دانشکده فنی مهندسی مکانیک

گروه مکانیک

پایان‌نامه جهت کسب درجه کارشناسی ارشد در رشته
مهندسی مکانیک

تحلیل ارتعاشات غیرخطی سیستم تعلیق خودرو

استاد راهنما:
دکتر موسی رضائی

استاد مشاور:
دکتر محمد زهساز

پژوهشگر:
حامد سمندری

دی ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی مهندسی مکانیک

گروه مکانیک

عنوان

تحلیل ارتعاشات غیرخطی سیستم تعلیق خودرو

استاد راهنما:

دکتر موسی رضائی

استاد مشاور:

دکتر محمد زهساز

پژوهشگر:

حامد سمندری

دی ۱۳۸۹

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی‌شان

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید

و به پاس محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم

تقدیر و تشکر

هر موفقیت را کلیدی است و کلید موفقیت من هم تحصیل زیر سایه اساتید فرزانه‌ای که همواره چون شمعی فروزان روشنگر مسیر پیشرفت من بوده‌اند.

در ابتدا بر خود واجب می‌دانم از زحمات بی‌دریغ استاد گرامی جناب آقای دکتر موسی رضائی که راهنمایی پایان‌نامه بنده را بر عهده داشتند و در طول دوره تحصیل مرا همواره مورد لطف و عنایت خود قرار می‌دادند تشکر کنم و از خداوند منان موفقیت در تمامی مراحل زندگی را برای ایشان خواستارم.

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر محمد زهساز که مشاوره پایان‌نامه بنده را بر عهده داشتند و در طول دوره تحصیل از زحمات دلسوزانه و راهنمایی‌های خردمندانه ایشان بهره فراوان بردم، سپاسگزارم.

و از تمامی دوستان عزیزی که در طول دوره تحصیلی با ایجاد فضایی سرشار از صمیمیت و با محبت‌های بی‌دریغشان بنده را مورد لطف خویش قرار دادند کمال تشکر را دارم و آرزو می‌کنم که همواره در زندگی موفق و پیروز باشند.

حامد سمندری

نام خانوادگی دانشجو: سمندری **نام:** حامد

عنوان پایان‌نامه:

«تحلیل ارتعاشات غیرخطی سیستم تعلیق خودرو»

استاد راهنما: دکتر موسی رضائی استاد مشاور: دکتر محمد زهساز

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مکانیک گرایش: سیستم محرکه خودرو

دانشگاه: دانشگاه تبریز دانشکده فنی مهندسی مکانیک-گروه مهندسی مکانیک

تاریخ فارغ التحصیلی: دی ۱۳۸۹ تعداد صفحه: ۹۶

کلید واژه‌ها: ارتعاشات غیرخطی-آشوب-دمپر الکترومغناطیسی- هیستریستیک – سیستم تعلیق

چکیده

در سال‌های اخیر بررسی و مدل‌سازی دینامیکی وسایل نقلیه برای طراحی خودروهائی با قابلیت مانور بالا و راحتی سفر مورد توجه محققان بوده است. مقایسه نتایج تجربی انجام شده بر روی سیستم تعلیق خودرو و نتایج حاصل از روشهای تحلیلی که بر اساس مدل‌سازی خطی المان‌های سیستم تعلیق استوار هستند و در سال‌های اخیر به صورت روزافزون از آنها استفاده شده است حاکی از وجود تضاد در نتایج است. این امر عمدتاً به علت خاصیت غیرخطی المان‌های سیستم تعلیق می‌باشد که سبب بوجود آمدن برخی پدیده‌های غیرخطی از قبیل آشوب می‌شود که در تحقیقات پیشین قابل شناسائی نمی‌باشد. با ورود مدل‌های غیرخطی برای اجزاء سازنده سیستم تعلیق، مدل‌های موجود برای خودرو مورد بازبینی قرار گرفتند. توسعه مدل‌های غیرخطی ابتدا با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای سفتی فنر در سیستم تعلیق و سفتی تایر آغاز شد. در تحقیقات بعدی رفتار غیر خطی دمپر نیز مورد توجه قرار گرفت. در عمده تحقیقات انجام شده، رفتار غیر خطی دمپر به صورت دو خطی منظور شده است. توسعه این مدل‌ها با معرفی دمپرهای الکترومغناطیسی در صنعت خودروسازی که دارای ویژگی غیرخطی و هیستریستیک هستند وارد مرحله‌ای تازه شد.

هدف از انجام این تحقیق، بررسی رفتار ارتعاشات غیرخطی سیستم تعلیق مجهز به دمپر الکترومفناطیسی می‌باشد. بدین منظور ضمن مروری بر تحقیقات پیشین، مدل ارتعاشی مناسبی برای سیستم تعلیق در نظر گرفته شد و در آن ترکیب رفتارهای غیرخطی اجزای مختلف سیستم تعلیق شامل تایرها، فنرها و کمک فنرها اعمال شد. با در نظر گرفتن تحریک جاده و مدل‌سازی ریاضی سیستم تعلیق، پاسخ ارتعاشات غیرخطی اجباری سیستم با استفاده از روش اغتشاشات و روش‌های عددی مناسب استخراج شد. سپس رفتارهای غیرخطی و آشوبناک در پاسخ زمانی و پاسخ فرکانسی سیستم مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده در ادبیات فن مقایسه شد.

فهرست

مقدمه و تعریف مسئله ۱

فصل اول

پیشینه تحقیق و بررسی منابع

۱-۱- مقدمه ۴

۱-۲- کارهای انجام شده بر مبنای سیستم‌های تعلیق مجهز به دمپرهای هیدرولیکی ۵

۱-۲-۱- مدل یک چهارم ۵

۱-۲-۲- مدل نصف خودرو ۸

۱-۲-۳- مدل کامل خودرو ۱۱

۱-۳- دمپرهای الکترومغناطیسی ۱۴

۱-۴- سیستم‌های تعلیق مجهز به دمپرهای الکترومغناطیسی ۲۰

۱-۴-۱- مدل یک چهارم ۲۱

۱-۵- ضرورت انجام تحقیق حاضر و اهداف آن ۲۴

فصل دوم

مدل یک چهارم یک درجه آزادی- حل اغتشاشات

۲-۱- مقدمه ۲۶

۲-۲- معرفی مدل ۲۷

۲-۳- تحلیل مدل ۳۰

۲-۳-۱- حالت غیر رزونانسی ۳۱

۲-۳-۲- حالت رزونانس اصلی ۳۸

فصل سوم

بررسی تاثیر سایر درجات آزادی خودرو بر پاسخ آن

۳-۱- مقدمه ۴۱

۳-۲- مدل یک چهارم با دو درجه آزادی ۴۲

۳-۲-۱- بررسی تاثیر اجزاء غیرخطی بر پاسخ سیستم ۴۷
۳-۲-۲- مقایسه مدل یک چهارم دو درجه آزادی با مدل یک درجه آزادی ۵۱
۳-۲-۳- بررسی تاثیر دامنه تحریک بر پاسخ سیستم بر اساس مدل دو درجه آزادی ۵۴
۳-۳- مدل نصف خودرو ۵۶
۳-۳-۱- بررسی تاثیرات اجزاء غیر خطی بر روی پاسخ سیستم ۶۱
۳-۳-۲- بررسی تاثیر تاخیر زمانی بر رفتار آشوبناک سیستم تعلیق ۶۷
۳-۳-۳- بررسی رفتار دینامیکی خودرو با در نظر گرفتن مدل غیرخطی نصف خودرو و مقایسه آن با مدل یک چهارم خودرو ۶۸
۳-۳-۴- بررسی تاثیرات دامنه تحریک بر پاسخ سیستم بر اساس مدل نصف خودرو ۷۱
۳-۳-۵- بررسی اجمالی پاسخ فرکانسی سیستم به کمک نمودارهای صفحه پوآنکاره برای مدل نصف خودرو ۷۳

فصل چهارم
بحث و نتیجه‌گیری

۴-۱- مقدمه ۸۷
۴-۲- بررسی تاثیر سایر درجات آزادی خودرو بر پاسخ آن ۸۹

پیشنهادات ۹۲

مراجع ۹۳

فهرست نمادها و نشانه‌ها

نشانه‌های انگلیسی

دامنه ناهمواری جاده	A
دامنه نوسانات	A_{out}
فاصله مرکز جرم از محور چرخ جلو	a_1
فاصله مرکز جرم از محور چرخ عقب	a_2
ضریب غیرخطی میرایی معادل تعلیق خودرو	c_i
میرایی معادل تعلیق خودرو	c_s
میرائی تعلیق جلو	c_{sf}
میرائی تعلیق عقب	c_{sr}
نیروی ایجاد شده در دمپر سیستم تعلیق	$F_{c_{si}}$
نیروی اعمالی به جرم فنربندی نشده	$F_{k_{usi}}$
نیروی ایجاد شده در فنر سیستم تعلیق	F_{si}
شتاب گرانش	g
ممان اینرسی بدنه(جرم فنربندی شده)	I_z
ضریب غیرخطی سفتی معادل تعلیق خودرو	k_i
سفتی معادل تعلیق خودرو	k_s
سفتی فنر تعلیق جلو	k_{sf}
سفتی فنر تعلیق عقب	k_{sr}
سفتی تایر جلو	k_{usf}
سفتی تایر عقب	k_{usr}
جرم فنربندی شده	m_s
جرم فنربندی نشده	m_{us}
سرعت حرکت خودرو	v_0
جابجایی جرم فنربندی شده	x_G
تحریک حاصل از ناهمواری جاده	x_0
تحریک ناهمواری جاده با اختلاف فاز	x_{0r}
جابجایی جرم فنربندی نشده جلو	x_1
جابجایی جرم فنربندی نشده عقب	x_2

نشانه‌های یونانی

ضریب بخش غیرخطی سفتی سیستم تعلیق	α
پارامتر کوچک	ε
اختلاف فاز بین چرخ جلو و عقب	ϕ
ضریب بخش غیرخطی میرائی سیستم تعلیق	η
ویسکوزیته سیال	μ
تنش برشی	τ
فرکانس تحریک	Ω

فهرست اشکال

شکل ۱-۱- مدل یک چهارم با دو درجه آزادی[۲۱] ۷

شکل ۱-۲- مقایسه پاسخ استخراجی سیستم به روش عددی(خطوط) و روش میانگین گیری(خط چین) الف) جرم فنربندی نشده ب) جرم فنربندی شده[۲۱] ۸

شکل ۱-۳- نمودارهای پوآنکاره سیستم در فرکانس تحریک $f = 11Hz$ و $A = 0.01m$ استخراج شده از حل اغتشاشات الف) جرم فنربندی نشده ب) سمت چپ جرم فنربندی شده [۲۱] ۸

شکل ۱-۴- مدل نصف خودرو[۲۸] ۹

شکل ۱-۵ نمودارهای پاسخ فرکانسی سیستم تعلیق الف) جرم فنربندی شده ب)حرکت دورانی جرم فنربندی شده ج) جرم فنربندی نشده، چرخ جلو د) جرم فنربندی نشده، چرخ عقب[۲۸] ۱۰

شکل ۱-۶- پاسخ فرکانسی مدل کامل خودرو به ازای مقادیر $A = 0.06\,m,\ \beta = 9°,\ \alpha = 58°$ و $0 < f < 8\ Hz$ برای زمانی که فرکانس تحریک به آرامی افزایش و کاهش می‌یابد [۳۱] ۱۲

شکل ۱-۷- دمپر الکترومغناطیسی و اجزاء تشکیل دهنده آن[۳۵] ۱۵

شکل ۱-۸- نمای شماتیک از دمپر الکترومغناطیسی ارائه شده توسط Stanway [۳۵]..... ۱۶

شکل ۱-۹- نیروی تولید شده در دمپر، خطوط بیانگر داده‌های تجربی و خط چین پیش‌بینی مدل ارائه شده توسط Stanway [۳۵] ۱۶

شکل ۱-۱۰- نمای شماتیک از دمپر الکترومغناطیسی بر اساس مدل گاموتو و فلیسکو [۳۴]..... ۱۷

شکل ۱-۱۱- نیروی تولید شده در دمپر، خطوط پیش‌بینی مدل ارائه شده توسط گاموتو و فلیسکو و خط چین بیانگر داده‌های تجربی [۳۴] ۱۷

شکل ۱-۱۲- نمای شماتیک از دمپر الکترومغناطیسی بر اساس مدل بوک- ون [۳۵]..... ۱۸

شکل ۱-۱۳- نیروی تولید شده در دمپر، خطوط بیانگر داده‌های تجربی و خط چین پیش‌بینی مدل بوک- ون [۳۸]..... ۱۹

شکل ۱-۱۴- نیروی تولید شده در دمپر، خطوط بیانگر داده‌های تجربی و خط چین پیش‌بینی مدل چندجمله‌ای [۳۸] ۲۰

شکل ۱-۱۵- مدل یک چهارم یک درجه آزادی با فنر و دمپر غیرخطی[۴۴] ۲۱

شکل ۱-۱۶- الف) نمودار پاسخ فرکانسی سیستم تعلیق ب) نمودار دوشاخگی سیستم تعلیق[۴۴]..... ۲۲

شکل ۱-۱۷- نمودارهای پیکره فاز (خطوط) و پوآنکاره (نقاط) سیستم تعلیق الف) برای $\Omega = 0.6$ ب) برای $\Omega = 0.8$ ج) برای $\Omega = 1$ و د) نمودار حلقه هیسترزیس سیستم برای فرکانس‌های تحریک مذکور(به ترتیب از حلقه داخلی تا بیرونی)[۴۵]..... ۲۳

شکل ۲-۱- مدل یک چهارم یک درجه آزادی با فنر و دمپر غیرخطی..... ۲۸

شکل ۲-۲- نمودار پاسخ زمانی سیستم در فرکانس تحریک $\Omega' = 2.5$ خطوط حل عددی و "+" حل مقیاس‌های چندگانه (هر دو حل بر هم کاملاً منطبق شده‌اند) ۳۵

شکل ۲-۳- نمودار پاسخ زمانی سیستم در فرکانس تحریک $\Omega' = 0.2$ خطوط پر حل عددی و خط چین حل حاصل از روش مقیاس‌های چندگانه ۳۶

شکل ۲-۴- نمودار پوآنکاره سیستم در فرکانس تحریک $\Omega' = 0.2$ الف) حاصل از حل عددی ب) حاصل از روش مقیاس چندگانه ۳۷

شکل ۲-۵- تغییرات $a(T_1)$ در مقابل زمان الف) در فرکانس تحریک $\Omega' = 2.5$ ب) در فرکانس تحریک $\Omega' = 0.2$ ۳۷

شکل ۲-۶- نمودار پاسخ فرکانسی سیستم در حوالی رزونانس اصلی الف) حاصل از حل عددی ب) حل مقیاس‌های چندگانه ۴۰

شکل ۳-۱- مدل غیرخطی یک چهارم - دو درجه آزادی خودرو تحت تحریک جاده.....۴۳

شکل ۳-۲- پاسخ فرکانسی مدل خطی یک چهارم - دو درجه آزادی خودرو تحت تحریک جاده الف) برای جرم فنربندی نشده ب) برای جرم فنربندی شده.....۴۶

شکل ۳-۳- نمودارهای پاسخ فرکانسی برای مدل غیر خطی به ازای $\alpha = 0.3$ و $\eta = 0.08$ الف) برای جرم فنربندی نشده ب) برای جرم فنربندی شده، و نمودارهای دوشاخگی ج) برای جرم فنربندی نشده د) برای جرم فنربندی شده ۴۸

شکل ۳-۴- نمودارهای پاسخ فرکانسی برای مدل غیر خطی به ازای $\alpha = 1.2$ و $\eta = 0.02$ الف) برای جرم فنربندی نشده ب) برای جرم فنربندی شده، و نمودارهای دوشاخگی ج) برای جرم فنربندی نشده د) برای جرم فنربندی شده ۴۹

شکل ۳-۵- نمودار پیکره فازی (خطوط) و پوآنکاره (نقاط) سیستم بازای $\alpha = 1.2$ و $\eta = 0.02$در فرکانس تحریک $\overline{f} = 2.8$ الف) برای جرم فنربندی نشده ب) برای جرم فنربندی شده، و در فرکانس تحریک $\overline{f} = 0.6$ ج) برای جرم فنربندی نشده د) برای جرم فنربندی شده ۵۰

شکل ۳-۶- نمودارهای پاسخ فرکانسی برای مدل غیر خطی به ازای $\alpha = 1.5$ و $\eta = 0.1$ الف) برای جرم فنربندی نشده ب) برای جرم فنربندی شده، و نمودارهای دوشاخگی ج) برای جرم فنربندی نشده د) برای جرم فنربندی شده ۵۲

شکل ۳-۷- نمودارهای پیکره فاز (خطوط) و پوآنکاره (نقاط) سیستم به ازای $\alpha = 1.5$ و $\eta = 0.1$ با شرایط اولیه $[x_2, v_2, x_1, v_1] = [-0.15, 0.1, 0.15, -0.1]$ الف) برای جرم فنربندی نشده ب) برای جرم فنربندی شده و شرایط اولیه $[x_2, v_2, x_1, v_1] = [0, 0, 0.15, -0.1]$ ج) برای جرم فنربندی نشده د) برای جرم فنربندی شده ۵۳

شکل ۳-۸- جابجایی عمودی سیستم تعلیق خودرو A_{out} در مقابل فرکانس تحریک جاده به ازای دامنه تحریک $A = 0.11, 0.20, 0.26, 0.31\text{m}$ الف) جرم فنربندی شده ب) جرم فنربندی نشده ۵۴

شکل ۳-۹- نمودار پیکره فاز (خطوط) و پوانکاره (نقاط) به ازای فرکانس تحریک $f = 0.7$ الف) برای $A = 0.27m$ ب) برای $A = 0.37m$ و نمودارهای پاسخ زمانی در فرکانس مذکور ج) برای $A = 0.27m$ د) برای $A = 0.37m$ ۵۵

شکل ۳-۱۰- جابجایی عمودی سیستم تعلیق خودرو A_{out} در مقابل فرکانس تحریک جاده به ازای دامنه تحریک $A = 0.11,0.16,0.31,0.43m$ ۵۶

شکل ۳-۱۱- مدل غیرخطی نصف خودرو - چهار درجه آزادی خودرو تحت تحریک جاده ۵۷

شکل ۳-۱۲- نمودارهای پاسخ فرکانسی برای مدل غیر خطی به ازای $\alpha = 0.3$ و $\eta = 0.08$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۶۲

شکل ۳-۱۳- نمودارهای دوشاخگی برای مدل غیر خطی به ازای $\alpha = 0.3$ و $\eta = 0.08$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۶۲

شکل ۳-۱۴- نمودارهای پاسخ فرکانسی برای مدل غیر خطی به ازای $\alpha = 1.2$ و $\eta = 0.02$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی بدنه ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۶۳

شکل ۳-۱۵- نمودار تغییرات دامنه خروجی در برابر تغییرات ضریب میرایی به ازای $\bar{f} = 1.1$ و $\alpha = 1.2$ ۶۴

شکل ۳-۱۶- نمودارهای پیکره فاز (خطوط) و پوآنکاره (نقاط) در فرکانس تحریک $\bar{f} = 1.10$ بازای $\alpha = 1.20$ و $\eta = 0.028$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی بدنه ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۶۵

شکل ۳-۱۷- نمودارهای پیکره فاز برای مدل غیر خطی در فرکانس تحریک $\bar{f} = 1.10$ و به ازای $\alpha = 1.5$ و $\eta = 0.024$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی بدنه ج) برای چرخ جلو د) برای چرخ عقب ۶۶

شکل ۳-۱۸- نمودار پاسخ زمانی سیستم در فرکانس تحریک $\bar{f} = 1.10$ الف) به ازای $\eta = 0.028$ ب) به ازای $\eta = 0.024$ ۶۶

شکل ۳-۱۹- نمودارهای دوشاخگی تاخیر زمانی در فرکانس تحریک $\bar{f} = 0.95$ برای مدل غیر خطی به ازای $\alpha = 1.5$ و $\eta = 0.10$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۶۷

شکل ۳-۲۰- نمودارهای پاسخ فرکانسی برای مدل غیر خطی به ازای $\alpha = 1.50$ و $\eta = 0.10$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی بدنه ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۶۹

شکل ۳-۲۱- نمودارهای دوشاخگی برای مدل غیر خطی به ازای $\alpha = 1.50$ و $\eta = 0.10$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۶۹

شکل ۳-۲۲- نمودارهای پیکره فاز (خطوط) و پوآنکاره (نقاط) برای مدل غیر خطی به ازای $\alpha = 1.50$ و $\eta = 0.10$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۷۰

شکل ۳-۲۳- جابجایی عمودی سیستم تعلیق خودرو A_{out} در مقابل فرکانس تحریک جاده به ازای دامنه تحریک $A = 0.11, 0.20, 0.30, 0.35, 0.40m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب..... ۷۲

شکل ۳-۲۴- تغییرات عمودی سیستم تعلیق خودرو A_{out} در مقابل فرکانس تحریک جاده به ازای دامنه تحریک $A = 0.11, 0.20, 0.30, 0.35, 0.40m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۷۳

شکل ۳-۲۵- تغییرات عمودی سیستم تعلیق خودرو A_{out} در مقابل فرکانس تحریک جاده به ازای دامنه تحریک $A = 0.11m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۷۴

شکل ۳-۲۶- نمودارهای پیکره فاز (خطوط) و پوآنکاره (نقاط) در فرکانس تحریک $\overline{f} = 1.10$ و به ازای دامنه تحریک $A = 0.10m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۷۵

شکل ۳-۲۷- نمودارهای پیکره فاز (خطوط) و پوآنکاره (نقاط) در فرکانس تحریک $\overline{f} = 1.06$ و به ازای دامنه تحریک $A = 0.10m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۷۶

شکل ۳-۲۸- نمودارهای پیکره فاز (خطوط) و پوآنکاره (نقاط) در فرکانس تحریک $\overline{f} = 1.05$ و به ازای دامنه تحریک $A = 0.10m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۷۷

شکل ۳-۲۹- نمودارهای پیکره فاز (خطوط) و پوآنکاره (نقاط) در فرکانس تحریک $\overline{f} = 1.03$ و به ازای دامنه تحریک $A = 0.10m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۷۸

شکل ۳-۳۰- نمودارهای پیکره فاز سیستم در فرکانس تحریک $\overline{f} = 1.00$ و به ازای دامنه تحریک $A = 0.10m$ برای الف) حرکت عمودی بدنه ب) حرکت کله زنی ج) حرکت عمودی چرخ جلو د) حرکت عمودی چرخ عقب ۷۹

شکل ۳-۳۱- نمودارهای پوآنکاره سیستم در فرکانس تحریک $\overline{f} = 1.00$ و به ازای دامنه تحریک $A = 0.10m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۷۹

شکل ۳-۳۲- نمودارهای پوآنکاره سیستم در فرکانس تحریک $\overline{f} = 0.98$ و به ازای دامنه تحریک $A = 0.10m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۸۰

شکل ۳-۳۳- نمودارهای پوآنکاره سیستم در فرکانس تحریک $\overline{f}=0.60$ و به ازای دامنه تحریک $A=0.10m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۸۱

شکل ۳-۳۴- جابجایی عمودی سیستم تعلیق خودرو A_{out} در مقابل فرکانس تحریک جاده به ازای دامنه تحریک $A=0.30m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۸۲

شکل ۳-۳۵- نمودارهای پیکره فاز سیستم در فرکانس تحریک $\overline{f}=1.00$ و به ازای دامنه تحریک $A=0.30m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۸۲

شکل ۳-۳۶- نمودارهای پیکره فاز (خطوط) و پوآنکاره (نقاط) در فرکانس تحریک $\overline{f}=0.902$ و به ازای دامنه تحریک $A=0.30m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۸۳

شکل ۳-۳۷- نمودارهای پیکره فاز (خطوط) و پوآنکاره (نقاط) در فرکانس تحریک $\overline{f}=0.88$ و به ازای دامنه تحریک $A=0.30m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۸۴

شکل ۳-۳۸- نمودارهای پیکره فاز (خطوط) و پوآنکاره (نقاط) در فرکانس تحریک $\overline{f}=0.85$ و به ازای دامنه تحریک $A=0.30m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۸۵

شکل ۳-۳۹- نمودارهای مقطع پوآنکاره سیستم در فرکانس تحریک $\overline{f}=0.80$ و به ازای دامنه تحریک $A=0.30m$ برای الف) حرکت عمودی بدنه ب) حرکت کله زنی ج) حرکت عمودی چرخ جلو د) حرکت عمودی چرخ عقب..... ۸۶

شکل ۳-۴۰- نمودارهای پوآنکاره سیستم در فرکانس تحریک $\overline{f}=0.80$ و به ازای دامنه تحریک $A=0.30m$ الف) برای حرکت عمودی بدنه ب) برای حرکت کله زنی ج) برای حرکت عمودی چرخ جلو د) برای حرکت عمودی چرخ عقب ۸۶

فهرست جداول

جدول ۲-۱- مقادیر عددی پارامترهای سیستم تعلیق[۴۴].....۳۰
جدول ۳-۱- مقادیر عددی پارامترهای سیستم تعلیق مدل یک چهارم خودرو[۱۲و۴۴و۵۴].....۴۵
جدول ۳-۲- مقادیر عددی پارامترهای سیستم تعلیق مدل نصف خودرو[۳۱و۴۴].....۵۹

مقدمه و تعریف مسئله

از زمان پیدایش صنعت خودروسازی، در طراحی سیستم تعلیق خودرو همواره تضادی بین تامین دو مقوله راحتی سفر[1] و قابلیت مانور[2] خودرو وجود داشته است. سیستم تعلیق نرم، به معنای تامین راحتی سفر است در حالیکه برای افزایش قابلیت مانور خودرو سیستم تعلیق سفت، مناسب‌تر است.

در تحلیل رفتار دینامیکی سیستم تعلیق خودرو، اجزاء ارتعاشی سیستم تعلیق در سه دسته‌ی کلی بدنه خودرو[3]، سیستم تعلیق و چرخ‌ها[4] قرار می‌گیرند. بر این اساس مدل‌های ارائه شده برای مطالعه رفتار دینامیکی سیستم تعلیق خودرو را می‌توان به سه دسته شامل: مدل یک چهارم خودرو، مدل نصف خودرو و مدل کامل خودرو تقسیم کرد. در مدل یک چهارم خودرو بدنه با یک فنر و دمپر به چرخ و از طریق آن به جاده مرتبط است. مجموعه تایر، ترمزها و میله‌های رابط تعلیق به عنوان جرم فنربندی نشده شناخته می‌شوند. از این مدل برای مطالعه حرکت ارتعاش عمودی[5] خودرو استفاده می‌شود. مدلی دیگر برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی خودرو، مدل نصف خودرو می‌باشد. این مدل برای بررسی حرکت ارتعاش عمودی و کله‌زنی[6] خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مدل دیگری برای نصف خودرو، با انتخاب دو چرخ جلو می‌توان به بررسی حرکت ارتعاش عمودی و چرخشی حول محور طولی خودرو[7] پرداخت.

---

[1] Ride
[2] Handling
[3] Sprung mass
[4] Unsprung mass
[5] bounce
[6] Pitch
[7] Roll

توسعه مدل‌های غیرخطی ابتدا با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای سفتی فنر در سیستم تعلیق و سفتی تایر آغاز شد. در تحقیقات بعدی رفتار غیرخطی دمپر نیز مورد توجه قرار گرفت. در عمده تحقیقات انجام شده، رفتار غیرخطی دمپر به صورت دوخطی[1] منظور شده است. توسعه این مدل‌ها با معرفی دمپرهای الکترومغناطیسی در صنعت خودروسازی که دارای ویژگی غیرخطی و هیستریستیک هستند وارد مرحله‌ای تازه شد. برخلاف دمپرهای هیدرولیکی معمول، دمپرهای الکترومغناطیسی دارای رفتار غیرخطی و هیستریستیک قابل توجه هستند که سبب ایجاد تغییرات عمده در پاسخ اجباری سیستم تعلیق می‌شوند.

هدف از انجام این تحقیق بررسی رفتار غیرخطی و آشوبناک در سیستم تعلیق می‌باشد. بدین منظور مروری بر ادبیات فن انجام شد. مشاهده شد که برای شناسایی تاثیر بکارگیری دمپرهای الکترومغناطیسی بر پاسخ دینامیکی سیستم تعلیق تا به امروز فقط از مدل یک چهارم یک درجه آزادی خودرو استفاده شده است. در این تحقیقات همچنین تنها از روش‌های عددی معمول در شناسایی پاسخ آشوبناک استفاده شده است. در نتیجه بررسی تاثیر سایر درجات آزادی خودرو بر پاسخ سیستم تعلیق مجهز به دمپر الکترومغناطیسی به عنوان هدف اصلی از انجام این پایان‌نامه انتخاب گردید.

مسئله‌ای که قبل از پرداختن به هدف اصلی پایان‌نامه در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است بررسی امکان حل معادلات حاکم بر سیستم تعلیق مجهز به دمپر الکترومغناطیسی با استفاده از روش‌های اغتشاشات است. هدف از انجام این بررسی که در فصل دوم پایان‌نامه به آن پرداخته شده است توان سنجی روش‌های اغتشاشات در نمایش پاسخ آشوبناک برای سیستم تعلیق مجهز به دمپر الکترومغناطیسی می‌باشد. این امکان سنجی تنها برای سیستم تعلیق هیدرولیکی در مراجع انجام شده است. حل انجام شده توسط روش مقیاس‌های چندگانه نشان داد که پارامترهای دمپر الکترومغناطیسی تاثیر اصلی را در تعیین نوع پاسخ سیستم دارند.

سپس هدف اصلی پایان‌نامه مورد توجه قرار گرفت اما با توجه به افزایش پیچیدگی معادلات با افزایش درجات آزادی، این بار روش‌های عددی معمول در ادبیات فن مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا با در نظر گرفتن

[1] Bilinear

جرم فنربندی نشده مدل یک چهارم دو درجه آزادی خودرو مورد بررسی قرار گرفت و رفتار غیرخطی و آشوبناک در پاسخ سیستم شناسایی شد. قابل ذکر است که مدل یک چهارم و سایر مدل‌ها پیش از این نیز برای شبیه‌سازی دینامیک خودرو مجهز به سیستم تعلیق هیدرولیکی استفاده شده‌اند اما سیستم‌های تعلیق مجهز به دمپر الکترومغناطیسی دارای رفتار غیرخطی و هیستریستیک هستند که با مدل‌های خطی و تکه‌ای خطی ارائه شده برای دمپرهای هیدرولیکی قابل شناسایی نیست. نشان داده شد که بکارگیری دمپر الکترومغناطیسی در سیستم تعلیق خودرو سبب تغییرات عمده در پاسخ فرکانسی آن می‌شود همچنین در مقایسه با مدل یک چهارم یک درجه موجود در مراجع برای این نوع از سیستم‌های تعلیق نواحی ناپایدار جدیدی در پاسخ دیده شد. در نهایت مدل نصف خودرو برای سیستم تعلیق مجهز به دمپر الکترومغناطیسی مورد بازنگری قرار گرفت. در مدل مورد استفاده با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی سیستم تعلیق، پاسخ فرکانسی سیستم و عوامل تاثیرگذار بر رفتار سیستم مورد بررسی قرار گرفت و از نمودارهای پاسخ فرکانسی، دوشاخگی[1] و پوآنکاره[2] برای شناسایی نواحی آشوبناک در پاسخ استفاده شد. در مدل یک چهارم امکان شناسایی رفتار کله زنی خودرو وجود نداشت. نشان داده شد که در مدل نصف خودرو در اثر نزدیکی رزونانس حرکت عمودی و کله زنی خودرو پاسخ سیستم در این ناحیه دچار تحول می‌شود که این مسئله بایستی در طراحی سیستم تعلیق در این ناحیه مدنظر قرار داده شود.

[1] Bifurcation
[2] Poincaré map

فصل اول

پیشینه تحقیق و بررسی منابع

۱-۱- مقدمه

تاریخچه خودروهای سواری به سال ۱۷۶۹ باز می‌گردد. زمانی که مهندس فرانسوی نیکولاس ژوزف کوخنو[1] اولین خودروی سه چرخ جهان را که به کمک بخار حرکت می‌کرد ساخت[۱]. اولین خودروی بنزینی در سال ۱۸۸۶ توسط کارل بنز[2] و گوتلیب دایملر[3] که به صورت جداگانه کار می‌کردند به بازارهای جهان عرضه شد. در طی سالهای بعد صنعت خودروسازی با سرعتی شگرف توسعه یافت بطوریکه در سال ۱۹۰۸ کارخانجات فورد و جنرال موتورز در امریکا به تولید انبوه دست زدند. در سال ۱۹۰۸ بیش از ۶۰۰ کارخانه خودروسازی در امریکا فعالیت می‌کرد[۲-۳].

اولین مقاله در زمینه دینامیک خودرو در سال ۱۹۰۸ توسط فردریک ویلیام لانچستر نوشته شد [۴] که بر روی بررسی فرمان‌پذیری خودرو در سر پیچ تمرکز داشت.

به علت گستردگی علم خودرو، تحقیقات گسترده‌ای در سالهای اخیر در زمینه‌های مختلف انجام شده است[۵-۱۰]. کارهای انجام شده تاکنون را می‌توان بر اساس نوع سیستم تعلیق مورد بحث در آنها در دو

[1] Nicolas Joseph Cognut
[2] Karl Benz
[3] Goltlieb Daimler

دسته کلی تقسیم بندی کرد. در دسته اول سیستم تعلیق مجهز به دمپرهای هیدرولیکی قرار می‌گیرند که این نوع از سیستم‌های تعلیق دارای رفتار غیرخطی ضعیف[1] می‌باشند. این نوع از سیستم‌های تعلیق در ادبیات فن به شکل مفصل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در دسته دوم، سیستم‌های تعلیق مجهز به دمپرهای الکترومغناطیسی قرار دارند که دارای رفتارهای غیرخطی و هیستریستیک قابل توجه‌ای هستند. وجود حلقه هیسترزیس در این نوع از سیستم‌های تعلیق سبب متمایز شدن آنها از سیستم‌های تعلیق هیدرولیکی شده است. تحقیقات انجام شده بر مبنای این نوع از سیستم‌های تعلیق محدود بوده و هنوز نیاز به انجام تحقیقات بیشتر در این ناحیه احساس می‌شود که هدف از انجام این تحقیق، بررسی رفتار غیرخطی در این نوع از سیستم‌های تعلیق می‌باشد.

در ادامه، ابتدا به مرور تحقیقات انجام شده بر اساس دمپرهای هیدرولیکی می‌پردازیم و نقاط ضعف و قوت این تحقیقات را برخواهیم شمرد. سپس به معرفی دمپرهای الکترومغناطیسی پرداخته و کارهای انجام شده در این زمینه را مورد بررسی قرار می‌دهیم و در نهایت با شناسایی کاستی‌های موجود در تحقیقات، به بیان اهداف تحقیق حاضر خواهیم پرداخت.

۱-۲- کارهای انجام شده بر مبنای سیستم‌های تعلیق مجهز به دمپرهای هیدرولیکی

مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای شبیه‌سازی دینامیکی خودرو، با توجه به تعداد درجات آزادی در نظر گرفته شده در آنها، در سه گروه یک چهارم خودرو، نصف خودرو و کامل خودرو قرار می‌گیرند.

۱-۲-۱- مدل یک چهارم

ساده‌ترین مدل سیستم تعلیق، مدل یک چهارم خودرو با یک درجه آزادی است در این مدل تنها حرکت قائم بدنه خودرو در نظر گرفته می‌شود و جرم فنربندی نشده در نظر گرفته نمی‌شود که سبب کاستی‌هایی در این مدل شده است.

[1] Weakly Nonlinear