

بکارگیری سیستم تعلیق هوشمند نیمه فعال در تعلیق خودروی ریلی ارم بمنظور شناسایی عیوب و حفظ راحتی سفر مسافران

محور مقاله: سیستم های نوین رضایت مندی و راحتی سفر در ناوگان مسافری
نادر شکوهی^۱

چکیده

افزایش دسترسی پذیری در خودروهای ریلی نیازمند آگاهی کامل از وضعیت اجزا در سیستم های مختلف می باشد. در این مقاله شرایط و مشخصات مکانیکی مستهلک کننده های قائم تعلیق ثانویه در خودروهای ریلی در ارتباط با راحتی سفر مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا تلاش شده است با استفاده از تکنیک شبکه های عصبی، المان معیوب که باعث کاهش راحتی سفر در خودروی ریلی شده است، جهت برطرف سازی عیب شناسایی شود. به منظور کاهش تاثیرات منفی عیب شناسایی شده، تعبیه یک شیپوره در لوله متصل کننده فنر بادی به مخزن هوای کمکی مورد توجه قرار گرفته است. نتایج استفاده از کنترل هوشمند نیمه فعال بر روی دریچه شیپوره نشان داد که در صورت بروز نقص در مستهلک کننده های قائم در خودروی ریلی، راحتی سفر مسافران را در محدوده قابل قبولی ثابت نگه داشته می شود.

کلمات کلیدی: راحتی سفر، هوش مصنوعی، شبکه های عصبی، کنترل شیپوره.

۱- مقدمه

افزایش تقاضای جهانی برای بهبود قابلیت اعتماد^۲ و دسترس پذیری^۳ در خودروهای ریلی، مشاهده وضعیت سیستم ها^۴، مدیریت داده ها، پردازش آنها برای خطا یابی^۵ و برنامه ریزی هزینه ها را بسیار پر اهمیت کرده بطوریکه منجر به ایجاد تکنولوژی های جدید در این زمینه شده است. بمنظور رفع نیاز بهره برداران درخصوص هزینه های جاری و استراتژی های بهره برداری روش های بسیاری درخصوص اندازه گیری اطلاعات، شامل نصب تجهیزات در داخل سیستمهای ترن و یا بر روی بدنه واگن و نصب تجهیزات بر روی بستر جهت داده برداری از اطلاعات خودروهای ریلی در حال حرکت، که می تواند برای ناوگانهای قدیمی تر نیز مورد استفاده قرار گیرند، طراحی و بکار گرفته شده اند.

بر اساس آمارهای بدست آمده از سیستم تعمیر و نگهداری واگنها، المانهایی که دارای نرخ خرابی بسیار بالایی بوده و تاثیر مستقیمی بر راحتی سفر مسافران دارد، مستهلک کننده های قائم در تعلیق ثانویه می باشند. لذا در این مقاله، مستهلک کننده های قائم در تعلیق ثانویه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تلاش شده است با استفاده از تکنیک شبکه های عصبی و سیستم های خبره، شناسایی وضعیت مستهلک کننده های قائم تعلیق ثانویه مورد بررسی قرار گرفته است تا در صورت مشاهده انحراف در رفتار آنها، با بکارگیری کنترل نیمه فعال بر روی دریچه شیپوره تعبیه شده در تعلیق ثانویه، انحراف رفتاری مشاهده شده جبران گردد.

E-mail: shokouhi@iri.co.ir

^۱ - مدیر تحقیق و توسعه، شرکت صنایع ریلی ایران خودرو، ۰۲۱-۴۴۱۸۲۱۳۱

^۲ - Reliability

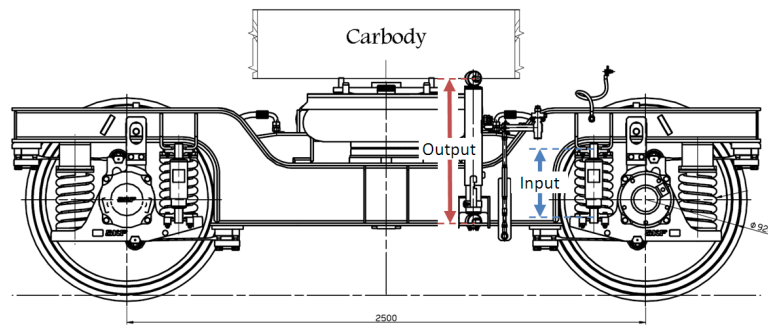
^۳ - Availability

^۴ - Condition Monitoring

^۵ - Fault Finding

۲- شناسایی رفتار مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه

در این بخش، با بکارگیری تکنیک شبکه های عصبی و با بررسی پاسخ بدست آمده از حل معادلات شبیه ساز خودروی ریلی، وضعیت مستهلک کننده قائم بررسی شده و میزان انحراف رفتار آنها از رفتار ایده آل استخراج می گردد. شکل ۱ بوژی استفاده شده در واگن ساخت شرکت صنایع ریلی ایران خودرو را نشان می دهد. در این شکل ورودی و خروجی یک سیستم فرضی که جهت بررسی و شناسایی وضعیت مستهلک کننده قائم در نظر گرفته شده مشخص می باشد. در این سیستم فرضی، به منظور شناسایی رفتار مستهلک کننده قائم، تغییرات فاصله میان سر محور و قاب بوژی در محل قرارگیری مستهلک کننده اولیه به عنوان ورودی و تغییرات فاصله قاب بوژی و بدنه در محل مستهلک کننده ثانویه به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است.

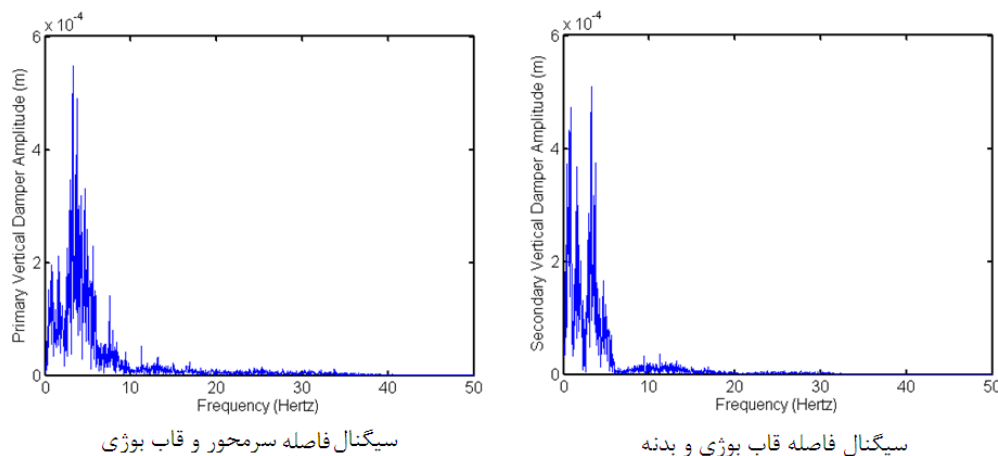


شکل ۱: سیگنال ورودی و خروجی شبکه عصبی جهت شناسایی وضعیت مستهلک کننده قائم

فرض می شود انحراف و عیب در مستهلک کننده را بتوان بصورت یک ضریب $\alpha_{Vertical}$ که در مقدار نیرو ضرب می شود در نظر گرفت. در اینصورت معادله بیان کننده رفتار مستهلک کننده های قائم به صورت زیر بیان خواهد شد. این معادلات از نتایج تست واقعی مستهلک کننده های قائم استخراج شده اند.

$$F = \begin{cases} \alpha_{Vertical} (61375 \dot{\Delta}_{VerDamp, sec, a}) & 0 \leq |\dot{\Delta}_{VerDamp, sec, a}| \leq 0.05 \\ \alpha_{Vertical} (18221 \dot{\Delta}_{VerDamp, sec, a} + 2119.3) & 0.05 < \dot{\Delta}_{VerDamp, sec, a} \\ \alpha_{Vertical} (14143 \dot{\Delta}_{VerDamp, sec, a} - 2655.2) & \dot{\Delta}_{VerDamp, sec, a} < -0.05 \end{cases}$$

به منظور استخراج الگوهای رفتاری دینامیک سیستم فرضی در نظر گرفته شده جهت شناسایی ضریب $\alpha_{Vertical}$ در مستهلک کننده قائم تعلیق ثانویه، سیگنالهای معرفی شده در حوزه فرکانس مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۲ نمودار طیفی این سیگنال ها را نشان می دهند.

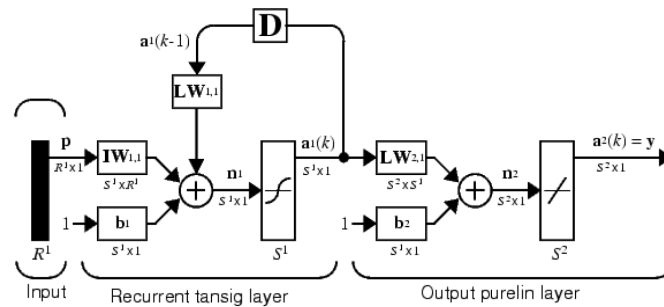


شکل ۲: نمودار طیفی سیگنالهای سیستم فرضی در نظر گرفته شده

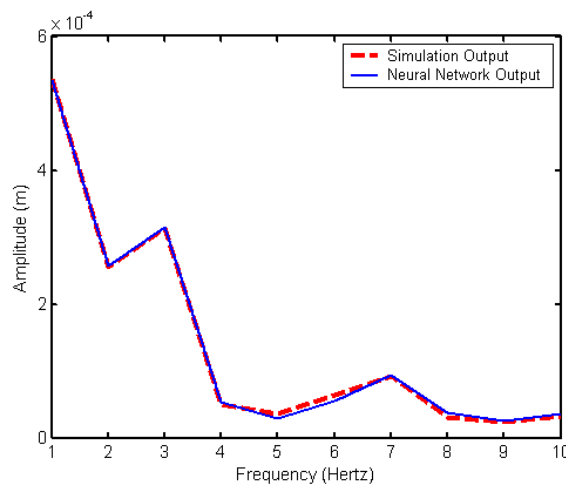
با توجه به تغییرات مشاهده شده در شکل ۲، رفتار اصلی در فرکانس های زیر ۱۰ هرتز اتفاق می افتد. لذا به منظور استخراج الگوهای رفتاری سیستم فرضی، محدوده فرکانس های صفر تا ۱۰ هرتز مورد توجه قرار گرفت و می توان گفت که مشخصه اصلی این سیگنالها در فرکانس های زیر ۱۰ هرتز قرار گرفته اند.

۳- استخراج الگوی مرجع

در این بخش، بمنظور دستیابی به شبیه سازی با سرعت قابل قبول جهت ایجاد امکان پیاده سازی الگوریتم شناسایی بصورت online، از یک شبکه عصبی از نوع Elman جهت شبیه سازی رفتار دینامیکی زیر سیستم معرفی شده در حالتی که انحرافی در رفتار مستهلک کننده وجود ندارد ($\alpha_{Vertical} = 1$) استفاده می شود. شکل ۳، شبکه عصبی در نظر گرفته شده را نشان می دهد.



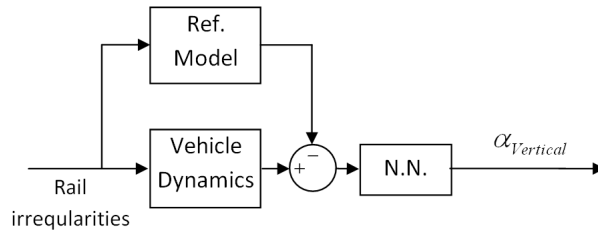
شکل ۳: شبکه عصبی Elman جهت شبیه سازی رفتار دینامیکی مرجع سیستم در جهت قائم
 در این شبکه دامنه سیگنال تغییر طول مستهلک کننده قائم تعلیق اولیه در فرکانس های زیر ۱۰ هرتز به عنوان ورودی و دامنه سیگنال تغییر طول مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه و فرکانس های زیر ۱۰ هرتز به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. در لایه میانی در این شبکه ۱۳ نرون با تابع فعال سازی tansig وجود دارد.
 داده های استخراج شده از شبیه سازی حرکت واگن برای طول یک کیلومتر از خط جهت آموزش شبکه در حالت مرجع مورد استفاده قرار گرفت. دامنه سیگنال تغییر طول مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه حاصل از شبکه عصبی آموزش داده شده و دامنه سیگنال تغییر طول مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه بدست آمده از شبیه ساز دینامیکی در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد شبکه عصبی آموزش داده شده به خوبی توانسته است رفتار دینامیکی سیستم در نظر گرفته شده را شبیه سازی نماید.



شکل ۴: خروجی شبکه عصبی آموزش داده شده و خروجی شبیه ساز دینامیکی در جهت قائم

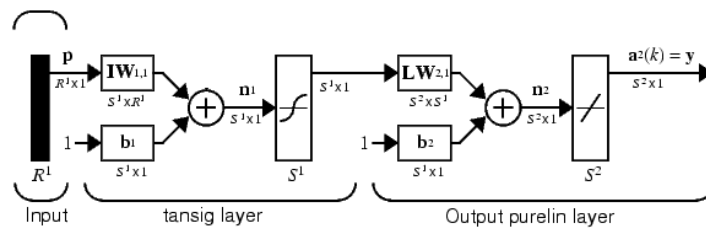
۴- شناسایی انحراف در مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه

بمنظور شناسایی ضریب $\alpha_{Vertical}$ در مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه، تغییر طول قائم مستهلک کننده قائم در تعلیق اولیه به عنوان ورودی شبکه عصبی در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه رفتار تعلیق خودرو در حالت مرجع توسط یک شبکه عصبی Elman در بخش قبل استخراج گردید، خروجی مرجع (خروجی سیستم در حالتی که انحرافی در رفتار قطعه وجود ندارد) در شرایط مختلف در دسترس می باشد. در این بخش، یک شبکه عصبی بگونه ای آموزش داده می شود تا با دریافت خروجی مرجع و خروجی واقعی سیستم و بر اساس اختلاف آنها در فرکانس های مختلف، ضریب $\alpha_{Vertical}$ در مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه را استخراج نماید. بلوک دیاگرام در نظر گرفته شده در شکل ۵ نشان داده شده است.



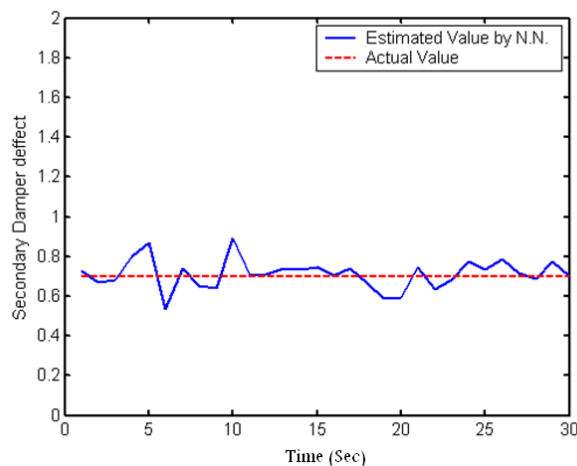
شکل ۵: بلوک دیاگرام استخراج ضریب $\alpha_{Vertical}$ در مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه

بدین منظور یک شبکه عصبی پیش خوراند با آرایش نشان داده شده در شکل ۶، جهت شناسایی ضریب $\alpha_{Vertical}$ در مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه در نظر گرفته شد. در این شبکه ۱۰ نرون در لایه ورودی، ۱۳ نرون در لایه میانی و ۱ نرون در لایه خروجی قرار داده شده است. در این شبکه، ورودی برابر اختلاف دامنه تغییر طول مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه مرجع و واقعی در فرکانس های زیر ۱۰ هرتز، و خروجی برابر ضریب $\alpha_{Vertical}$ در این شبکه خواهند بود.



شکل ۶: شبکه عصبی بمنظور شناسایی ضریب $\alpha_{Vertical}$ در مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده، در دینامیک خودروی ریلی، ضریب مستهلک کننده $\alpha_{Vertical}$ برابر 0.70 قرار داده شد. نتایج بدست آمده از شبکه های عصبی آموزش داده شده در شکل ۷ ارائه شده است.

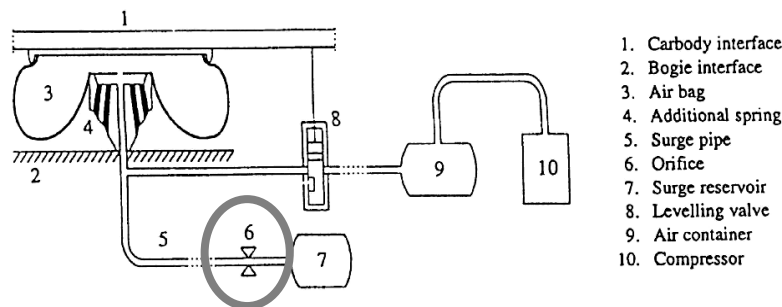


شکل ۷: خروجی الگوریتم ارائه شده جهت شناسایی ضریب مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه

همانطور که مشخص است، شبکه عصبی آموزش داده شده توانسته است به خوبی انحراف ایجاد شده در سیستم را شناسایی نماید. لذا الگوریتم معرفی شده و شبکه های آموزش داده شده می توانند به خوبی انحراف موجود در مستهلک کننده قائم تعلیق ثانویه را شناسایی نمایند.

۵- کنترل نیمه فعال تعلیق ثانویه جهت بهبود راحتی سفر مسافران

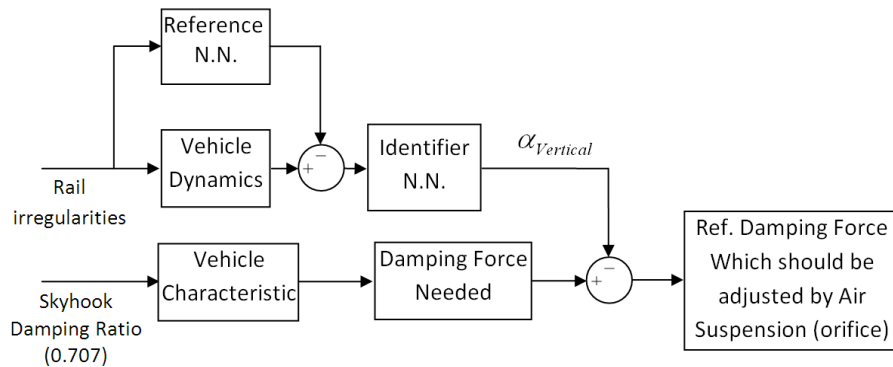
در تعلیق ثانویه خودروی ریلی شبیه سازی شده، بمنظور حفظ راحتی سفر مسافران از تعلیق هوایی استفاده شده است. بمنظور اعمال کنترل نیمه فعال در خودروی ریلی شبیه سازی شده، یک شیپوره با قطر دهانه متغیر جهت کنترل ضریب مستهلک کنندگی سیستم در نظر گرفته می شود. در اینصورت، تعلیق هوایی واگن بصورت ارائه شده در شکل ۸ اصلاح می گردد. با اعمال کنترل بر روی قطر دهانه قطعه شماره شش نشان داده شده در شکل ۸، امکان تغییر ضریب مستهلک کنندگی قائم در سیستم مهیا می گردد.



شکل ۸: شماتیک تعلیق هوایی پیشنهادی جهت اعمال کنترل نیمه فعال در جهت قائم

۶- کنترل skyhook

در سیستم تعلیق خودروی ریلی شبیه سازی شده، علاوه بر فنر های بادی، که به علت وجود خاصیت مستهلک کنندگی، ارتعاشات بدنه واگن را مستهلک می کنند، چهار مستهلک کننده قائم نیز تعبیه شده اند. لذا به منظور شناسایی میزان نیروی مرجع مستهلک کننده در تعلیق بادی لازم است میزان نیروی مستهلک کنندگی در مستهلک کننده های قائم در تعلیق ثانویه تخمین زده شود. این کار با استفاده از تخمین وضعیت سیستم با استفاده از الگوریتم ارائه شده صورت می گیرد.



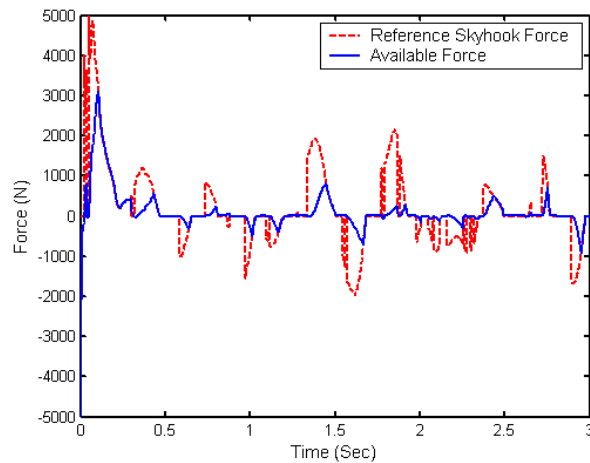
شکل ۹: الگوریتم بهبود راحتی سفر با استفاده از کنترل نیمه فعال در تعلیق ثانویه به روش skyhook

بر اساس کار کارنوپ [۱]، مستهلک کننده skyhook، می بایست دارای نسبت استهلاک 0.707 باشد تا بهترین پاسخ گذرا بدست آید. بر این اساس، با استفاده از الگوریتم ارائه شده در شکل ۹، امکان کنترل نیمه فعال تعلیق ثانویه در جهت قائم امکان پذیر می شود. بر اساس این الگوریتم، مقدار ضریب $\alpha_{Vertical}$ بر اساس الگوریتم ارائه شده محاسبه و هم زمان، با استفاده از الگوریتم skyhook، مقدار نیروی مستهلک کنندگی مورد نیاز جهت رسیدن به پاسخ گذرای مناسب بدست می آید. اختلاف دو نیروی مستهلک کنندگی فوق، مقدار نیرویی است که توسط سیستم کنترل دریاچه شیپوره اعمال می گردد.

۷- اعمال کنترل نیمه فعال از طریق شیپوره

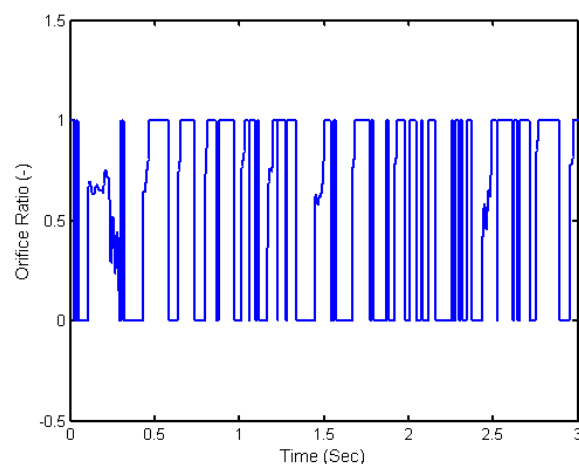
تغییر ضریب سختی فنر بادی ناشی از تغییر قطر شیپوره در یک محدوده مشخصی به وقوع می پیوندد. کمترین ضریب سختی، با باز بودن کامل شیپوره و در مدار بودن تمامی حجم مخزن کمکی بدست آمده و بیشترین ضریب سختی، با بسته شدن کامل لوله ارتباطی و حذف کامل مخزن کمکی اتفاق می افتد. لذا، با توجه به اینکه تغییر ضریب سختی، بصورت لحظه ای، نیرو را تغییر نمی دهد و تغییر نیرو مستلزم گذشت زمان و جابجا شدن بدنه واگن و قاب بوژی نسبت به هم می باشد، با تغییر قطر شیپوره و ضریب افت، امکان دنبال کردن لحظه ای نیروی مستهلک کننده که با استفاده از روش skyhook استخراج می شود وجود نخواهد داشت.

شکل ۱۰، نیروی مرجع استخراج شده توسط روش skyhook و نیز نیروی قابل دسترسی با استفاده از تغییر قطر شیپوره را در فنر بادی نشان می دهد. همانطور که مشخص است هنگامی که قدر مطلق نیروی مرجع در حال افزایش است، تغییر قطر شیپوره نمی تواند نیروی مورد نیاز را تامین کند. اما در هنگامی که قدر مطلق نیروی مرجع در حال کاهش می باشد، شیپوره با تغییر قطر مجرای خود بخوبی می تواند نیروی مورد نیاز را دنبال نماید.



شکل ۱۰: نیروی مرجع و نیروی قابل دسترس

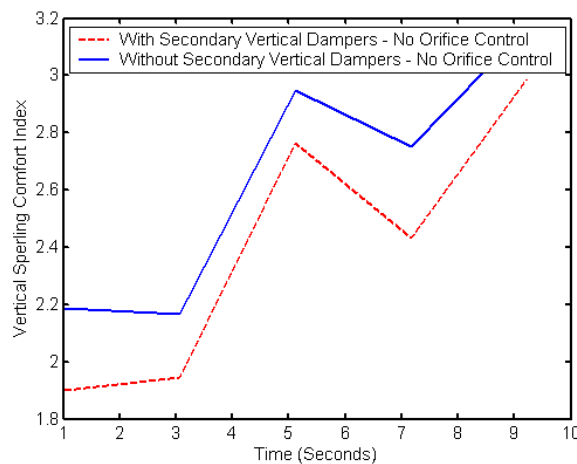
تغییرات قطر شیپوره برای دستیابی به نیروی ارائه شده در شکل ۱۰، در شکل ۱۱ ارائه شده است. همانطور که مشخص است، کنترل قطر در نواحی که قدر مطلق نیرو کاهش می یابد، عمل کرده و در نواحی که قدر مطلق نیرو افزایش می یابد، دریچه بطور کامل بسته می شود.



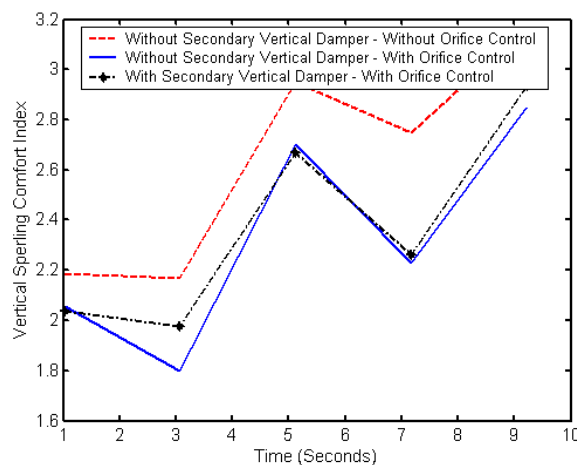
شکل ۱۱: تغییرات نسبت قطر دهانه به قطر لوله اتصال بمنظور دستیابی به نیروی قابل دسترس

یکی از عیوب رایجی که می تواند برای مستهلک کننده های تعلیق ثانویه اتفاق بیفتد، تخلیه روغن و یا جدا شدن آنها از سیستم می باشد. در این حالت، نیروی مستهلک کنندگی آن قطعه در سیستم برابر صفر خواهد بود. لازم به ذکر است چنانچه ضریب مستهلک کننده از مقدار نامی خود به دلیل بروز عیبی در سیستم بالاتر رود، به دلیل آنکه حداقل ضریب مستهلک کنندگی در الگوریتم ارائه شده ثابت می باشد، امکان اعمال کنترل نیمه فعال به منظور بهبود راحتی سفر مسافران مهیا نخواهد بود.

شکل ۱۲، راحتی سفر مسافران را در صورتیکه تمامی چهار مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه خودروی ریلی از دینامیک سیستم خارج شوند، نشان می دهد. در این حالت نیروی مستهلک کنندگی آنها برابر صفر قرار داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است، در این حالت، راحتی سفر مسافران از حدود ۷ تا ۱۵ درصد کاهش خواهد یافت. لذا، با استفاده از اعمال کنترل قطره شیپوره انتظار می رود بتوان در بدترین حالت، راحتی سفر مسافران را در حدود ۲۰ درصد بهبود بخشید.



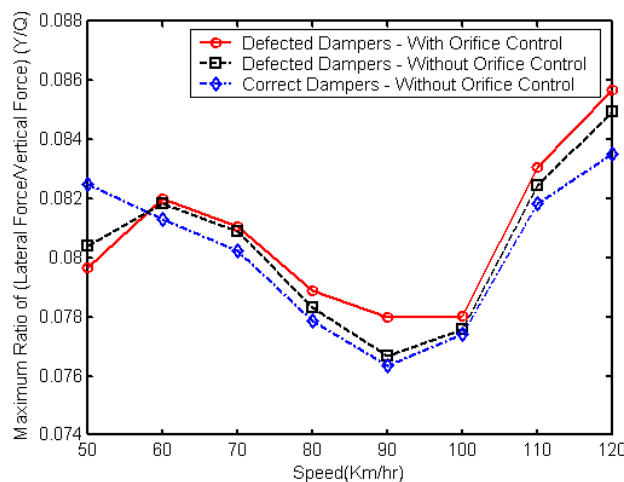
شکل ۱۲: تغییرات راحتی سفر مسافران در دو واگن سالم و معیوب، بدون اعمال کنترل شیپوره راحتی سفر مسافران در صورتیکه در واگن بدون مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه، کنترل شیپوره اعمال شود، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، استفاده از کنترل شیپوره، در تعلیق هوایی خودروی ریلی توانسته است مستقل از وجود و یا عدم وجود مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه، راحتی سفر مسافران را در محدوده مناسبی تضمین نماید.



شکل ۱۳: تغییرات راحتی سفر مسافران در دو واگن سالم و معیوب، با و بدون اعمال کنترل Orifice

۸- بررسی پایداری واگن در زمان اعمال کنترل شیپوره

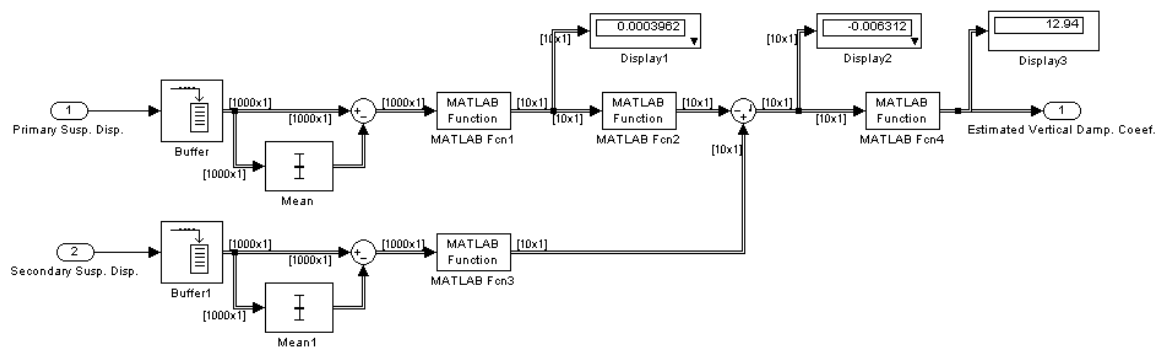
اعمال هرگونه تغییر در مشخصات سیستم تعلیق خودروی ریلی، می تواند بر پایداری خودروی ریلی تاثیر بگذارد. خروج از خط یکی از اتفاقاتی است که در صورت کاهش پایداری سیستم اتفاق خواهد افتاد. این اتفاق به معنای بالا رفتن لبه چرخ از ریل و عبور آن به طرف دیگر ریل می باشد. محققین، با بررسی نسبت نیروی قائم به نیروی جانبی در ناحیه تماس چرخ با ریل، پدیده خروج از خط را مورد بررسی قرار داده اند. در اغلب استانداردها، مقادیری بر اساس آزمایشات انجام شده، به عنوان حداکثر ضریب خروج از خط مجاز توصیه شده است. در راه آهن ژاپن، حداکثر مجاز ضریب خروج از خط برابر 0.8 معرفی شده است. تغییرات نسبت نیروی جانبی به نیروی قائم برای سه وضعیت مختلف سیستم تعلیق واگن در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، با اعمال کنترل شیپوره در تعلیق ثانویه خودروی ریلی، تغییر قابل ملاحظه ای در ضریب خروج از خط اتفاق نخواهد افتاد.



شکل ۱۴: نمودار تغییرات نسبت نیروی جانبی به نیروی قائم برای وضعیت های مختلف تعلیق ثانویه

۹- شناسایی online و کنترل نیمه فعال در تعلیق ثانویه

بمنظور اعمال کنترل نیمه فعال از طریق شیپوره تعبیه شده در مسیر ارتباطی فنر بادی و مخزن هوای کمکی، مدل کنترلی جهت شناسایی عیوب در تعلیق ثانویه طراحی گردید. با در نظر گیری یک ناحیه انحراف مجاز در ضریب عیب شناسایی شده، در صورتیکه مقدار ضریب تخمین زده شده خارج از محدوده مورد نظر قرار گیرد، الگوریتم معرفی شده، کنترل نیمه فعال را فعال کرده و راحتی سفر مسافران را در حد مطلوب تضمین می نماید. مدل کنترلی در نظر گرفته شده در شکل ۱۵ ارائه شده است.



شکل ۱۵: مدل پیاده سازی شده در محیط Matlab جهت شناسایی عیب در تعلیق ثانویه

نتیجه گیری:

به منظور حفظ راحتی سفر مسافران، در این مقاله، شناسایی رفتار المانهای موثر در تعلیق ثانویه مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از تکنیک شبکه های عصبی، عیوب موجود در مستهلک کننده های قائم و جانبی تعلیق ثانویه شناسایی گردید. در تکنیک ارائه شده، تنها اندازه گیری مقادیری که امکان اندازه گیری آنها در هنگام سیر واگن وجود دارند در نظر گرفته شده است. به منظور کنترل نیمه فعال مجموعه تعلیق ثانویه و با در نظر گیری حداقل تغییرات که لازم است برای اعمال کنترل نیمه فعال در سیستم تعلیق خودروی ریلی اعمال شود، تعبیه یک شیپوره در لوله متصل کننده فنر بادی به مخزن هوای کمکی مورد توجه قرار گرفت. این طرح می تواند به راحتی بر روی واگنهای ساخت شرکت ایریکو پیاده سازی گردد. نتایج بدست آمده از حل شبیه ساز دینامیکی ارائه شده برای خودروی ریلی، نشان می دهد که حذف کامل مستهلک کننده های قائم در تعلیق ثانویه، راحتی سفر مسافران را تا حدود ۲۰٪ کاهش می دهد. در صورتیکه الگوریتم کنترل نیمه فعال ارائه شده بر روی واگنهایی که دارای مستهلک کننده قائم در تعلیق ثانویه می باشند، پیاده سازی شود، به علت اینکه تغییر ناگهانی در نیروهای استهلاک، در سیستم تعلیق بادی امکان پذیر نمی باشد، بهبود قابل توجهی در راحتی سفر مسافران ایجاد نخواهد شد. با استفاده از نتایج الگوریتم ارائه شده در شناسایی میزان انحراف در رفتار مستهلک کننده های تعلیق ثانویه، چنانچه انحراف رفتاری آنها از مقدار مشخصی تجاوز نماید، الگوریتم کنترل شیپوره ارائه شده، فعال شده و راحتی سفر مسافران را در محدوده قابل قبولی ثابت نگه می دارد.

مراجع

1. Karnopp, D. C., 1978, "Are active suspensions really necessary?", ASME Publication, Volume 78, Pages: 1-9.
2. Nagai M., Moran A., Tamura Y., 1997 "Identification and control of nonlinear active pneumatic suspension for railway vehicles using neural networks", Proceedings of the 13th World Congress International Federation of Automatic Control. Vol.Q. Automotive, Marine, Autonomous Vehicles, Volume 5, Pages: 1137-1144
3. Harg V. K., Dukupati R. V., 1984, "Dynamics of railway vehicle systems", Academic press, Haecourt Brace Jovanovich, Publishers.
4. Presthus M., 2002, "Derivation of Air Spring Model Parameters for Train Simulation", Master's Thesis, Department of applied physics and mechanical engineering, Division of fluid mechanics, LULEA University.
5. Li H., Goodall, R.M., 1999, "Linear and non-linear skyhook damping control laws for active railway suspensions", Control Engineering Practice, Volume 7, Pages: 843-50.
6. JabŁońska J., Choromański W., 2002, "Modelling, simulation and diagnostic on non-symmetric railway vehicle", Proceedings of the Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, pages: 255-260.
7. Lia P., Goodalla R., Weston P., 2007, "Estimation of railway vehicle suspension parameters for condition monitoring", Control Engineering Practice, Volume 15, Pages 43-55