



KNO-1101-4303

بررسی تفاوت‌های سیستم فربندی و آیرودینامیک خودروهای فرمول یک با خودروهای**هیبریدی و مدل‌سازی یک سیستم تعلیق بهبود یافته در نرم‌افزار MATLAB**علیرضا محمودی فرد^۱ alireza10.m10@gmail.com^۱ پژوهشگر و مدرس دانشگاه‌ها (در رشته‌های مختلف)، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران**چکیده:**

بارهای آیرودینامیکی تولید شده در یک بال در طراحی ساختاری آن، بسیار مهم است. هنگامی که بال‌های چند عنصری با دستگاه‌های نوک بال انتخاب می‌شوند، شناسایی و کمی کردن رفتار ساختاری آن‌ها برای جلوگیری از تغییر شکل‌های نامطلوب که عملکرد آیرودینامیکی را کاهش می‌دهند، ضروری است. این تحقیق با استفاده از روش‌های عددی (دینامیک سیالات محاسباتی و تجزیه و تحلیل اجزای محدود)، با استفاده از روش‌های اعتبارسنجی جامع برای اطمینان از صحت نتایج و ارزیابی عدم قطعیت آن‌ها، این سوالات را بررسی می‌کند؛ در مرحله اول، یک بررسی کامل از چهار پیکربندی خط پایه، با استفاده از معادلات میانگین ناویر-استوکس رینولدز و مدل آشفتگی $k-SST$ (انتقال تنش برشی) برای تجزیه و تحلیل و تعیین کمیت مهم‌ترین پارامترهای آیرودینامیکی و ساختاری انجام می‌شود؛ چندین پیکربندی ساختاری، از جمله مواد مختلف (آلیاژهای فلزی و دو کامپوزیت تقویت شده با الیاف طراحی شده) تحلیل می‌شوند؛ علاوه بر این، ثابت شده است که اصل برهم‌نهی، یک روش عالی برای اجرای طرح‌های ساختاری با کارایی بالا است؛ تأثیرات ناهمواری سطح جاده بر روی پایداری خودرو و راحتی سفر، از دیرباز مورد توجه محققان و صنایع خودروسازی بوده است. بدین‌منظور مدل‌سازی ارتعاشی خودرو با استفاده از مدل‌های ریاضی به‌منظور کاهش ارتعاشات ناخواسته خودرو در تحقیقات اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله تلاش گردیده است تا با مقایسه سیستم‌های تعلیق خودروهای مسابقه‌ای فرمول یک و خودروهای کم‌مصرف هیبریدی از نظر حرکت ارتعاش عمودی و کله‌زنی خودرو و ... و همچنین ارائه یک شبیه‌سازی، نوعی سیستم تعلیق بهبود یافته با طول عمر بالا، نشان داده شود.

کلید واژه‌ها: آیرودینامیک، خودرو هیبریدی، سیستم تعلیق، طراحی سازه، فرمول یک، مدل آشفتگی SST

۱. مقدمه

آیرودینامیک در طراحی خودروهای فرمول یک، از ابتدای رقابت در اوایل دهه ۱۹۵۰ مورد توجه قرار گرفته است؛ با این حال، نقش آن ثانویه بود و ملاحظات آیرودینامیکی بر کاهش میزان درگ ایجاد شده در خودرو، متمرکز بود. ظهور بال‌ها در اتومبیل‌های فرمول یک در سال ۱۹۶۸ اتفاق افتاد، زمانی که کالین چپمن بال‌های جلو و عقب را در لوتوس ۴۹ برای دستیابی به نیروی رو به پایین آیرودینامیکی معرفی کرد [۱-۳]، که اهمیت طراحی آیرودینامیکی یک ماشین مسابقه را در عملکرد آن برجسته نمود. نیروی رو به پایین می‌تواند حداکثر نیروهای جانبی و مماسی لاستیک را افزایش دهد [۱، ۴] و در نتیجه باعث افزایش سرعت پیچیدن خودرو و بهبود عملکرد شتاب و ترمز خودرو می‌شود؛ علاوه بر این، مهم‌ترین تأثیر کاهش درگ، افزایش حداکثر سرعت خودرو است. هر جزء خارجی یک خودرو فرمول یک، قبل از اجرا در معرض یک طراحی کامل آیرودینامیکی قرار دارد؛ با این وجود، اکثر این قطعات، اهداف دیگری دارند و بنابراین طراحی آیرودینامیکی آن‌ها تنها بر اساس کاهش میزان درگ ایجاد شده است. تقریباً تمام نیروی رو به پایین تولید شده در خودرو، توسط سه وسیله اصلی آیرودینامیک تأمین می‌شود: بال جلو، بال عقب و کف پخش‌کننده [۱، ۵]؛ آن‌ها منحصراً بر اساس ملاحظات آیرودینامیکی طراحی می‌شوند و بنابراین نمی‌توان آن‌ها را جداگانه طراحی کرد. اگر اثرات آیرودینامیکی برای افزایش عملکرد خودرو استفاده شود، تعادل بهینه نیروی رو به پایین بین چرخ‌های جلو و عقب برای متعادل کردن نیروی نرمال اعمال شده در هر دو تایر بسیار



مهم است [۴]. مرکز فشار، زمانی که در قسمت عقب خودرو قرار می‌گیرد، اطمینان می‌دهد که چرخ‌های جلو، حداکثر نیروی جانبی کمتری دارند و خودرو کم‌فرمان می‌شود؛ از طرفی اگر مرکز فشار در قسمت جلویی خودرو قرار گیرد، چرخ‌های عقب، حداکثر نیروی جانبی کمتری دارند و در نتیجه خودرو، بیش‌فرمانی می‌کند [۴۹].

این دستگاه آیرودینامیک با تمرکز بر بال جلو، جلویی‌ترین جزء یک ماشین مسابقه‌ای چرخ باز است؛ از یک بال با زاویه حمله منفی با وسایل اضافی مانند فلپ، فلپ گورنی یا صفحات انتهایی تشکیل شده است؛ دو ویژگی عمده در طراحی آن تأثیر مهمی دارند: نزدیکی آسفالت (اثر زمین) و تایرها [۱]؛ چندین هدف دارد: ایجاد نیروی رو به پایین (۲۵ تا ۳۰ درصد از نیروی رو به پایین خودرو [۳،۵]) در قسمت جلویی خودرو با راندمان آیرودینامیکی بالا، کاهش پسا ایجاد شده در چرخ‌های جلو و کانالیزه کردن جریان هوا به عقب‌ترین اجزا؛ از این‌رو، بال‌های جلوی خودروی مسابقه‌ای دارای نسبت بالابر به درگ بسیار بالایی هستند [۶ و ۴۹]. شدت بالای نیروهای آیرودینامیکی ایجاد شده در بال‌ها، طراحی سازه را حیاتی می‌کند. در بال جلویی خودروی فرمول یک، بارهای آیرودینامیکی به‌طور قابل توجهی کمتر از یک هواپیمای تجاری است، زیرا حداکثر سرعت و نسبت ابعاد بال به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است. هدف اصلی از طراحی ساختاری بال جلو، کاهش وزن سازه است. در یک بخش موتور اسپورت بسیار رقابتی، پارامترسازی صحیح حد بین وزن سبک و قابلیت اطمینان ساختاری ضروری است؛ علاوه‌بر این، مقررات فرمول یک FIA مقرر می‌دارد که تمام دستگاه‌های آیرودینامیک خودرو، از جمله بال جلو، جلو و بدنه، در میان سایر اجزای خارجی، باید مطابق با هواپیمای مرجع خودرو بی‌حرکت باشند [۷]؛ بنابراین، بال جلوی یک خودروی فرمول یک، دارای استحکام بسیار بالایی است، بنابراین تغییر شکل آن را به حداقل می‌رساند، که تأثیر منفی بر عملکرد آیرودینامیکی خودرو دارد [۸ و ۴۹].

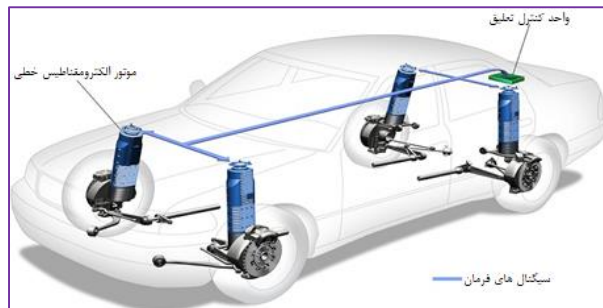
در مطالعه دینامیک خودروهای هیبریدی (نه خودروهای فرمول یک)، به کمک مدل‌های گوناگون به‌علت استفاده از مدل‌های خطی برای مدل‌سازی اجزاء خودرو در مقایسه با نتایج تجربی، تضاد مشاهده می‌شود؛ منشاء این تضاد، خاصیت غیر خطی اجزاء خودرو می‌باشد که سبب به‌وجود آمدن پدیده‌هایی از قبیل آشوب می‌شود که در تحقیقات مبتنی بر مدل‌های خطی، قابل مشاهده نیست؛ با ورود مدل‌های غیر خطی اجزاء تشکیل‌دهنده خودرو، مدل‌های معرفی شده برای خودرو، مورد بازبینی قرار گرفته‌اند. توسعه مدل‌های غیر خطی ابتدا با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی 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 به‌صورت دو خطی منظور شده است [۱۱ و ۵۰]؛ توسعه این مدل‌ها با معرفی دمپرهای الکترومغناطیسی در صنعت خودروسازی که دارای ویژگی غیر خطی و هیستریستیک هستند، وارد مرحله‌ای تازه شد؛ این نوع دمپرها دارای ویژگی‌های میراثی متفاوتی نسبت به دمپرهای متداول هستند [۱۳، ۱۲ و ۱۴]؛ اما مدل مورد استفاده در این تحقیقات با وجود توجه به ویژگی اجزاء غیر خطی ساده و از نوع یک‌چهارم با یک درجه آزادی است که در نظر نگرفتن جرم فنربندی نشده، سبب به‌وجود آمدن کاستی در این مدل می‌شود [۵۰].

این تحقیق به دو بلوک تقسیم می‌شود: در ابتدا، یک بررسی کامل، از جمله تجزیه و تحلیل مهم‌ترین پارامترهای آیرودینامیکی و ساختاری، در میان انتخاب دقیق و تجزیه و تحلیل مناسب‌ترین مواد انجام می‌شود؛ علاوه‌بر این، دو کامپوزیت بر اساس خواص مکانیکی تقویت‌کننده و ماتریس، بسته‌بندی و حجم اجزای تشکیل‌دهنده ایجاد می‌شوند؛ در نهایت، یک بال جلویی ۲۰۲۲ با استفاده از مرتبط‌ترین ویژگی‌های آیرودینامیکی طراحی شده و اجزای ساختاری آن بر اساس تحلیل حساسیت ساخته شده‌اند؛ همچنین طراحی و بررسی آیرودینامیک یک خودروی هیبریدی ۲۰۲۰ از نظر فیزیک دینامیکی و فشار و تنش وارد به بدنه با نرم‌افزار MATLAB 2021 مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار می‌گیرد [۴۹، ۵۰].

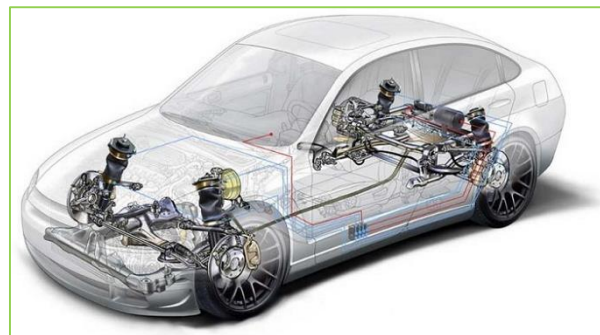
۲. متن اصلی

۱.۲. سیستم تعلیق خودرو و انواع آن

وظیفه اصلی سیستم تعلیق، جلوگیری از انتقال ارتعاشات به داخل کابین و قطعات خودرو و در نتیجه ایجاد راحتی سفر و همچنین مسیردهی به خودرو می‌باشد؛ این سیستم دقیقاً بین شاسی و چرخ‌های خودرو، کار گذاشته شده است. وظیفه جلوگیری از انتقال ارتعاشات، توسط فنرها و کمک فنرهای به کار رفته در خودرو انجام می‌پذیرد و وظیفه دوم یعنی مسیردهی و فرمان‌دهی به خودرو توسط چرخ‌ها و نگهدارنده‌های آن انجام می‌گیرد. در صورت عدم وجود این سیستم، قطعات داخلی خودرو به سبب ارتعاشات وارده به خودرو و لرزش‌های بسیار زیاد در هنگام حرکت، عمر کوتاهی داشته و همچنین سفر برای سرنشینان بسیار طاقت‌فرسا و آزار دهنده می‌شد [۵۰]. امروزه یکی از مهم‌ترین عوامل در راحتی خودرو، نوع سیستم تعلیق و کیفیت به کار رفته در خودرو می‌باشد که نقش پررنگی در جذب بازار فروش برای آن خودرو دارد؛ این سیستم معمولاً اگر اشکالی داشته باشد، از طریق دیاگ زدن خودرو، قابل شناسایی می‌باشد. به‌طور کلی وظیفه سیستم تعلیق خودرو، ثابت نگه‌داشتن ارتفاع خودرو در حال حرکت، کاهش ارتعاشات و لرزش‌های ناشی از ضربات، مسیردهی به چرخ‌ها، تحمل وزن خودرو و حفظ تماس چرخ‌های خودرو با جاده می‌باشد، که همه این وظایف با استفاده از قطعاتی که پیش‌تر ذکر شده، انجام می‌گیرد. انواع مختلفی از سیستم‌های تعلیق خودرو وجود دارد که اصلی‌ترین آن‌ها به سه دسته سیستم مک فرسون، تعلیق مستقل و تعلیق طبق دار دابل تقسیم می‌گردد [۵۰].



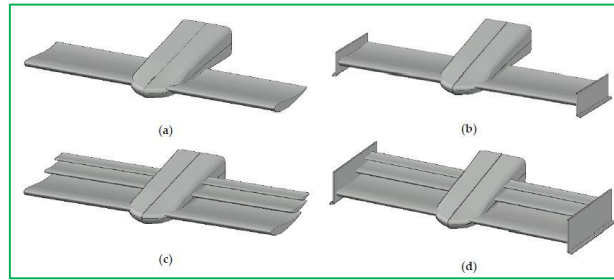
شکل (۱) شماتیکی از سیستم تعلیق خودرو [۵۰]



شکل (۲) نمایی واقعی از تعلیق خودروی هیبریدی [۵۰]

۲.۲. طراحی پیکربندی‌های خط پایه بال جلو خودروی فرمول یک

چهار پیکربندی خط پایه (شکل ۱) برای تجزیه و تحلیل تأثیر فلپ‌ها و صفحات انتهایی در عملکرد آیرودینامیکی و ساختاری بال طراحی شده است؛ آن‌ها بر اساس پیکربندی سه عنصری دو بعدی بهینه شده توسط Gorostidi و همکاران هستند [۱۲ و ۴۹]؛ از طریق تجزیه و تحلیل چندین ایرفویل با کارایی بالا و درجات آزادی چندگانه (وتر، زوایای حمله، همپوشانی بین عناصر، در میان سایر ملاحظات جزئی)؛ این چهار پیکربندی ۹۰۰ میلی‌متر در جهت دهانه اکستروود شده‌اند، که حداکثر طول مجاز توسط مقررات فرمول یک FIA 2022 برای بال‌های جلو است؛ علاوه بر این، پیکربندی‌های خط پایه برای انجام تجزیه و تحلیل اجزای ساختاری بال جلو به دلیل شکل پیچیده بال ۲۰۲۲ (متشکل از ۲۱ بخش دو بعدی مختلف) استفاده می‌شوند. در مقاله مربوطه، پس از تجزیه و تحلیل ساختاری و حساسیت، اجزای بال انتخاب شده در بال جلویی فرمول یک طراحی شده ۲۰۲۲ پیاده‌سازی شدند. ویژگی‌های اصلی این پیکربندی دو بعدی، در جدول ۱ ارائه شده است [۴۹].



شکل ۳) پیکربندی‌های پایه: (الف) یک عنصر بدون صفحات انتهایی. (ب) یک عنصر با صفحات انتهایی. (ج) سه عنصر بدون صفحات انتهایی. (د) سه عنصری با صفحات انتهایی

جدول (۱) ویژگی‌های بال جلو سه عنصری F1 دو بعدی که توسط گوروستیدی و همکاران به دست آمده است [۱۱ و ۴۹].

ویژگی	نماد	مقدار	واحد
ایرفویل	S1210	-	-
وتر عنصر اصلی	c ₁	250	mm
وتر فلپ اولیه	c ₂	125	mm
وتر فلپ ثانویه	c ₃	62.5	mm
زاویه حمله عنصر اصلی	a ₁	3	0
زاویه حمله فلپ اولیه	a ₂	6	0
زاویه حمله فلپ ثانویه	a ₃	9	0
شکاف بین عناصر ۱ و ۲	G ₁₂	19.43	mm
فاصله بین عناصر ۲ و ۳	G ₂₃	16.27	mm
همپوشانی بین عناصر ۱ و ۲	O ₁₂	29.87	%
همپوشانی بین عناصر ۲ و ۳	O ₂₃	35.46	%
فاصله تا صفحه مرجع	h _{RP}	75	mm
فاصله تا کف	h	160	mm

پیکربندی ساده یک عنصری (a) مقادیر مرجع را برای شبیه‌سازی‌های بیشتر فراهم می‌کند. پیکربندی دوم (b) دارای صفحات انتهایی است که اختلاف فشار را بر روی سطوح بالا و پایین بال افزایش می‌دهد و کشش و گرداب القایی را کاهش می‌دهد [۲۳ و ۴۹]. پیکربندی سوم (c) برای تجزیه و تحلیل تأثیر نسبت ابعاد در رفتار ساختاری فلپ و تأثیر فلپ‌ها بر عملکرد کلی بال طراحی شده است. در آخرین پیکربندی (d) (بال سه عنصری با صفحات انتهایی)، دستگاه‌های نوک بال یک اتصال مکانیکی جدید بین عناصر ایجاد می‌کنند و بنابراین رفتار ساختاری این پیکربندی شبیه بال‌های جلویی فرمول یک است [۴۹].

۳.۲. طراحی بال جلو فرمول یک ۲۰۲۲

بال جلوی ۲۰۲۲ اقتباسی از یک پیکربندی دو بعدی سه عنصری است که توسط Gorostidi و همکارانش انجام شده است [۱۲ و ۴۹]. حجم اختصاص داده شده برای عناصر بال جلو (عنصر اصلی و فلپ‌ها) از Art مشتق شده است. A21 به ۲۱ بخش تقسیم می‌شود. پیکربندی ایرفویل‌ها در هر بخش از طریق به حداکثر رساندن نیروی رو به پایین ایجاد شده، انجام می‌شود؛ بنابراین، مهم است که پارامترهای تأثیر اصلی را انتخاب کنید: مساحت بال، زاویه حمله و شکاف و همپوشانی بین عناصر. اولین پارامتری که باید اصلاح شود، ناحیه نمای بالا است که بدون تغییر پیکربندی بهینه دو بعدی تأثیر متناسبی بر نیروی رو به پایین دارد؛ بدین ترتیب، کل وتر هر بخش برای مطابقت با حداکثر وتر مجاز توسط حجم مرجع بال جلو، مقیاس می‌شود. پارامتر دوم برای تطبیق زاویه حمله است [۴۹]. با توجه به علاقه به افزایش نیروی رو به پایین، پارامتری برای به حداکثر رساندن است؛ با این حال، این فقط در بخش‌هایی جالب است که موقعیت لبه انتهایی با طول حجم مرجع محدود می‌شود، در غیر این صورت ناحیه نمای بالا کاهش می‌یابد. به طور کلی، ۱۸ بخش با طول محدود می‌شوند و بنابراین زاویه آن‌ها برای دست‌یابی به حداکثر زاویه حمله کل مجاز با حداکثر حجم مجاز توسط Art افزایش می‌یابد؛

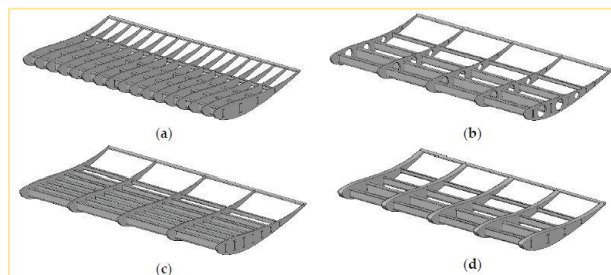
از طرف آن، مقاطع محدود شده توسط ارتفاع با توجه به شکاف و همپوشانی بین عناصر اصلاح می‌شوند، تا با حداکثر طول مجاز توسط مقررات در هر بخش مطابقت داشته باشند [۴۹].



شکل (۴) بال جلوی ۲۰۲۲ متصل به خودروی فرمول یک ۲۰۱۸ [۴۹].

۴.۲. طراحی اجزای سازه‌ای

اگرچه بال‌های جلویی کنونی دارای یک ساختار کامپوزیت ساندویچی با پوسته تقویت شده با الیاف و یک فضای داخلی پلیمری با دنده‌های داخلی هستند، این تحقیق از ساختار معمولی، بر اساس دنده‌ها، اسپارها و پوست، شبیه به هواپیماهای تجاری استفاده می‌کند [۲۴]. ساختار داخلی بال برای تجزیه و تحلیل تأثیر هر جزء در رفتار ساختاری نهایی، ماهیت تنش‌ها و کرنش‌های اصلی آن‌ها و تأثیر مهم‌ترین پارامترهای طراحی به یک بررسی کامل ارائه شد. ابتدا، یک پیکربندی خط پایه برای به دست آوردن اولین رویکرد از رفتار ساختاری بال طراحی شد؛ این پیکربندی بر اساس طراحی مهندسی کیفی است و از پنج دنده، پنج اسپار و یک پوست تشکیل شده است. هنگامی که پیکربندی خط پایه ایجاد شد، چندین طرح برای تجزیه و تحلیل عملکرد آن‌ها ساخته شد؛ برخی از این طرح‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. اولین اجزایی که طراحی می‌شوند، اسپارها هستند که تیرهای طولی بال هستند؛ عملکرد اصلی آن‌ها جلوگیری از تغییر شکل عمودی بال و جذب بارهای وارده از پوست است؛ آن‌ها در معرض تنش برشی قرار دارند و برای این مورد، مدول برشی به یک عامل حیاتی تبدیل شد. اسپارهای طراحی شده از یک اکستروژن معمولی در امتداد جهت عرض دهانه تشکیل شده است که مقطع آن بر اساس یک تیر I است که از نظر نسبت سختی به وزن، بهترین انتخاب است. تعداد اولیه اسپارها در پنج (چهار تیر با مقطع I معمولی و یک تیر در لبه عقب با عرض ۱۰ میلی‌متر که بخش آن با هندسه ایرفویل مطابقت دارد) تنظیم می‌شود که موقعیت آن‌ها عمدتاً به دو دلیل اصلی در قسمت جلویی بال قرار می‌گیرد؛ توزیع فشار در نزدیکی لبه جلویی بالاتر است و ایرفویل S12010 بعد از موقعیت حداکثر ضخامت، بخش بسیار نازک‌تری دارد؛ با این حال، به دلیل رفتار ساختاری بال، لبه دنباله‌دار بیشترین تغییر شکل را در بال به دست می‌آورد و به همین دلیل است که آخرین اسپار به یک جزء حیاتی در سازه تبدیل می‌شود. یکی دیگر از پارامترهای مهم اسپارها، اندازه آن‌هاست. با توجه به انتخاب ایرفویل کمبردار پیچیده فوق‌الذکر، اندازه هر اسپار باید با محیط تنظیم شود؛ از این رو، مناسب‌ترین رویکرد برای پارامترسازی اندازه اسپارها، تنظیم آن بر اساس طول عمودی دنده در هر موقعیت است؛ در نهایت، شکل اسپار با توجه به سه پارامتر آزادی، تجزیه و تحلیل می‌شود: عرض ریشه، عرض سر و طول سر (همه آن‌ها به صورت درصدی از طول ریشه اندازه‌گیری می‌شوند). به طور کلی، در مجموع ۳۲۴ پیکربندی اسپار تجزیه و تحلیل شده است [۴۹].



شکل (۵) نمونه‌هایی از طرح‌های سازه‌ای بال: (الف) ساختار بال با دنده‌های با چگالی بالا. (ب) دنده‌هایی با سوراخ‌های دایره‌ای اجرا شده؛ (ج) ساختار

بال با اسپارهای با چگالی بالا. (د) دنده‌هایی با ضخامت بالا [۴۹]



اجزای دوم برای طراحی دنده‌ها هستند؛ آن‌ها عنصر عرضی بال هستند که شکل آن‌ها ایرفویل است و سختی بال را پشتیبانی می‌کنند؛ دنده‌ها در معرض تنش‌های فشاری معمولی قرار دارند؛ این تنش‌ها را می‌توان در ضریب فشار در هر دنده به دست آورد، جایی که حداکثر بار در قسمت جلویی وجود دارد؛ علاوه بر این، دنده‌های نزدیک نوک به دلیل از دست دادن کارایی آیرودینامیکی در بال، بار کمتری دارند. آنالیز دنده در سه درجه آزادی انجام می‌شود:

تعداد دنده‌ها در ساختار، ضخامت و سوراخ‌های دایره‌ای. آخرین پارامتر برای کاهش وزن سازه، ضروری است؛ زیرا مرکز دنده‌ها ناحیه‌ای با تنش‌های کمتر است؛ این حفره‌ها همچنین مدور هستند، زیرا تنش‌ها را بهتر از هندسه‌های تیز مانند مثلث یا مربع جذب می‌کنند؛ به طور کلی در مقالات، در مجموع ۸۰ پیکربندی از دنده، مورد بررسی قرار گرفته است. توجه به این نکته بسیار مهم است که هر دنده حجم متفاوتی برای هر مجموعه اسپار و ضخامت پوست دارد؛ در نهایت، پوست جزء خارجی بال است. در معرض بارهای خمشی بالایی قرار دارد، که به تعداد دنده‌ها و اسپارهای بال بستگی دارد. پوست بال هواپیما باید در برابر خوردگی مقاوم باشد، زیرا پوشش‌ها وزن ساختاری را افزایش می‌دهند؛ برعکس، بال‌های فرمول یک عمر کوتاهی دارند و بنابراین، خوردگی مشکلی ندارد. پوست در سراسر یک اکستروژن داخلی سطح بال ایجاد شده و با پنج ضخامت مختلف طراحی شده است. حتی اگر ضخامت پوست بسیار کم باشد، حجم آن در بین تمام اجزاء بیشتر است و در نتیجه اهمیت زیادی در طراحی ساختاری خواهد داشت؛ علاوه بر این، ذکر این نکته مهم است که ضخامت بیشتر، باعث کاهش برش دنده و اسپار می‌شود که در طراحی سازه این قضیه به درستی درمان می‌شود.

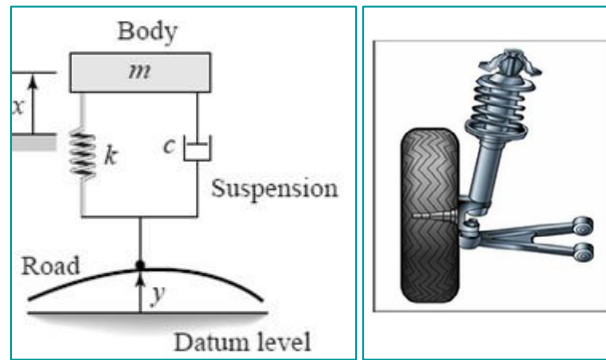
۵.۲. نحوه کار تعلیق در خودروهای هیبریدی

اگر جاده‌ها کاملاً صاف بودند و بدون هیچ دست‌اندازی، نیازی به سیستم تعلیق نبود؛ ولی جاده‌ها از صاف بودن، فاصله زیادی دارند؛ حتی جاده‌هایی هم که به تازگی آسفالت شده‌اند، دارای ناصافی‌هایی جزئی هستند که می‌توانند بر چرخ‌های خودرو، تأثیر بگذارند؛ این ناصافی‌ها، بر چرخ‌ها نیرو وارد می‌کنند و طبق قوانین حرکت نیوتن، همه نیروها جهت و اندازه دارند. یک دست‌انداز باعث می‌شود تا چرخ به صورت عمودی، بر سطح جاده، بالا و پایین برود؛ البته نیرو، به بزرگی و کوچکی دست‌انداز بستگی دارد؛ در عین حال، چرخ خودرو هنگامی که از ناهم‌سطحی عبور می‌کند، یک شتاب عمودی را نیز به دست می‌آورد [۵۰].

بدون یک نظام مداخله‌کننده، همه انرژی عمودی چرخ، به شاسی که در همان جهت در حال حرکت است، انتقال می‌یابد؛ در چنین شرایطی، ممکن است که چرخ‌ها به طور کامل از جاده جدا شده و سپس، تحت نیروی جاذبه، مجدداً با سطح جاده برخورد کنند؛ چیزی که شما نیاز دارید، سیستمی است که انرژی چرخ را که دارای شتاب عمودی است، در حال عبور از دست‌انداز، جذب کرده و به شاسی و بدنه اجازه دهد تا به راحتی حرکت کنند؛ مطالعه نیروهای موجود در یک خودروی متحرک را دینامیک خودرو می‌نامند و برای درک بهتر ضرورت وجود یک سیستم تعلیق، در وهله اول نیاز به دانستن بعضی مفاهیم می‌باشد. اکثر مهندسان اتومبیل، دینامیک خودروی متحرک را از دو دیدگاه بررسی می‌کنند:

- سواری - توانایی خودرو برای به نرمی عبور کردن از یک جاده پر دست‌انداز.
- دست فرمان - امنیت خودرو در شتاب، ترمز و در پیچ‌ها و دورها.

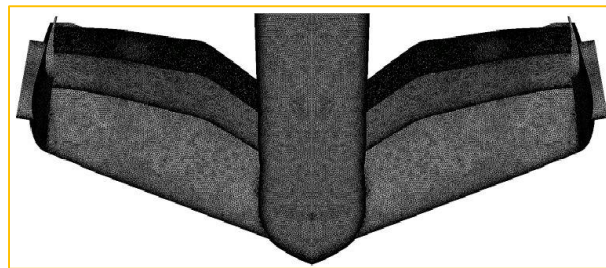
این دو خصیصه را می‌توان به صورت عمیق‌تری در سه بخش مهم توضیح داد - ایزولاسیون جاده، نگهدارندگی جاده و پیچ. در مقاله‌ای این اجزاء توضیح داده شده و به این می‌پردازد که مهندسان چگونه سعی بر حل این مشکلات، به صورت جداگانه و بسته به نوع خودشان دارند [۵۰].



شکل ۶ سیستم یک درجه آزادی ¼ خودرو [۵۰]

۶.۲. بررسی طراحی مش

شبیه‌سازی‌های دینامیک سیال این تحقیق با یک مش هیبریدی، انجام شده است (شکل ۴) که به دلیل داشتن بالاترین نسبت دقت به هزینه، مناسب است. از یک لایه مرزی ساختاریافته از ۳۰ عنصر و روش‌های بدون ساختار در سایر مناطق حوزه، تشکیل شده است؛ از طرف آن، مش ساختار داخلی بال جلو با روش‌های ساختار یافته (هگزادرون) انجام می‌شود.



شکل ۷ مش مونتاژ بال جلوی فرمول یک ۲۰۲۲

انتخاب دامنه سیال به دلیل وجود جاده در زیر خودرو، یکی از چالش‌برانگیزترین تصمیمات است؛ حتی اگر چندین اندازه توسط نویسندگان مختلف با نتایج دقیق استفاده شود، چیزی واضح است: مناسب‌ترین توپولوژی، یک دامنه مکعبی است. اشتون و همکاران [۳۷]، یک دامنه مکعبی با ارتفاع ۸ H، عرض ۱۴ H، بالادست، ۱۳ H، پایین‌دست و ۱۹ H جریان متقاطع در تجزیه و تحلیل نایر-استوکس با میانگین رینولدز (RANS) و شبیه‌سازی گردابی جدا شده، استفاده کردند. DES روش‌هایی برای مدل‌های واقعی خودرو، که در آن ارتفاع خودرو است. هفت و همکاران [۳۸] از طول ماشین برای تنظیم اندازه‌های بالادست (۲ لیتر) و پایین‌دست (۷ لیتر) دامنه استفاده کرد. آرونو و همکاران [۱۳] در مطالعه خود بر روی بال جلویی F1 2021 از یک دامنه سیال بر اساس ارتفاع استفاده کردند؛ آن‌ها ارتفاع ۵ H، ۳ H بالادست و ۱۰ H پایین‌دست را تعیین کردند؛ آن‌ها از همان ارتفاع اشتون و طول جریان متقاطع (۱۱ وات) استفاده کردند. در محافظه‌کارانه‌ترین حوزه، سیموندز و همکاران [۳۹] ارتفاع ۱۰ لیتر، عرض ۲۰ لیتر، بالادست ۱۲ لیتر و پایین‌دست ۱۵ لیتر استفاده می‌شود؛ علاوه بر این، ذکر این نکته مهم است که اشتون و همکاران [۳۷]، Heft [38] و Simmonds [39] از شرایط مرزی متقارن در صفحه مرکزی خودرو استفاده نکردند، که دلالت بر هزینه محاسباتی اضافی دارد. در تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده توسط نویسندگان فوق‌الذکر، حوزه سیال انتخاب شده ابعاد به کار گرفته شده توسط سیموندز و همکاران را نشان می‌دهد [۳۹ و ۴۹]؛ اما با استفاده از وتر به عنوان یک روش اندازه‌گیری نسبی. تعداد گره‌ها در ایرفویل باید به اندازه‌ای باشد که هندسه اصلی را به طور دقیق نشان دهد و مستقل از شبکه در نظر گرفته شود. به دنبال تجربه نویسندگان با ایرفویل‌های مشابه، ۲۵۰ گره بودند؛ حداکثر در لبه جلو، با حداقل فاصله شبکه مماسی ۰,۰۰۲ و حداقل در محل حداکثر ضخامت، با حداکثر فاصله شبکه مماسی ۰,۰۰۶ است. با توجه به درمان لایه مرزی، "مدل‌های مبتنی بر E و مبتنی بر ω گزینه‌های درمان دیوار غیر حساس y^+ را از طریق رویکرد تابع دیوار [۴۰] ارائه می‌دهند. با استفاده از توابع دیوار، فاصله نرمال زمانی که $y^+ \approx 30$ باشد، بهینه در نظر گرفته می‌شود (اگر کمتر باشد، دقت تنش برشی دیوار و انتقال حرارت را می‌توان به طور جدی کاهش داد) [۴۱]؛ به این ترتیب، یک $y^+ = 30$ مقدماتی و تحلیل پسینی از y^+ محاسبه شده



برای اطمینان از عنوان صحیح لایه مرزی انجام می‌شود؛ لایه مرزی دوم؛ شرط مش‌بندی، اطمینان از مش‌بندی کامل آن است: ضخامت نظری لایه مرزی محاسبه می‌شود [۴۲ و ۴۹] و تعداد عناصر مطابق با کاسترو [۴۲] ۳۰ تعیین می‌شود؛ بنابراین، از طریق روابط ریاضی بین سه پارامتر فوق‌الذکر (حداقل نرمال)، فاصله شبکه، حداکثر ضخامت و تعداد عناصر، نرخ رشد ۱٫۱ تعیین شد؛ پس از به‌دست آوردن تمام پارامترهای مش، لایه مرزی با منشورهای مثلثی از طریق استفاده از دیوار خارجی معمولی تولید می‌شود [۴۹].

۷.۲. شبیه‌سازی سیستم تعلیق $\frac{1}{4}$ یک خودروی هیبریدی

اگر بخواهیم یک سیستم تعلیق طبق‌دار دوبل را به‌صورتی کلی مورد بررسی قرار دهیم، برای شبیه‌سازی با استفاده از پارامترها معادله حرکت سیستم یک‌چهارم خودرو به‌صورت زیر در می‌آید:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c\dot{y} + ky \quad (1)$$

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

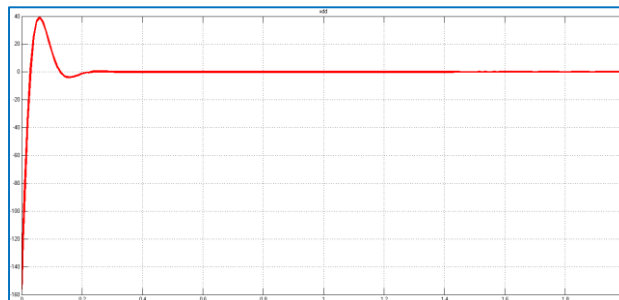
$$m = 320 \text{ kg}$$

$$k = 500000 \text{ N/m}$$

$$c = 15020 \text{ N.s/m}$$

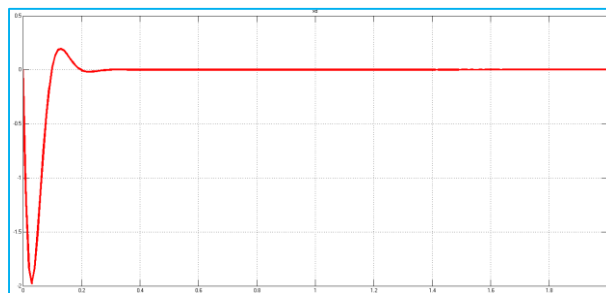
$$320\ddot{x} + 15020\dot{x} + 500000x = 15020\dot{y} + 500000y + u \quad (2)$$

با توجه به روابط محاسبه شده در بالا، نتایج شبیه‌سازی را برای زمانی که ورودی جاده‌ای وجود دارد، به شکل زیر می‌توان نشان داد [۵۰]:

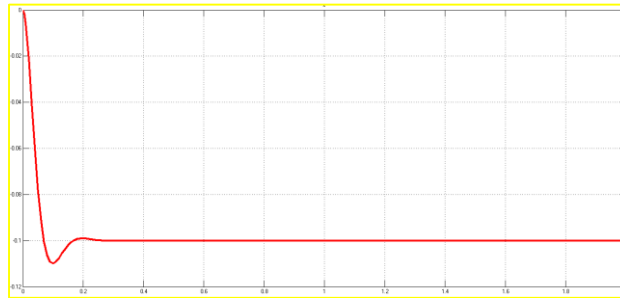


شکل ۸) نمودار شتاب خودرو [۵۰]

همچنین نمودارهای مربوط به جابجایی و سرعت خودروی هیبریدی مورد بحث، در ادامه نشان داده شده است.

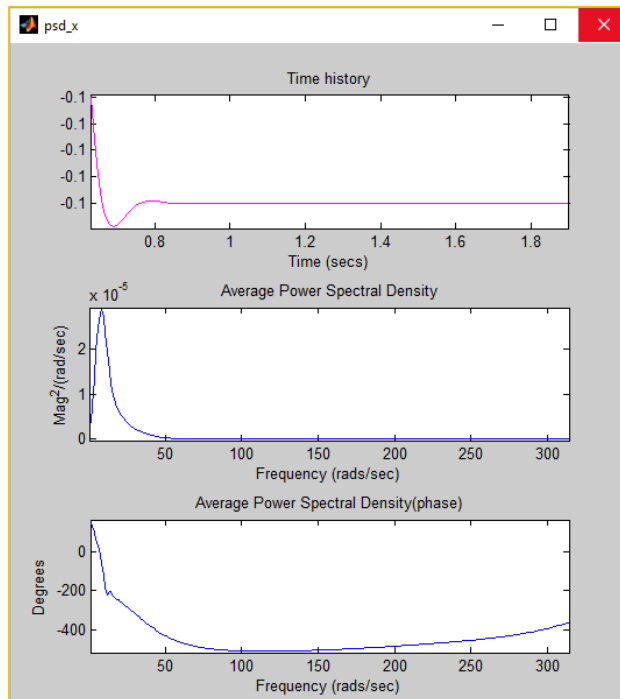


شکل ۹) نمودار سرعت خودرو [۵۰]



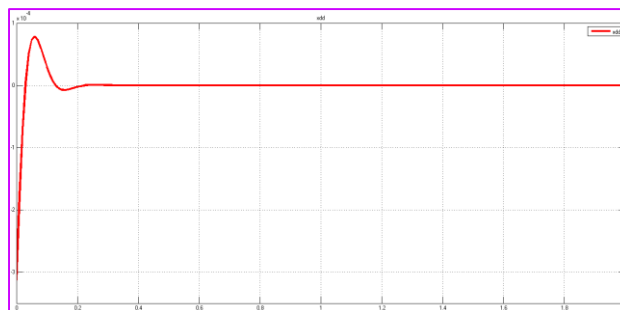
شکل ۱۰) نمودار جابجایی خودرو [۵۰]

همچنین نمودار چگالی طیفی توان آرا می توان بدین صورت نشان داد:

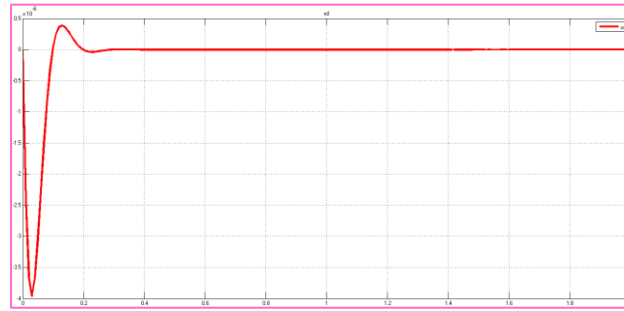


شکل ۱۱) نمودار PSD [۵۰]

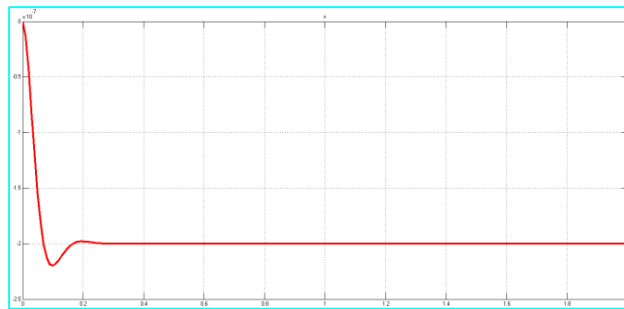
نتایج شبیه سازی را برای زمانی که ورودی جاده ای برای خودروی مورد بحث وجود ندارد، می توان به صورت نمودارهای زیر نشان داد.



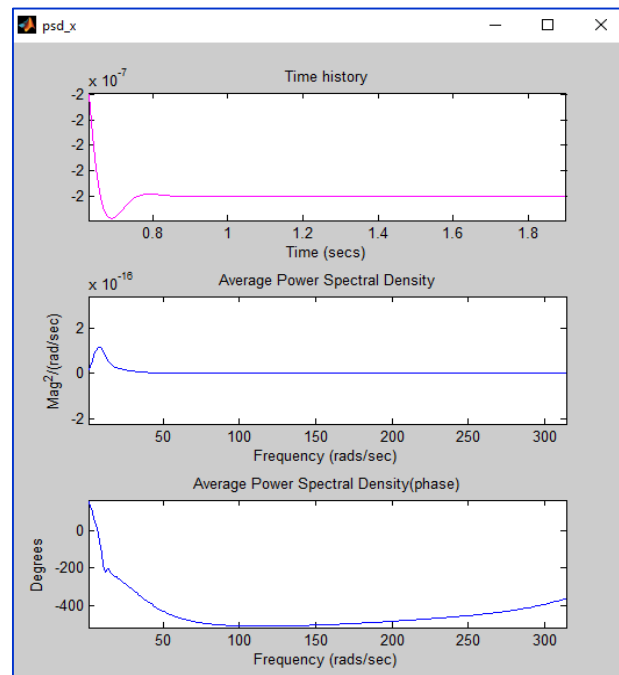
شکل ۱۲) نمودار شتاب ثانویه



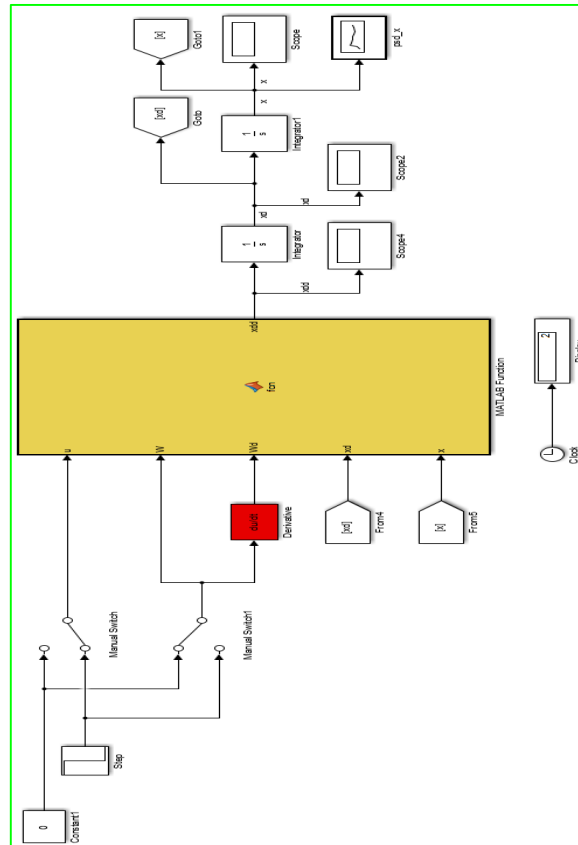
شکل ۱۳) نمودار سرعت ثانویه خودروی هیبریدی [۵۰]



شکل ۱۴) نمودار جابجایی ثانویه



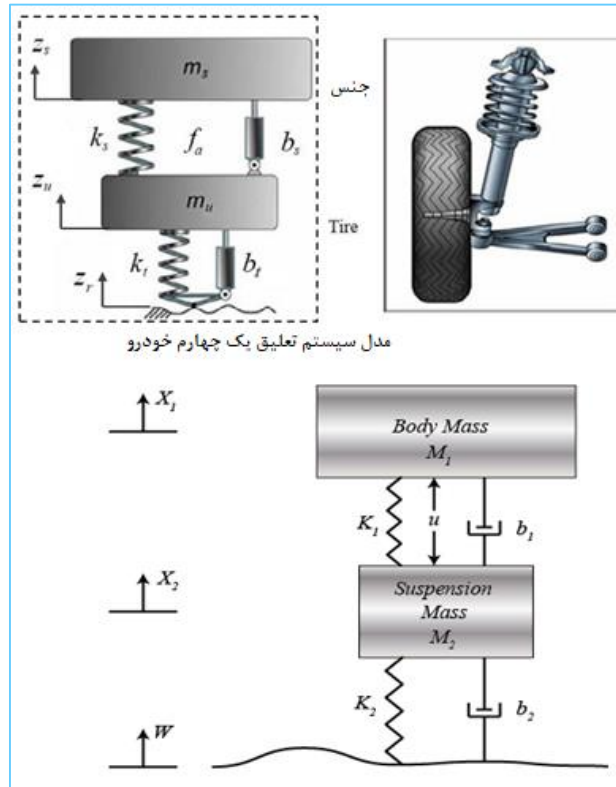
شکل ۱۵) نمودار PSD ثانویه [۵۰]



شکل ۱۶) نمودار کلی شبیه‌سازی شده در Simulink

۸.۲. شبیه‌سازی سیستم تعلیق $\frac{1}{4}$ درجه آزادی یک خودروی هیبریدی

اگر بخواهیم یک سیستم تعلیق طبق‌دار دوپل را به‌صورتی کلی مورد بررسی قرار دهیم، برای شبیه‌سازی با استفاده از پارامترها معادله حرکت سیستم یک‌چهارم خودرو با دو درجه آزادی به‌صورت زیر در می‌آید:



شکل ۱۷) مدل سیستم تعلیق یک چهارم [۵۰]

جدول ۲) معرفی پارامترهای مشخصه سیستم مکانیکی تعلیق [۵۰]

پارامترهای سیستم		
M ₁	توده بدنه اتوبوس 1/4	2500 kg
M ₂	جرم تعلیق	320 kg
K ₁	ثابت فنر سیستم تعلیق	80,000 N/m
K ₂	ثابت فنر چرخ و لاستیک	500,000 N/m
b ₁	ثابت میرایی سیستم تعلیق	350 N.s/m
b ₂	ثابت میرایی چرخ و لاستیک	15,020 N.s/m

معادلات مربوط به محاسبات دینامیک سیستم فرنبندی خودروهای سبک به شکل زیر است:

$$\sum \vec{F} = M\ddot{X}$$

$$M_1 \ddot{X}_1 = -b_1(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - K_1(X_1 - X_2) + U$$

$$M_2 \ddot{X}_2 = b_1(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + b_2(\dot{W} - \dot{X}_2) + K_1(X_1 - X_2) + K_2(W - X_2) - U$$

برای به دست آوردن تابع تبدیل، باید تبدیل لاپلاس معادلات دینامیکی فوق به دست آید:

$$M_1 s^2 X_1(s) = -b_1 s(X_1(s) - X_2(s)) - K_1(X_1(s) - X_2(s)) + U(s)$$

$$M_2 s^2 X_2(s) = b_1(sX_1(s) - sX_2(s)) + b_2 s(W(s) - X_2(s)) + K_1(X_1(s) - X_2(s)) + K_2(W(s) - X_2(s)) - U(s)$$

$$\begin{pmatrix} M_1 s^2 + b_1 s + K_1 & -(b_1 s + K_1) \\ -(b_1 s + K_1) & M_2 s^2 + (b_1 + b_2)s + (K_1 + K_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1(s) \\ X_2(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U(s) \\ (b_2 s + K_2)W(s) - U(s) \end{pmatrix}$$

$$AX=U$$

$$X=\text{inv}(A)U$$

$$\det(A) = (M_2 s^2 + (b_1 + b_2)s + (K_1 + K_2)) * (M_1 s^2 + b_1 s + K_1) + (b_1 s + K_1)^2$$

$$\begin{pmatrix} X_1(s) \\ X_2(s) \end{pmatrix} =$$

$$\frac{1}{\det(A)} \begin{pmatrix} M_2 s^2 + (b_1 + b_2)s + (K_1 + K_2) & (b_1 s + K_1) \\ (b_1 s + K_1) & M_1 s^2 + b_1 s + K_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U(s) \\ (b_2 s + K_2)W(s) - U(s) \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} X_1(s) \\ X_2(s) \end{pmatrix} = \frac{1}{\det(A)} \begin{pmatrix} M_2 s^2 + b_1 s + K_2 & b_1 b_2 s^2 + (b_1 K_2 + b_2 K_1) s + K_1 K_2 \\ -M_1 s^2 & M_1 b_2 s^3 + (M_1 K_2 + b_1 b_2) s^2 + (b_1 K_2 + b_2 K_1) s + K_1 K_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U(s) \\ W(s) \end{pmatrix}$$

$$G_1(s) = \frac{X_1(s) - X_2(s)}{U(s)} = \frac{\det(A)}{(M_1 + M_2) s^2 + b_1 s + K_2}$$

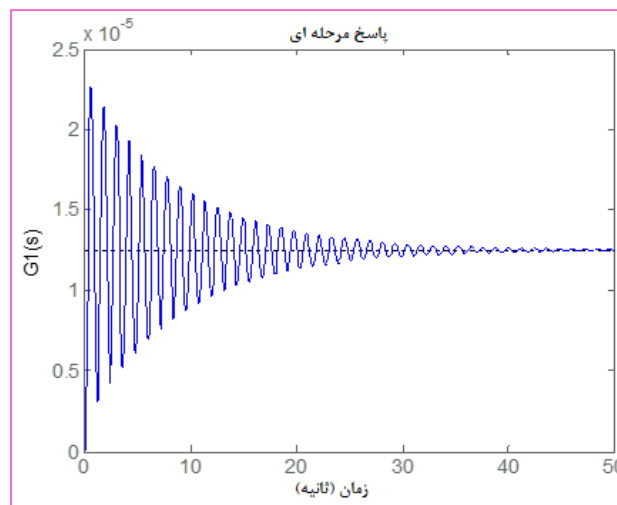
$$G_2(s) = \frac{X_1(s) - X_2(s)}{W(s)} = \frac{-M_1 b_2 s^3 - M_1 K_2 s^2}{\det(A)}$$

$$G_1 = 2820 s^2 + 15020 s + 500000$$

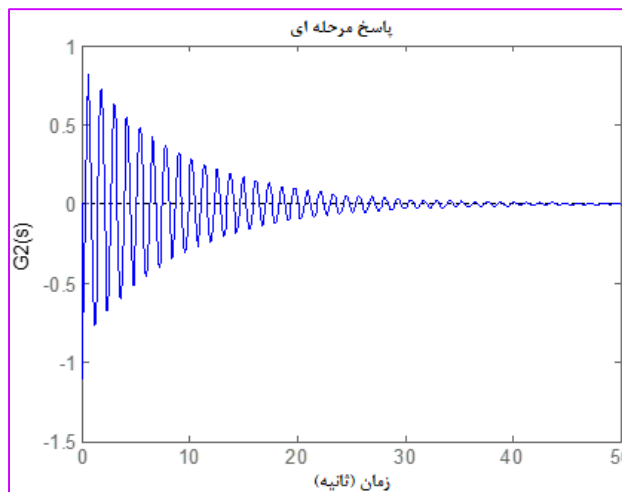
$$800000 s^4 + 3.854e07 s^3 + 1.481e09 s^2 + 1.377e09 s + 4e10$$

$$G_2 = -3.755e07 s^3 - 1.25e09 s^2$$

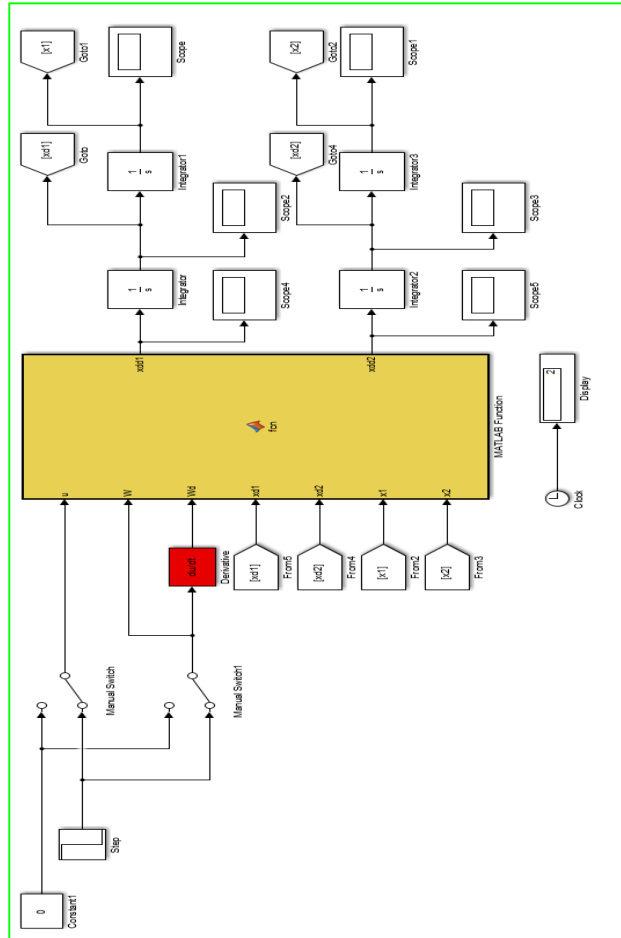
$$800000 s^4 + 3.854e07 s^3 + 1.481e09 s^2 + 1.377e09 s + 4e10$$



شکل ۱۸) پاسخ‌های زمانی سیستم نسبت به نیروی ورودی [۵۰]

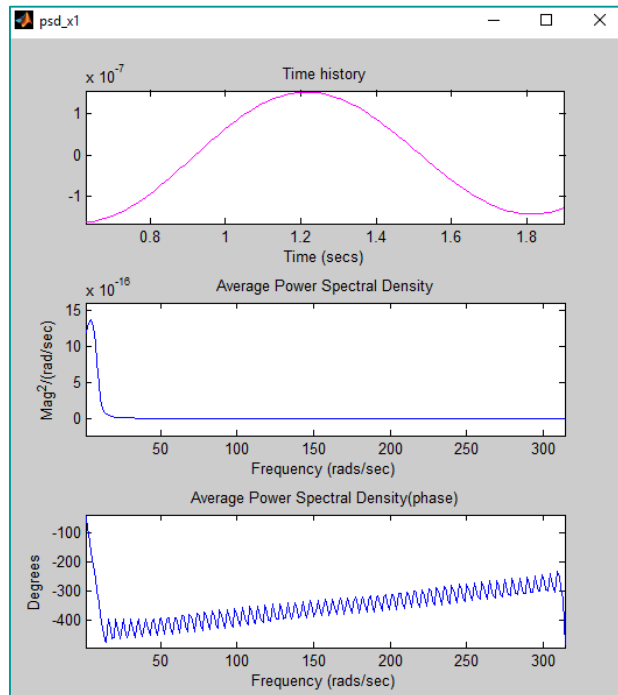


شکل ۱۹) پاسخ‌های زمانی سیستم نسبت به نیروی ورودی

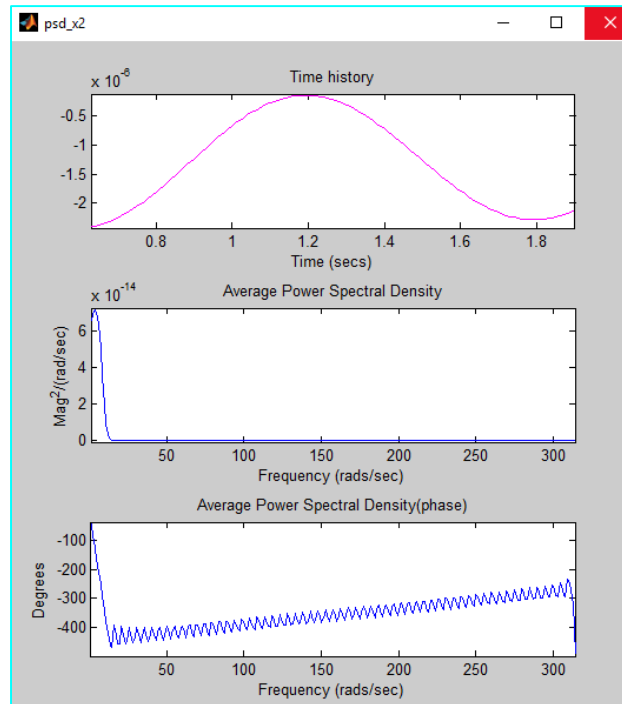


شکل ۲۰) نمودار کلی شبیه‌سازی شده در Simulink حالت ثانویه

همچنین نمودار چگالی طیفی توان ثانویه را می‌توان به شکل زیر نمایش داد:



شکل (۲۱) نمودارهای چگالی طیفی توان متوسط و میزان متوسط



شکل (۲۲) نمودارهای چگالی طیفی توان متوسط و میزان فاز میانگین

۳. نتیجه گیری

بدون شک سیستم تعلیق، یکی از حیاتی‌ترین زیرسیستم‌های یک خودرو محسوب می‌شود؛ این سیستم وظیفه خنثی نمودن ارتعاشات حاصل از ناهمواری‌های سطح جاده که به خودرو وارد می‌شوند، را برعهده دارد. اهمیت سیستم تعلیق در حفظ راحتی سرنشینان و تضمین تماس تایر با سطح جاده که یک رانندگی ایمن و لذت‌بخش را به ارمغان خواهد آورد، نمایان خواهد شد. در این پروژه، جهت حفظ سادگی محاسبات، از مدل یک‌چهارم سیستم تعلیق یک خودرو یک و دو درجه آزادی جهت بررسی ارتعاشات وارده به بدنه که در نهایت به سرنشینان انتقال پیدا خواهد کرد، استفاده شده است و پس از شبیه‌سازی سیستم تعلیق اتوبوس و بررسی پاسخ آن نسبت به ورودی‌های جاده، اقدام به طراحی یک سیستم تعلیق فعال به منظور دفع اغتشاشات خواهد شد و در نهایت مقایسه‌ای بین دو حالت از سیستم‌های تعلیق اشاره شده، به عمل آمد و تفاوت‌ها در سرعت دفع ارتعاشات مشاهده گردید؛ همچنین این تحقیق مشاهدات جالبی در مورد عملکرد آیرودینامیکی و ساختاری دستگاه‌های بال چند عنصری ارائه می‌کند، که می‌تواند برای خوانندگان مجذوب دستگاه‌های آیرودینامیکی خودروهای استثنایی فرمول یک و خوانندگان علاقه‌مند به ساخت بال خود که می‌خواهند نقطه شروعی برای تجزیه و تحلیل رفتار ساختاری داشته باشند، مفید باشد؛ علاوه بر این، این تحقیق دانشی را در مورد تأثیر قوانین فرمول یک FIA 2022 بر عملکرد بال به ارمغان می‌آورد.



مراجع

- [1] Katz, J. Race Car Aerodynamics: Designing for Speed; R. Bentley: Cambridge, MA, USA, 1995; ISBN 978-0-8376-0142-7.
- [2] Lau, C.S.; Srigrarom, S. Flow field around the front wing of Formula One racing car model: BAR Honda 003 and MP4-21 under ground e_ect. *Int. J. Aerodyn.* 2010, 1, 72–81. [CrossRef]
- [3] Seljak, G. Race Car Aerodynamics; University of Ljubljana: Ljubljana, Slovenia, 2008.
- [4] Castro, X. Diseño, Optimización y Análisis Aerodinámico de un Fórmula 1; Universidad Rey Juan Carlos: Móstoles, Spain, 2018.
- [5] Wright, P.; Matthews, T. Formula 1 Technology; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2001; ISBN 978-0-7680-2887-4.
- [6] Obeid, S.; Jha, R.; Ahmadi, G. RANS Simulations of Aerodynamic Performance of NACA 0015 Flapped Airfoil. *Fluids* 2017, 2, 2. [CrossRef]
- [7] 2022 Formula One Technical Regulations. In Proceedings of the Fédération Internationale de l' Automobile, Paris, France, 30 October 2019. Iss 2.
- [8] Landvogt, B. Fluid-Structure Interaction of Racing Car Spoilers. In Proceedings of the NAFEMS European Conference: Multiphysics Simulation, Copenhagen, Denmark, 15–16 November 2016.
- [9] McBeath, S. Competition Car Aerodynamics; Veloce Publishing Limited: Dorset, UK, 2015; ISBN 978-1-78711-086-1.
- [10] Reynolds, J. 2021 F1 Rules: The Key Changes Explained|Formula 1®. Available online: <https://www.formula1.com/en/latest/article.2021-f1-rules-the-key-changes-explained.2dCtCkxNofk20K1B4rJwTk.html> (accessed on 4 June 2020).
- [11] Petrone, G.; Hill, C.; Biancolini, M. Track by track robust optimization of a F1 front wing using adjoint solutions and radial basis functions. In Proceedings of the 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference, Atlanta, GA, USA, 16–20 June 2014; American Institute of Aeronautics and Astronautics: Atlanta, GA, USA, 2014.
- [12] Gorostidi, N.; Lecourt, D.; Castro, X.; Maigler, M. Optimisation of Aerofoil Design; Cranfield University: Cranfield, UK, 2020.
- [13] Arrondeau, B.; Saravana, A.; Sabatés, A.; Daniela, S. Front Wing Design of a 2021 F1 Race Car; Cranfield University: Cranfield, UK, 2020.
- [14] Syazrul, M. Study of F1 Car Aerodynamics Front Wing Using Computational Fluid Dynamics (CFD); Universiti Malaysia Pahang: Gambang, Malaysia, 2010.
- [15] Heyder-Bruckner, J. The Aerodynamics of an Inverted Wing and a Rotating Wheel in Ground E_ect; University of Southampton: Southampton, UK, 2011.
- [16] van den Berg, M.A. Aerodynamic Interaction of an InvertedWing with a Rotating Wheel; University of Southampton: Southampton, UK, 2007.
- [17] Azmi, A.R.S.; Sapit, A.; Mohammed, A.N.; Razali, M.A.; Sadikin, A.; Nordin, N. Study on airflow characteristics of rear wing of F1 car. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2017, 243, 012030. [CrossRef]
- [18] Bhatnagar, U.R. Formula 1 Race Car Performance Improvement by Optimization of the Aerodynamic Relationship between the Front and Rear Wings; The Pennsylvania State University: State College, PA, USA, 2014.
- [19] Ahlfeld, R.; Ciampoli, F.; Pietropaoli, M.; Pepper, N.; Montomoli, F. Data-driven uncertainty quantification for Formula 1: Di_user, wing tip and front wing variations. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.* 2019, 233, 1495–1506. [CrossRef]
- [20] Chirco, L.; Manservigi, S. On the Optimal Control of Stationary Fluid–Structure Interaction Systems. *Fluids* 2020, 5, 144. [CrossRef]
- [21] Dillinger, J.K.S.; Meddaikar, Y.M.; Lübker, J.; Pusch, M.; Kier, T. Design and Optimization of an Aeroservoelastic Wind Tunnel Model. *Fluids* 2020, 5, 35. [CrossRef]
- [22] Pedrol, E.; Massons, J.; Díaz, F.; Aguiló, M. Two-Way Coupling Fluid-Structure Interaction (FSI) Approach to Inertial Focusing Dynamics under Dean Flow Patterns in Asymmetric Serpentes. *Fluids* 2018, 3, 62. [CrossRef]
- [23] Zhao, L.; Shkarayev, S.; Su, E. Aerodynamics of a Wing with a Wingtip Flapper. *Fluids* 2018, 3, 29. [CrossRef]



- [24] Megson, T.H.G. Aircraft Structures for Engineering Students, 3rd ed.; Arnold: London, UK, 1999; ISBN 978-0-340-70588-9.
- [25] Savage, G. Honda Racing F1 Team. 2008. Available online: <http://www.formula1-dictionary.net/> (accessed on 8 December 2020).
- [26] Callister, W.D.; Rethwisch, D.G. Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2018; ISBN 978-1-119-40539-9.
- [27] ASM International (Ed.) ASM Handbook, 10th ed.; ASM International: Materials Park, OH, USA, 1990; ISBN 978-0-87170-377-4.
- [28] AZO Materials: Material Science News Materials Engineering News. Available online: <https://www.azom.com/> (accessed on 25 July 2020).
- [29] MatWeb: Online Materials Information Resource. Available online: <http://www.matweb.com/> (accessed on 29 July 2020).
- [30] ASM Aerospace Specification Metals, Inc. Florida Aerospace Metal Distributor. Available online: <https://www.aerospacemetals.com/> (accessed on 26 July 2020).
- [31] MakeItFrom.com: Material Properties Database. Available online: <https://www.makeitfrom.com/> (accessed on 28 July 2020).
- [32] ResearchGate: Find and Share Research. Available online: <https://www.researchgate.net/> (accessed on 30 July 2020).
- [33] Gabara, V. High-resistance fibers. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; Wiley VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany, 2000; p. a13_001. ISBN 978-3-527-30673-2.
- [34] Omnexus: The Material Selection Platform. Free Online Database for Plastic Industry. Available online: <https://omnexus.specialchem.com> (accessed on 1 August 2020).
- [35] Polymer Properties Database: Free Encyclopedia of Polymer Science and Technology. Available online: <http://polymerdatabase.com/home.html> (accessed on 2 August 2020).
- [36] Ensigner Plastics: High Performance Plastic Solutions. Available online: <https://www.ensingerplastics.com/en> (accessed on 31 July 2020).
- [37] Ashton, N.; West, A.; Lardeau, S.; Revell, A. Assessment of RANS and DES methods for realistic automotive models. *Comput. Fluids* 2016, 128, 1–15. [CrossRef]
- [38] Heft, A.I.; Indinger, T.; Adams, N.A. Experimental and numerical investigation of the DrivAer model. In Proceedings of the ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2012 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2012 10th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. Volume 1: Symposia, Parts A and B, Rio Grande, PR, USA, 8–12 July 2012; pp. 41–51.
- [39] Simmonds, N.; Pitman, J.; Tsoutsanis, P.; Jenkins, K.; Gaylard, A.; Jansen, W. Complete Body Aerodynamic Study of Three Vehicles; SAE Technical Paper 2017-01-1529; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2017. [CrossRef]
- [40] Lisejkin, V.D. Grid generation methods. In *Scientific Computation*, 3rd ed.; Springer: Cham, Switzerland, 2017; ISBN 978-3-319-57846-0.
- [41] ANSYS Fluent User's Guide; Release 19.2; ANSYS Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2013.
- [42] Castro, X. Grid Generation & CAD; Cranfield University: Cranfield, UK, 2020.
- [43] ANSYS Fluent Theory Guide; Release 19.2; ANSYS Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2013.
- [44] Kwaśniewski, L. Application of grid convergence index in FE computation. *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.* 2013, 61, 123–128. [CrossRef]
- [45] NPARC Alliance-Policies and Plans; NASA Glenn Research Centre. Available online: https://www.grc.nasa.gov/www/wind/plans/Policies_and_Plans.pdf (accessed on 8 December 2020).
- [46] Roache, P.J. Verification and Validation in Computational Science and Engineering; Computing in Science; Hermosa Publishers: Socorro, NM, USA, 1998.
- [47] Castro, X. GCI Solver; Cranfield University: Cranfield, UK, 2020.
- [48] Dubourg, L.; Merati, A.; Jahazi, M. Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin. *Mater. Des.* 2010, 31, 3324–3330. [CrossRef]
- [49] Xabier Castro and Zeeshan A. Rana 2020, "Aerodynamic and Structural Design of a 2022 Formula One Front Wing Assembly", *Fluids journal* 2020, 5, 237.