F_frq=sim(net_frq, [xxdot; frq*ones(1, length(xxdot))] );
    F_cur=sim(net_cur, [xxdot; cur*ones(1, length(xxdot))] );
    F_amp0=sim(net_amp, [xxdot; 6.35*ones(1, length(xxdot))] );
    F_cur0=sim(net_cur, [xxdot; 0.75*ones(1, length(xxdot))] );
    F=(F_amp.*F_cur.*F_frq)./(F_amp0.*F_cur0);
    hold on;plot(xxdot,F, 'b', -xxdot,-F, 'b', 'LineWidth',1.5)

```

```

end

axis xy

%% comparision(a,b,c)

file='C:\Documents and Settings\msh8248\Desktop\graph\Xia Qing
Ma\Comparision(c)';

%-----
X= imread(file,'jpg');
Y = flipdim(X,1);
Y = imadjust(Y,[0 0.7],[0.5 1]);
image([-0.3 0.3],[-2 2],Y) % (c) sim-exp comparision
% image([-0.149 0.149],[-2 2],Y) % (b) sim-exp comparision
% image([-0.089 0.089],[-2 2],Y) % (a) sim-exp comparision

clc

F=[];
F_cur=[];
xxdot=[];

for cur=[0 0.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5];
    amp = 6.35;
    frq = 5;
amp2=amp/1000;
    i=1;
    %----- Time Period -----
    time=linspace(0,1/frq,1000);
    xxdot = amp2 * (frq*2*pi) * cos(frq*2*pi*time);
    F_amp=sim(net_amp,[xxdot;amp*ones(1,length(xxdot))]);
    F_frq=sim(net_frq,[xxdot;frq*ones(1,length(xxdot))]);
    F_cur=sim(net_cur,[xxdot;cur*ones(1,length(xxdot))]);
    F_amp0=sim(net_amp,[xxdot;6.35*ones(1,length(xxdot))]);
    F_cur0=sim(net_cur,[xxdot;0.75*ones(1,length(xxdot))]);
    F=(F_amp.*F_cur.*F_frq)./ (F_amp0.*F_cur0);hold on;plot(xxdot,F,'b',-xxdot,-
F,'b','LineWidth',1.5)
end

```

## • پیوست (۷)

$$M_s \ddot{z} = -K_{fl}(z_{fl} - z_{ufl}) + u_{fl} - K_{fr}(z_{fr} - z_{ufr}) + u_{fr} \\ - K_{rl}(z_{rl} - z_{url}) + u_{rl} - K_{rr}(z_{rr} - z_{urr}) + u_{rr}$$

$$I_{yy} \ddot{\theta} = K_{fl}(z_{fl} - z_{ufl})a + u_{fl}a + K_{fr}(z_{fr} - z_{ufr})a \\ - u_{fr}a - K_{rl}(z_{rl} - z_{url})b + u_{rl}b \\ - K_{rr}(z_{rr} - z_{urr})b + u_{rr}b$$

$$I_{xx} \ddot{\varphi} = -K_{fl}(z_{fl} - z_{ufl})l_f + u_{fl}l_f + K_{fr}(z_{fr} - z_{ufr})l_r \\ - u_{fr}l_r - K_{rl}(z_{rl} - z_{url})l_f + u_{rl}l_f \\ + K_{rr}(z_{rr} - z_{urr})l_r - u_{rr}l_r$$

$$M_{ufl} \ddot{z}_{ufl} = K_{fl}(z_{fl} - z_{ufl}) - u_{fl} - K_{tfl}(z_{ufl} - z_{rfl})$$

$$M_{ufr} \ddot{z}_{ufr} = K_{fr}(z_{fr} - z_{ufr}) - u_{fr} - K_{tfr}(z_{ufr} - z_{rfr})$$

$$M_{url} \ddot{z}_{url} = K_{rl}(z_{rl} - z_{url}) - u_{rl} - K_{trl}(z_{url} - z_{rrl})$$

$$M_{urr} \ddot{z}_{urr} = K_{rr}(z_{rr} - z_{urr}) - u_{rr} - K_{trr}(z_{urr} - z_{rrr}).$$

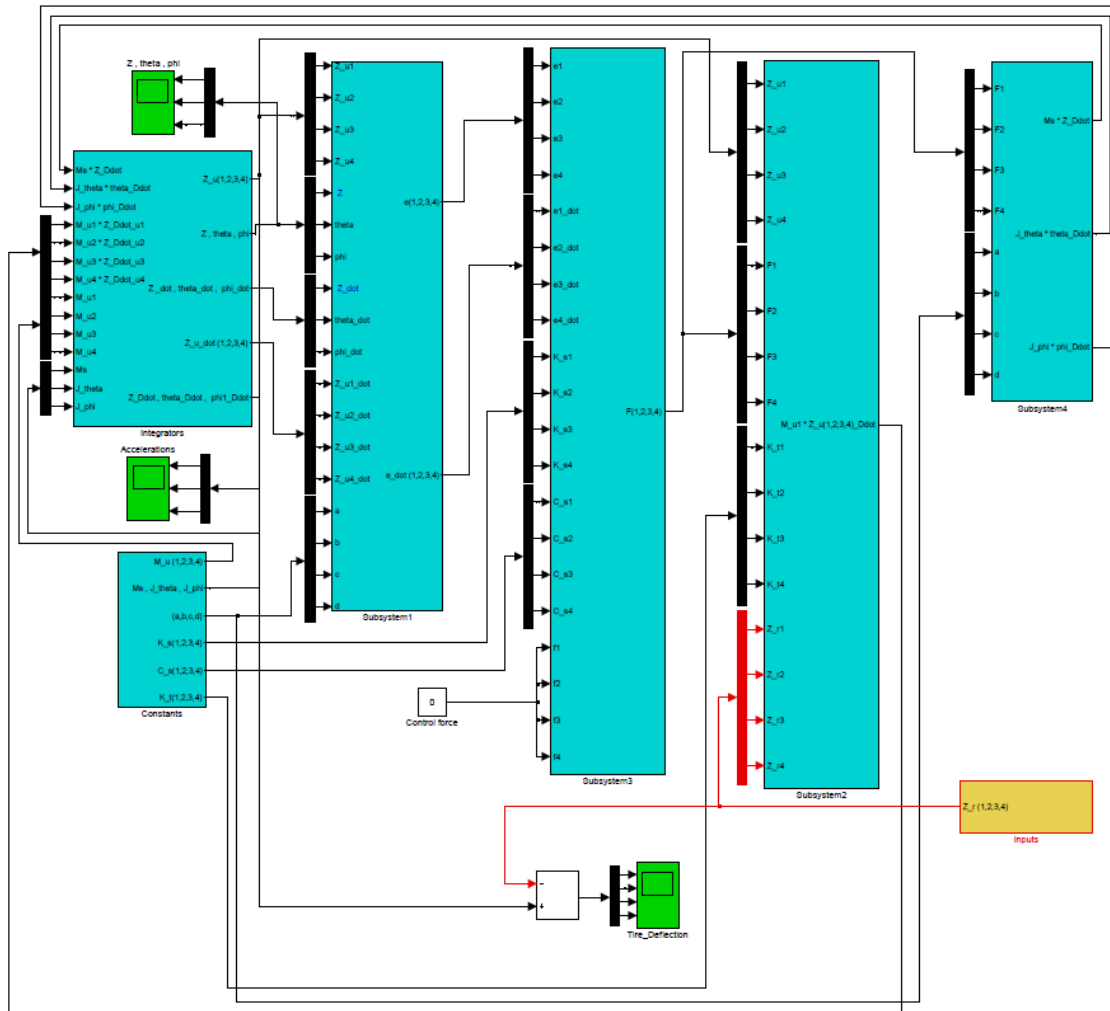
$$u_{fl} = -c_{fl}(\dot{z}_{fl} - \dot{z}_{ufl}) - f_{fl} \text{sign}(\dot{z}_{fl} - \dot{z}_{ufl})$$

$$u_{fr} = -c_{fr}(\dot{z}_{fr} - \dot{z}_{ufr}) - f_{fr} \text{sign}((\dot{z}_{fr} - \dot{z}_{ufr}))$$

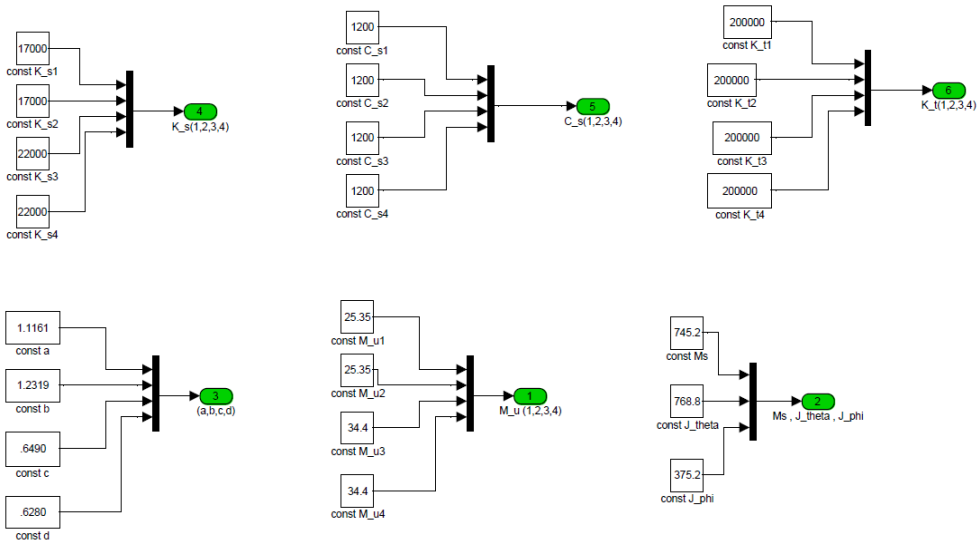
$$u_{rl} = -c_{rl}(\dot{z}_{rl} - \dot{z}_{url}) - f_{rl} \text{sign}(\dot{z}_{rl} - \dot{z}_{url})$$

$$u_{rr} = -c_{rr}(\dot{z}_{rr} - \dot{z}_{urr}) - f_{rr} \text{sign}(\dot{z}_{rr} - \dot{z}_{urr}),$$

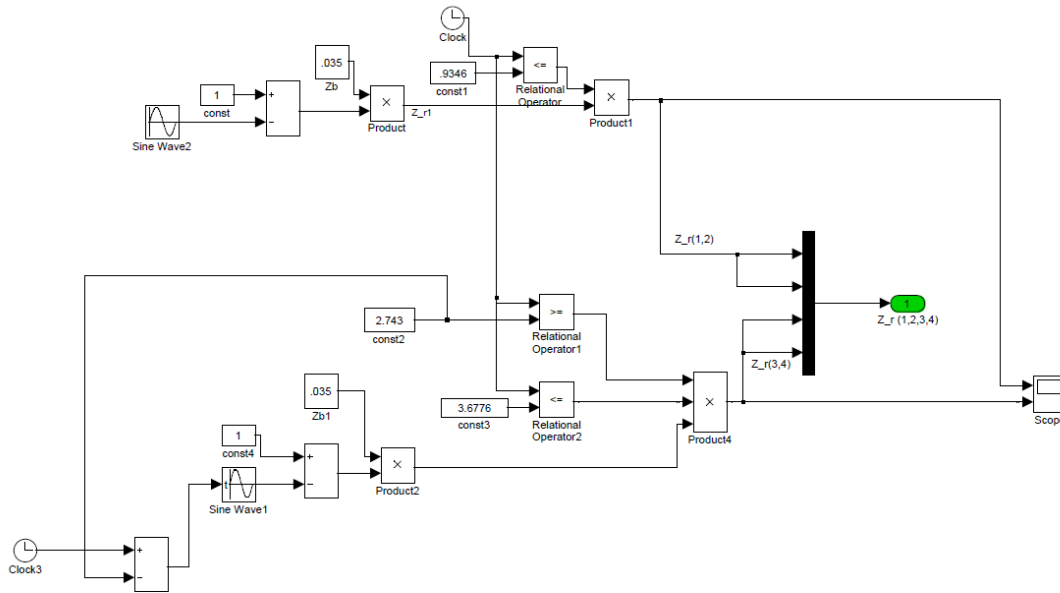
• پیوست شکلها



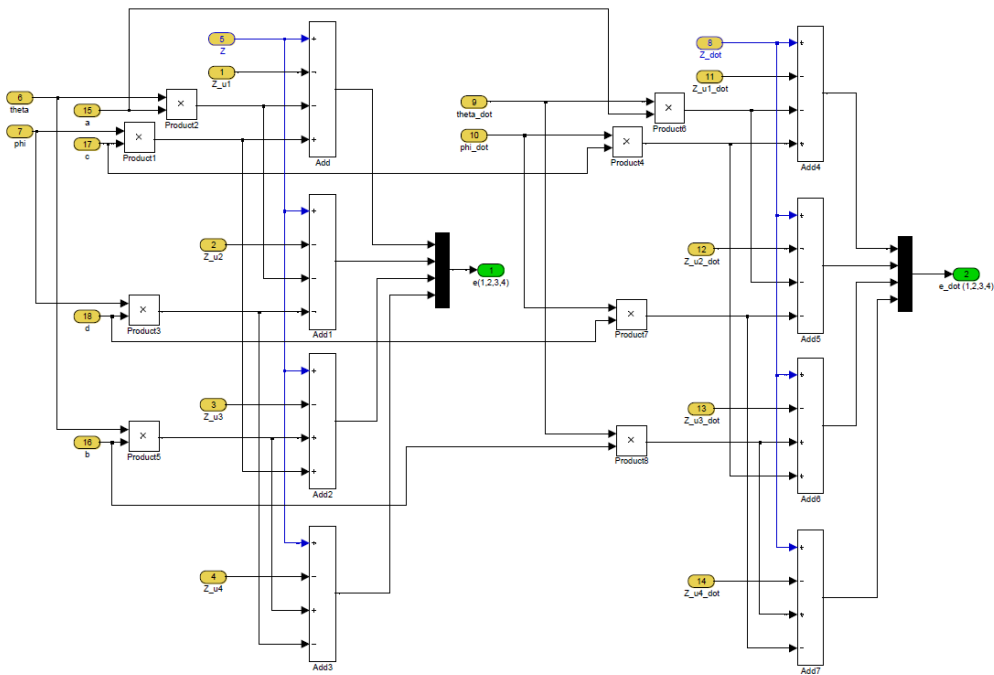
شکل(پ-۴-۲) مدل SIMULINK سیستم تعلیق خودرو در حالت غیر فعال



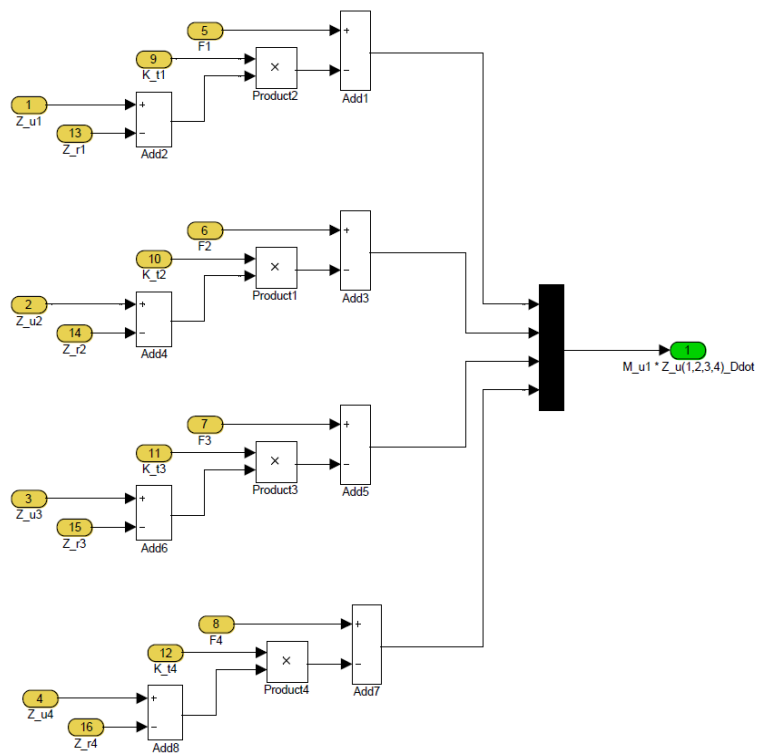
شکل (پ-۴-۳) زیر سیستم CONSTANTS



شکل (پ-۴-۴) زیر سیستم INPUTS

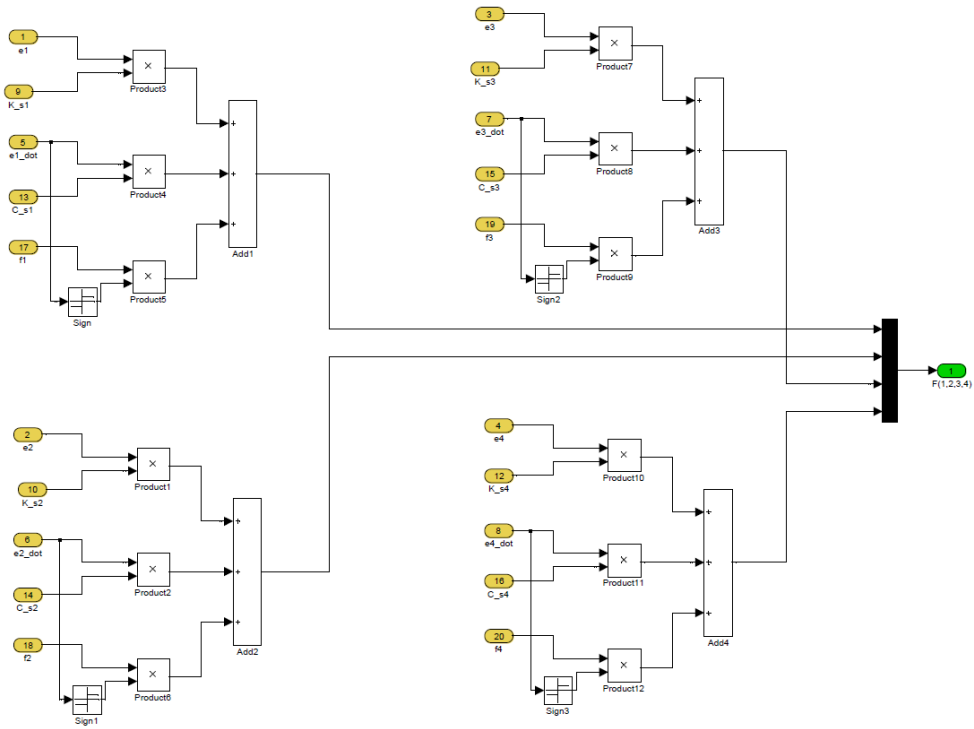


شکل (پ-۴-۶) زیر سیستم (۱)

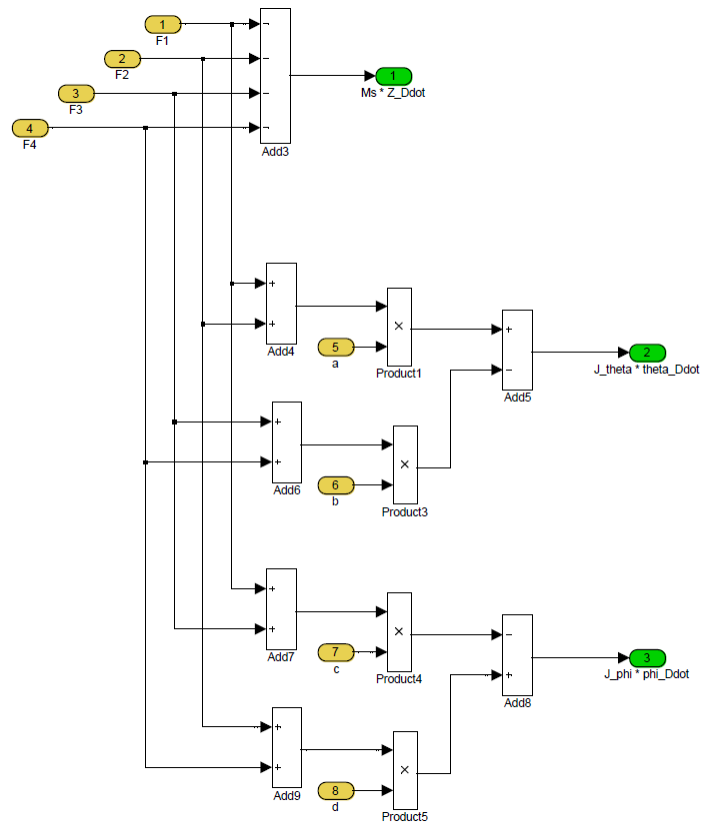




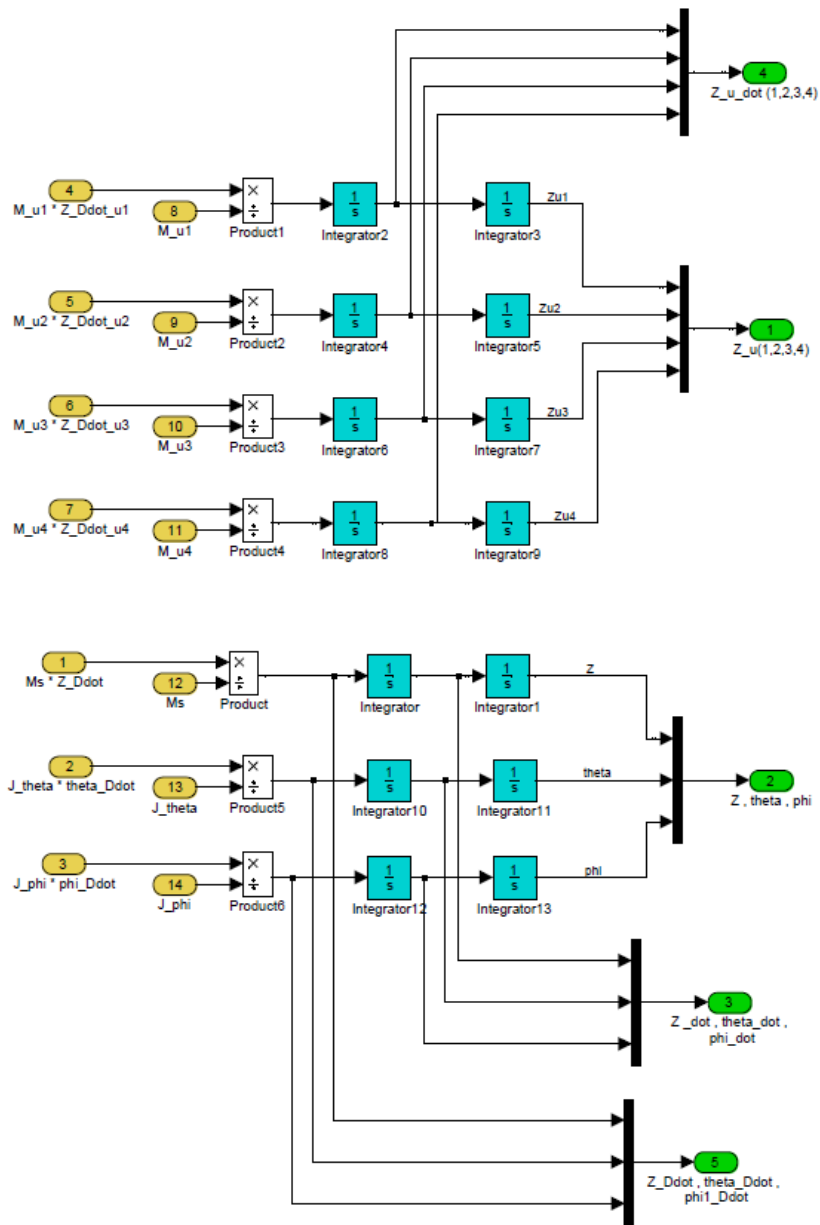
شکل (پ-۴-۷) زیر سیستم (۲)



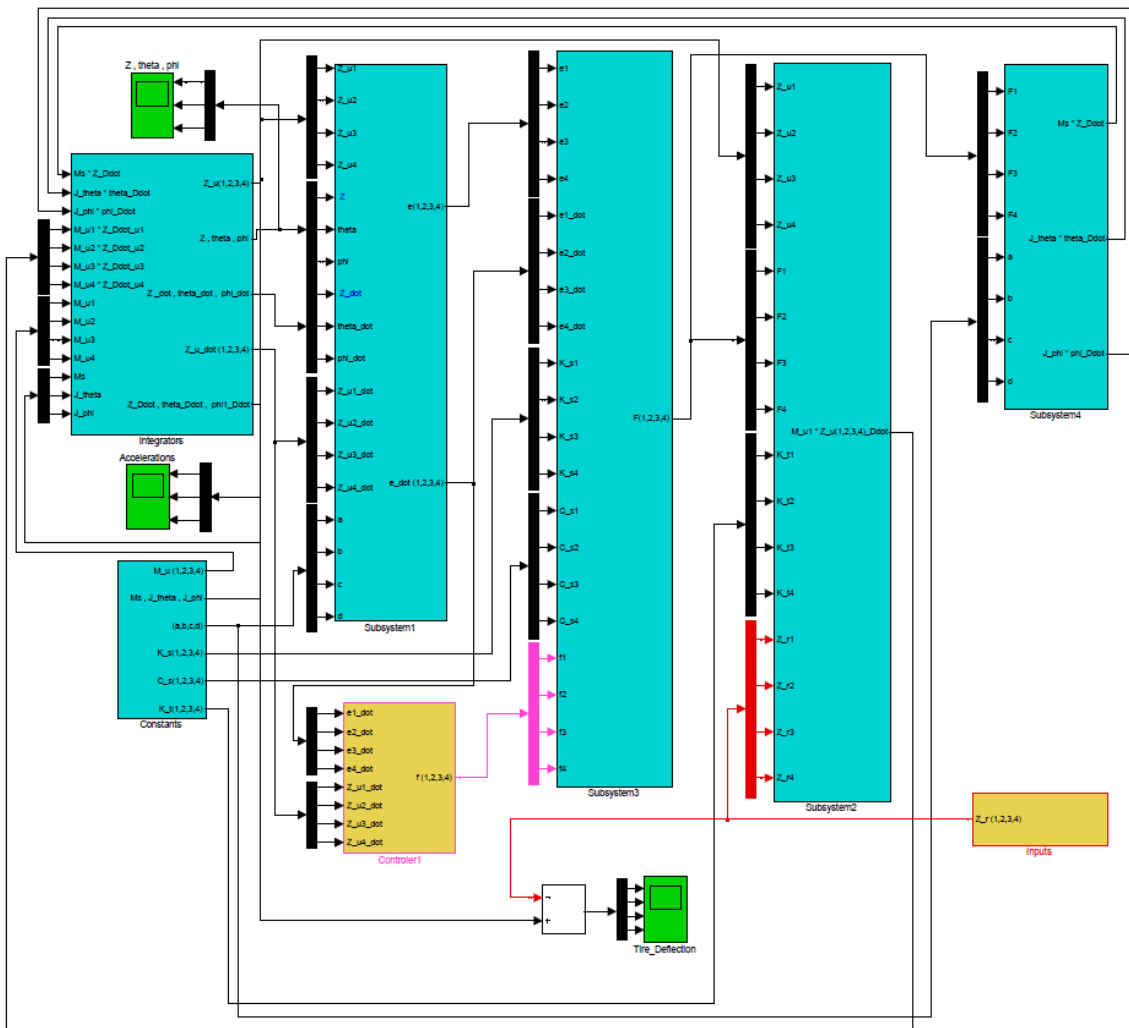
شکل (پ-۴-۸) زیر سیستم (۳)



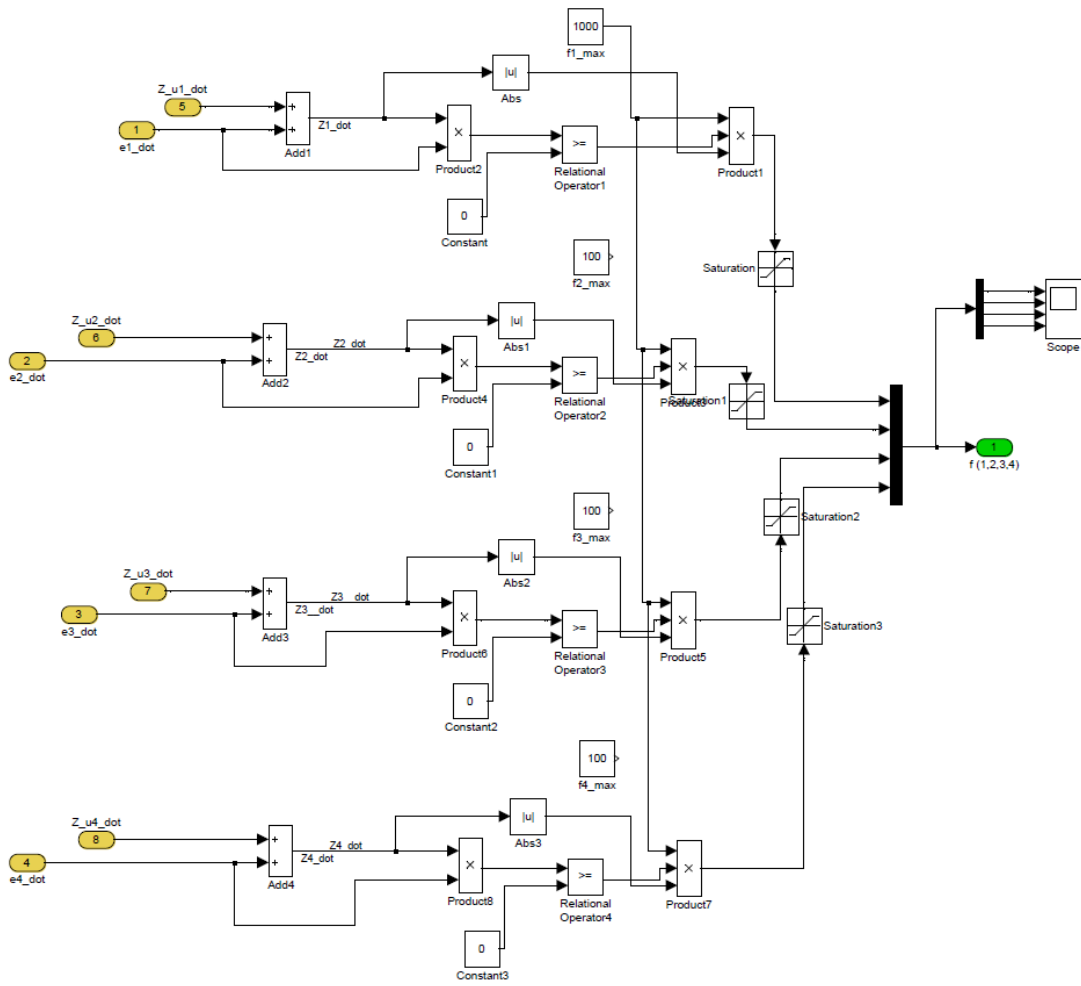
شکل (پ-۴-۹) زیر سیستم (۴)



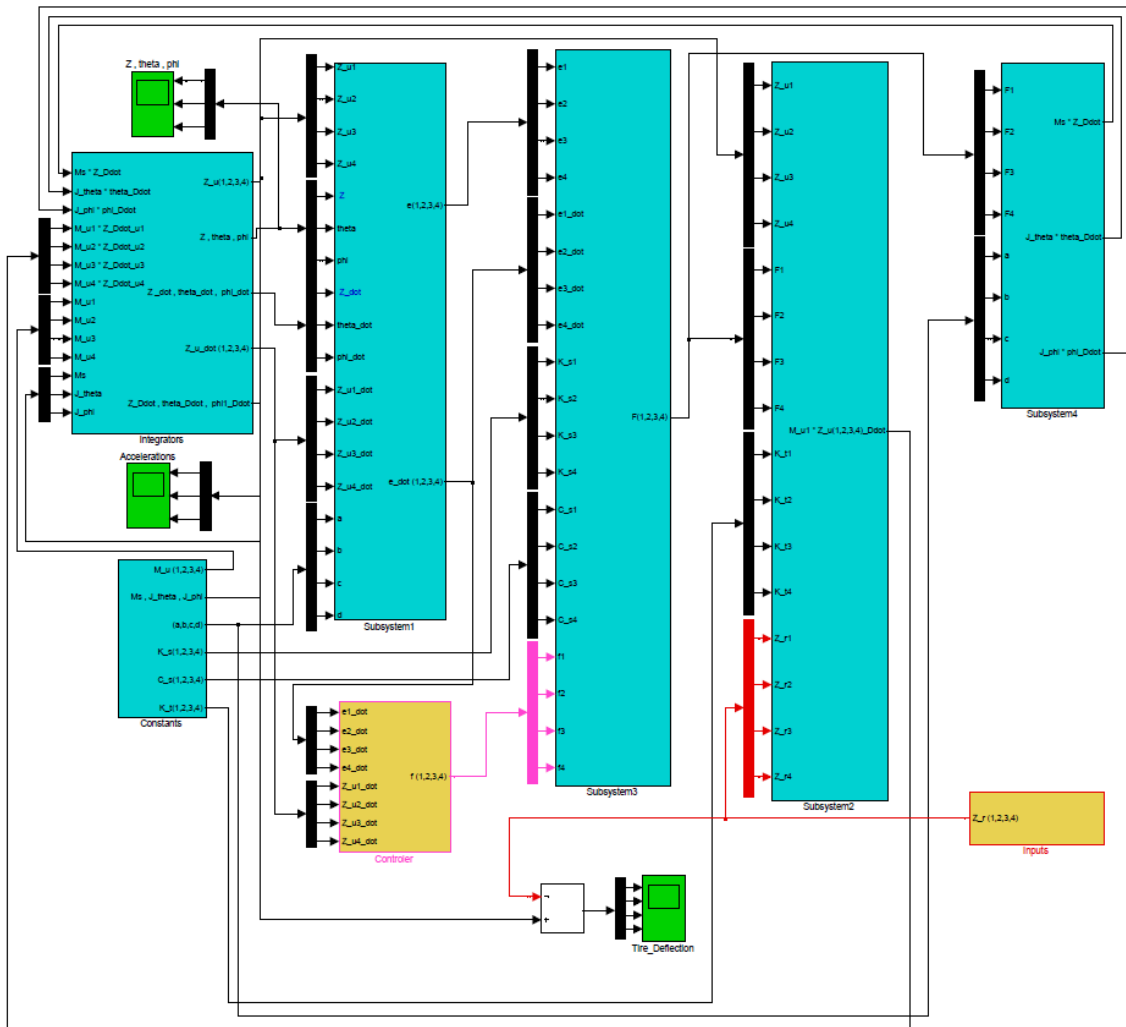
شکل (پ-۴-۱۰) زیر سیستم INTEGRATOR



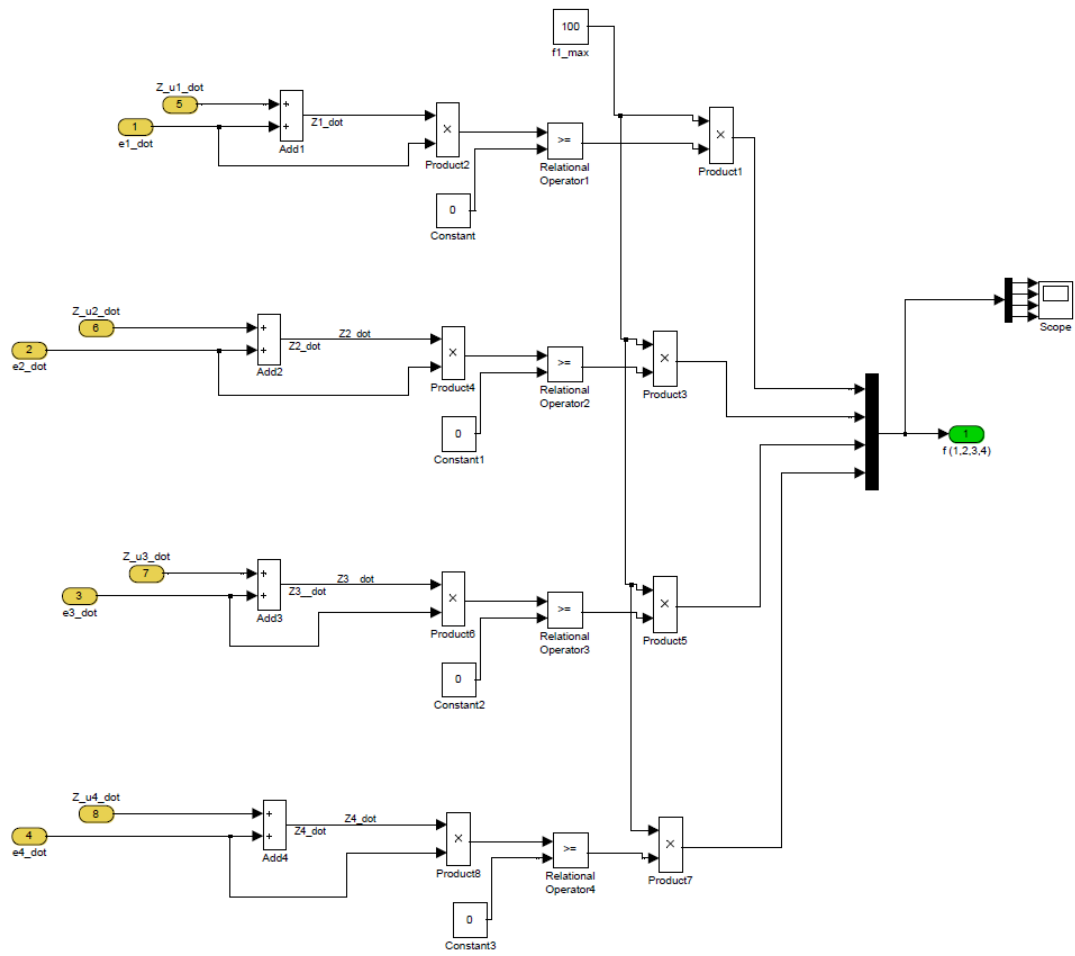
شکل (پ-۴-۱۱) مدل کامل خودرو با کنترلر گیره فضایی



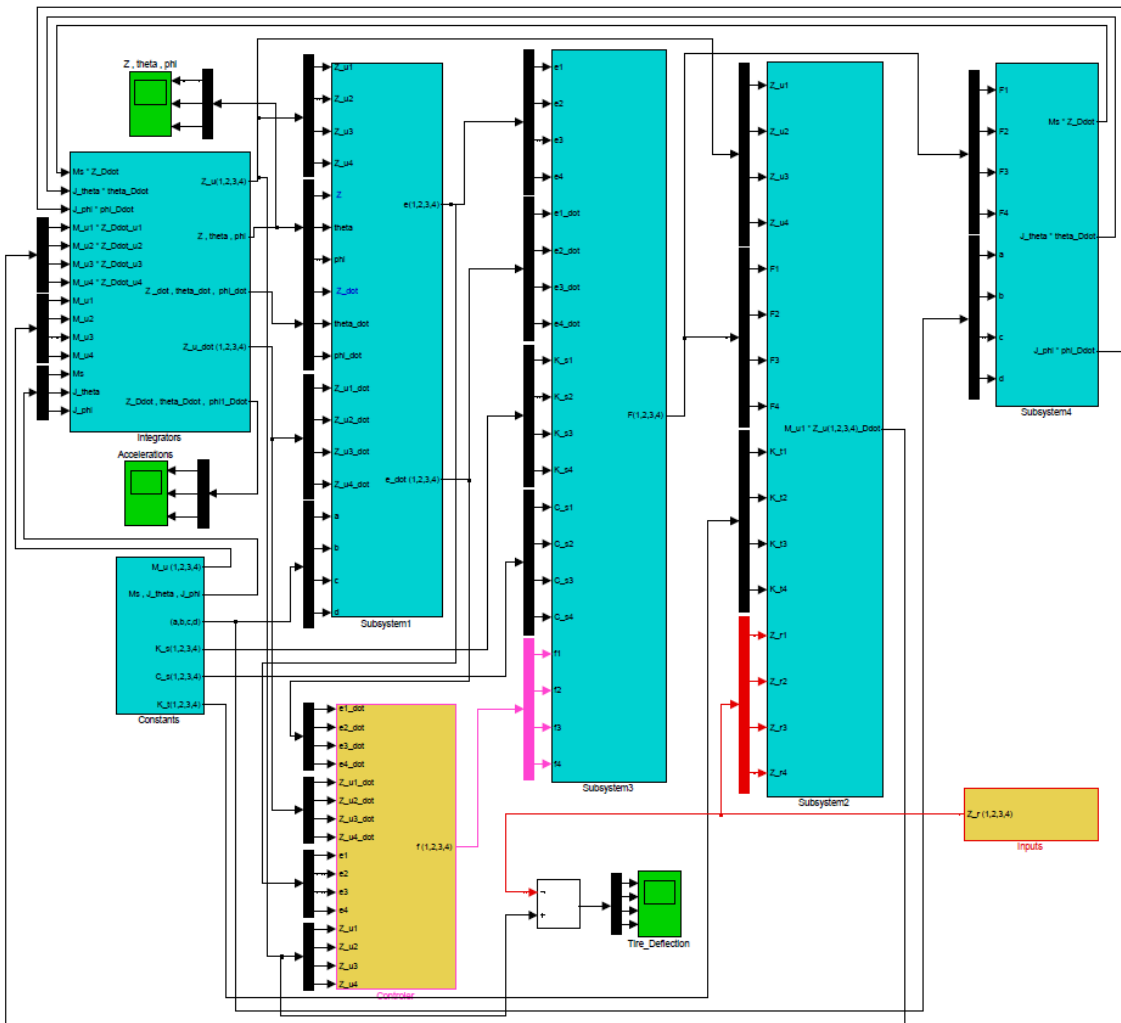
شکل (پ-۴-۱۲) زیر سیستم CONTROLLER



شکل(پ-۴-۱۳) مدل کامل خودرو با کنترلر Sky-hook on-off

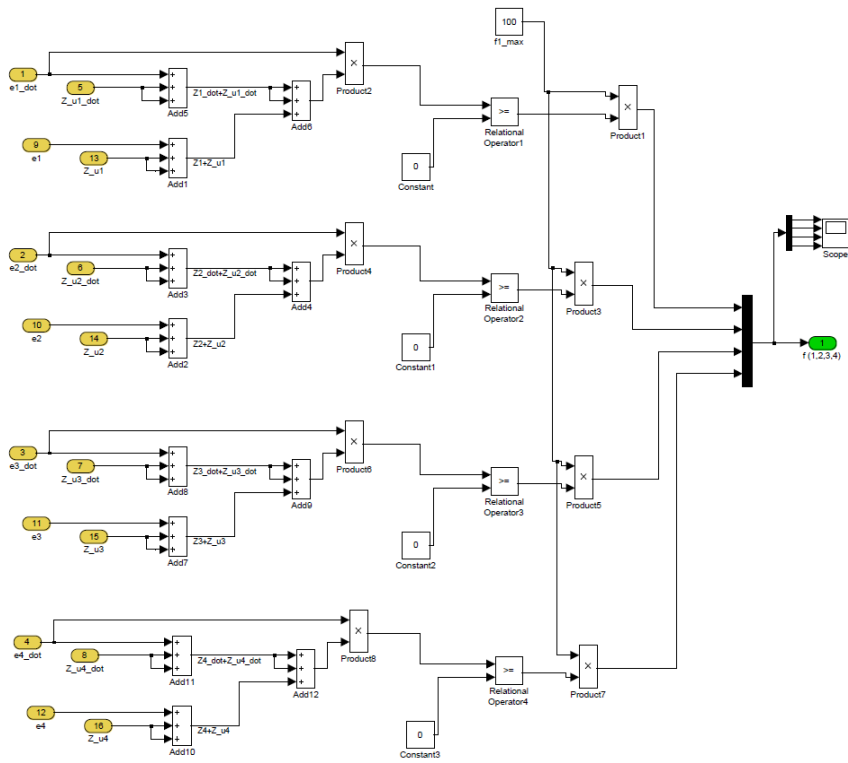


شکل (پ-۴-۱۴) زیر سیستم Controller



شکل (پ-۴-۱۵) مدل کامل خودرو با کنترلر به روش SLIDING MODE CONTROL





شکل (پ-۴-۱۶) زیر سیستم CONTROLLER

## منابع و مراجع

- [1] R. Stanway, Smart Fluids: Current and Future Developments, Materials Science and Technology, 20, pp931-939, (2004).
- [2] M.R. Jolly, C.J. Bender and D.J. Carlson, Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids, SPIE 5th Annual Int Symposium on Smart Structures and Materials, (1998).
- [٣] X. Tang, X.J. Wang, W.H. Li, and P.Q. Zhang, Testing and Modelling of an MR Damper in the Squeeze Flow Mode, Proceedings 6th International Conference on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Their Applications World Scientific Publ. Co., Signapore (1998) 870-878.
- [٤] E.M. Shtarkm, an U.S. Patent 4,992,360 (1991) and U.S. Patent 5,167,850 (1992).
- [٥] J.D. Carlson and K.D. Weiss, A Growing Attraction to Magnetic Fluids, Machine De-sign, August 1994, pp. 6164.
- [٦] I.H. Shames, and F.A. Cozzarelli, Elastic and Inelastic Stress Analysis. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1992), pp. 120-122.
- [٧] R. Stanway, J.L. Sproston, and N.G. Stevens, Non-linear Identification of an Electrorheological Vibration Damper, IFAC Identification and System Parameter Estimation (1985) pp. 195–200.
- [٨] R. Stanway, J.L. Sproston, and N.G. Stevens, Non-linear Modelling of an Electro-rheological Vibration Damper, J. Electrostatics(1987) Vol. 20, pp. 167–184.
- [٩] R.W. Phillips, Engineering Applications of Fluids with a Variable Yield Stress, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley(1969).
- [١٠] Z.D. Xu, Study on Semi-active Control of Structures Incorporated with Magnetorheological Dampers, Report of Postdoctoral Fellowship, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China(2002).

- [١١] J.P. Ou, and X.C. Guan, Experimental Study of MRDampers Performance," Earthquake Engineering & Engineering Vibration, (1999)19(4):76–81.
- [١٢] Y.Q. NI, H.J. LIU, AND J.M. KO, EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON SEISMIC RESPONSE CONTROL OF ADJACENT BUILDINGS USING SEMI-ACTIVE MR DAMPERS, PROC. SPIE, VOL. 4696, 334 (2002)
- [١٣] B. Spencer, S. Dyke, M. Sain, J. Carlson, Phenomenological model for magnetorheological dampers, Journal of Engineering Mechanics 123 (3) (1997) 230–238.
- [١٤] Y. Shen, M. F. Golnaraghi and G. R. Heppler, Journal of Intelligent Material Systems and Structures (2005); 16; 135
- [١٥] Q. Zhou, W.L. Qu, Two mechanical models for magnetorheological damper and corresponding test verification, Earthquake Engineering and Engineering Vibration 22 (2002) 144–150 (in Chinese).
- [١٦] D.R. Gamota, and F.E. Filisko, Dynamic Mechanical Studies of Electrorheological Materials: Moderate Frequencies, Journal of Rheology, Vol. 35, pp. (1991) 399–425.
- [١٧] R.C. Ehrgott and S.F. Masri, Structural Control Applications of an Electrorheological Device, Proceedings of the International Workshop on Structural Control, USC Publication Number CE-9311, (1994) pp. 115-129.
- [١٨] Y.K. Wen, Method of Random Vibration of Hysteretic Systems, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 102, No. EM2, (1976) pp. 249–263.
- [١٩] F. Ikhouane, S.J. Dyke, Modeling and identification of a shear mode magnetorheological damper, Smart Materials and Structures 16 (2007) 1–12.
- [٢٠] L. Alvarez, R. Jimenez, Real-time identification of magneto-rheological dampers, in: 15th Triennial World Congress, IFAC'02, (2002).
- [٢١] R. Jimnez, L. Alvarez, Real time identification of structures with magnetorheological dampers, in: Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, vol. 1, (2002), pp. 1017–1022.
- [٢٢] K. Schurter, P.N. Roschke, Fuzzy modeling of a magnetorheological damper using anfis, The Ninth IEEE International Conference Fuzzy Systems,(2000).
- [٢٣] D.H. Wang, W.H.Liao, Neural network modeling and controllers for magnetorheological fluid dampers, The 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems,vol.3,(2001),pp.1323–1326.

- [۲۴] C. Chang, P. Roschke, Neural network modeling of a magnetorheological damper, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (9)(1998) 755–764.
- [۲۵] A. Smyth, S. Masri, E. Kosmatopoulos, A. Chassiakos, T. Caughey, Development of adaptive modeling techniques for non-linear hysteretic systems, *International Journal of Non-Linear Mechanics* 37(8)(2002)1435–1451.
- [۲۶] H. Du, J. Lam, N. Zhang, Modeling of a magneto-rheological damper by evolving radial basis function networks, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 19 (8)(2006)869–881.
- [۲۷] J.L. Boada, Modeling of a magnetorheological damper by recursive lazy learning, *Int. J. Non-Linear Mech.* (2009), doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.(2008).11.019
- [۲۸] M. Zapateiro, N. Luo, Parametric and non-parametric characterization of a shear mode MR damper, *Journal of Vibroengineering* 9 (2007) 14–18.
- [2۹] A. Rodriguez, F. Ikhouane, J. Rodellar, N. Luo, Identification of a magnetorheological damper: theory and experiments, 17th IFAC World Congress, Seoul, South Korea, (2008).
- [۳۰] S.B. Choi, S.K. Lee and Y.P. Park, A Hysteresis Model for the Field-dependent Damping Force of a Magneto-rheological Damper, *Journal of Sound and Vibration*, 245(2) (2001):375–383.
- [۳۱] S. Choi, Vibration Control of a Smart Material Based Damper System Considering Temperature Variation and Time Delay, *Acta Mechanica*, 180(1–4) (2005):7382.
- [۳۲] F. Gordaninejad, and D.G. Breese, Heating of Magnetorheological Fluid Dampers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 10(8) (1999):634–645.
- [۳۳] D. Batterbee and N.D. Sims, Temperature sensitive controller performance of MR dampers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (2009); 20; 297
- [۳۴] N.D. Sims, N.J. Holmes, and R. Starway, A Unified Modelling and Model Updating Procedure for Electrorheological and Magnetorheological Dampers, *Smart Materials and Structures*, (2004)13:100–121.
- [۳۵] Jr. Spencer, S.J. Dyke, M.K. Sain, and J.D. Carlson, Idealized Model of a Magneto-rheological Damper, *Proceedings of the 12th Conference on Analysis and Computation*, ASCE, Chicago, Illinois. (1996a)
- [۳۶] J. Rabinow, The Magnetic Fluid Clutch, *AIEE Trans.*, (1948)67, pp. 1308–1315.
- [37] E.R. Wang, X.Q. Ma, S. Rakheja, and C.Y. Su, Modeling Hysteretic Characteristics of an MR-fluid Damper, *Proc. of the Inst. of Mech. Engrs., Part D: J. of Automobile Engineering*, (2003) 217:537–550.

- [38]X.Q. Ma, S. Rakheja and Chun-Yi Su, Development and Relative Assessments of Models for Characterizing the Current Dependent Hysteresis Properties of Magnetorheological Fluid Dampers, of Intelligent Material Systems and Structures,(2007) 18:487-50
- [39] D. Karnpp, Mj. Crosby, RA. Farwoof, Vibration control using semi-active force generators.ASME J Eng Ind (1974);96(2):619-26
- [40]F. Casciati, G. Magonette and F. Marazzi, Technology of Semiactive Device and Application in vibration Mitigation, (2006) John Wiley & Sons ,Ltd
- [41]Vijay A.Neelakantan and Gregory N.Washingtin, Vibration Control of Structural Systems using MR dampers and a Modified Sliding Mode Contrpl Technique, Journal of intelligeny material systems and structures, 19(2008)
- [42]M. YU, S.B.Choi, X.M. Dong and C.R. Liao, Fuzzy Neural Network Control for Vehicle Stability Utilizing Magnetorheological Suspension System, Journal of intelligeny material systems and structures,20(2009)
- [43]M. Zapateiro, N. Luo, H.R. Karimi, J.Vehi, Vibration Control of a class of semiactive suspension system using neural network and backstepping techniques , Journal of Mechanical Systems and Signal Processing(2008)
- [44]M. Unsal, C. Niezrecki and C.D. Cran, Multi-axis Semi-active Vibration Control using Magnetorheological Technology, Journal of intelligeny material systems and structures,19(2008)

## ABSTRACT

Magnetorheological (MR) dampers are tools for semi-active control which are widely being used because of their rapid response, low energy consumption, and high reliability. Automobile suspension and structural vibration control systems are among the most frequent uses of such dampers. The main challenge to the expansion of using these dampers is presenting a model capable of simulating their linear and complex hysteresis behaviors in a suitable manner. So far many different models have been presented for simulation of hysteresis of magneto-rheological dampers. Models such as Bouc-Wen's parametric model and other non-parametric models are based on sigmoid functions. Nevertheless, many of these models demonstrate differences between results of experimental tests and simulations. Also, in most models the model characterizing parameters are not functions of frequency, amplitude and current of stimulation. Thus they must be recalculated for different stimulation conditions.

In this thesis three new non-parametric hysteresis models are offered for simulation of behaviors of magneto-rheological dampers. The offered models takes the excitation frequency, amplitude and current as variables and because of that it are capable of estimating the hysteresis force in different stimulation conditions with a good level of accuracy. Also, these models have the required level of flexibility for simulation of different dampers. The models completion is free of all complications observed in other models. Finally, the accuracy of simulations provided by these models were compared with experimental data and two parametric and non-parametric models. In the last chapter the effects of applying a Magnetorheological damper on a car suspension system is investigated.

**Keywords:** *Magneto-Rheological Fluid and Damper, Modeling, Neural Network, Semi-active control*



**Shahrood University of Technology**

Mechanical Department

# **Modeling and Control of Magneto-Rheological Dampers**

Mohammad Sheibani

**Supervisor:**

Dr. Ardeshir Karami Mohammadi

**Date:** July 2010