

بررسی تأثیر پارامترهای دینامیکی بر سرعت بحرانی واگن مولد بخار مجهز به بوژی Y25

حسن سرایلو^۱، بابک دارابی^۲ و*

^۱دکتر مهندسی و نظارت ناوگان، راه آهن جمهوری اسلامی ایران، تهران

^۲عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران*

*مسئول مکاتبات: b.darabi@iauctb.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

واگن مولد بخار
سرعت بحرانی
بوژی Y25
هانینگ
ارتعاشات عرضی

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۶/۲۰

تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۳/۲۱

واگن مولد بخار از نوع واگن‌های کمکی در تشکیل آرایش قطار است که وظیفه تولید بخار آب جهت استفاده در سیستم گرمایش واگن‌های مسافری را بر عهده دارد. در حال حاضر قریب به ۶۰ واگن مولد بخار در ناوگان راه آهن جمهوری اسلامی ایران در حال بهره برداری هستند. به علت محدودیت‌های دینامیکی، حداکثر سرعت سیر این واگن‌ها برابر با ۱۲۰ کیلومتر در ساعت تعیین شده است که ۲۰ کیلومتر بر ساعت کمتر از حداکثر سرعت سیر اکثر واگن‌های مسافری می‌باشد. این اختلاف در محدودیت سرعت منجر به کاهش سرعت حرکت قطار و در نتیجه کاهش ظرفیت حمل و نقل در شبکه ریلی کشور می‌گردد. در این مقاله مدل پارامتری از ارتعاشات عرضی واگن مولد بخار با هدف شناسایی اثر پارامترهای مختلف بر حداکثر سرعت سیر توسعه داده شده است. سپس مقادیر ویژه و نسبت میرایی سیستم برای سرعت‌های مختلف محاسبه شده است. در سرعت‌هایی که نسبت میرایی سیستم منفی گردد، ناپایداری رخ داده است و سرعت مربوطه، سرعت بحرانی سیستم خواهد بود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد افزایش فاصله بین دو محور بیشترین تأثیر را بر افزایش حداکثر سرعت سیر دارد ولی ایجاد تغییر در این پارامتر نیازمند ایجاد تغییرات اساسی در طراحی بوژی است. از سوی دیگر با کاهش ۳۰ درصدی ظرفیت مخزن‌های آب و سوخت و نیز سختی جانبی بین فریم و محور، حداکثر سرعت قابل سیر به میزان ۱۷/۸ درصد افزایش یافته و به ۱۶۲/۷ کیلومتر بر ساعت می‌رسد.

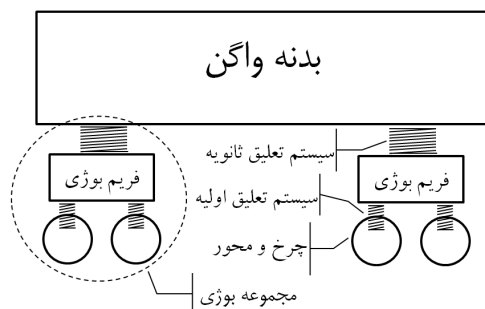
۱ مقدمه

چرخ و محور، سیستم تعلیق و جعبه یاتاقان است. سیستم تعلیق بوژی عموماً به دو نوع تعلیق اولیه^۱ و ثانویه^۲ تقسیم‌بندی می‌گردد که سیستم تعلیق اولیه بین محور و فریم بوژی و سیستم تعلیق ثانویه بین فریم بوژی و بدنه واگن قرار می‌گیرد [۲]. این دو نوع سیستم تعلیق در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند.

امروزه انرژی مورد نیاز جهت گرمایش واگن‌های مسافری از منبع الکتریکی تولیدی توسط لکوموتیو و یا شبکه برق بالاسری تامین می‌گردد. در واگن‌های قدیمی‌تر، از بخار آب جهت ایجاد گرمایش استفاده می‌شود که واگن مولد بخار وظیفه تامین بخار آب مورد نیاز سیستم گرمایش را بر عهده دارد. در حال حاضر قریب به ۶۰ دستگاه واگن مولد بخار در ناوگان ریلی راه آهن جمهوری اسلامی ایران در حال بهره‌برداری است. با توجه به محدودیت‌های دینامیکی این نوع واگن‌ها، حداکثر سرعت سیر آن‌ها برابر با ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت است که به میزان ۲۰ کیلومتر بر ساعت کمتر از واگن‌های مسافری مورد استفاده در شبکه ریلی است. همین اختلاف سرعت موجب محدود شدن ظرفیت حمل و نقل ریلی کشور می‌گردد. اغلب وسایل نقلیه ریلی از ۳ بخش اصلی شامل یک بدنه و دو بوژی تشکیل شده‌اند. بوژی به مجموعه شامل چرخ و محورها اطلاق می‌گردد که وظیفه اصلی در انتقال نیروهای بین ریل و بدنه واگن را ایفا می‌نماید. نمونه‌ای از یک بوژی که بیشتر در واگن‌های باری مورد استفاده قرار می‌گیرد در شکل ۱ نشان داده شده است [۱].



شکل ۱: نمونه‌ای از بوژی مدل Y25 [۱]



شکل ۲: محل قرارگیری سیستم‌های تعلیق اولیه و ثانویه

¹Primary suspension system

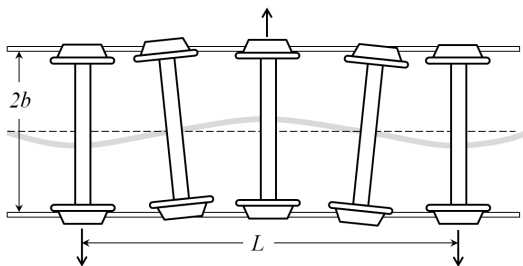
²Secondary suspension system

اتصال کاسه بوژی به صورت مفصل گوی و کاسه است که دوران حول دو محور طولی و عرضی آن توسط پین استوانه‌ای به نام میله نافی مهار شده و تنها اجازه چرخش حول راستای قائم را به بوژی در زیر بدنه می‌دهد.

یکی از دلایل اصلی ایجاد محدودیت در سرعت وسایل نقلیه ریلی، وقوع پدیده هانتینگ^۱ است. هانتینگ به حرکت عرضی و تناوبی واگن در صفحه افقی گفته می‌شود که بر اثر تحریک اولیه از نوع جابجایی در راستای عرضی ایجاد می‌شود [۳]. این پدیده در مسیر مستقیم رخ می‌دهد. به سرعتی که هانتینگ در آن ایجاد گردد، سرعت بحرانی وسیله نقلیه گفته می‌شود و از نظر تئوری وسیله نقلیه ریلی نمی‌تواند با سرعت بالاتر از آن سیر ایمن داشته باشد. بعلاوه وقوع این پدیده باعث افزایش سایش در قطعات و احتمال خروج از خط واگن می‌گردد. رابطه کلینگل^۲ بیانگر طول موج هانتینگ بوده و به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{rb}{\gamma}} \quad (1)$$

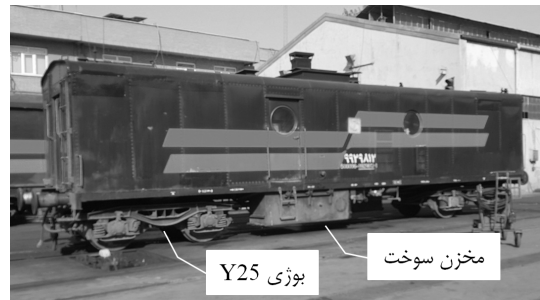
که در آن λ ، r ، b و γ به ترتیب طول موج هانتینگ، شعاع اسمی چرخ، نصف فاصله عرضی دو چرخ روی یک محور و مخروطیت معادل پروفیل چرخ هستند [۴]. نوسان عرضی چرخ و محور بر اثر پدیده هانتینگ در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶: نوسان چرخ و محور بر اثر وقوع پدیده هانتینگ [۴]

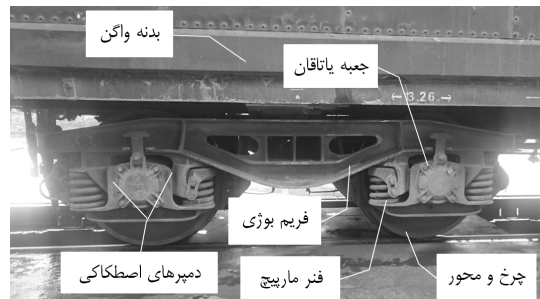
ترو و جنسن در تحقیق خود با کمک روش‌های عددی به بررسی مدلی ریاضی ارائه شده از حرکت بوژی در مسیر مستقیم پرداختند [۵]. احمدیان و یانگ با اضافه کردن دمپر غیر خطی در راستای حرکت یاو^۳ و در سیستم تعلیق اولیه، رفتار هانتینگ یک چرخ و محور را بررسی کردند. آنها نشان دادند نیروهای تماسی بین چرخ و ریل و نیز غیر خطی بودن خواص سیستم تعلیق اولیه، بر روی سرعت بحرانی وسیله نقلیه تاثیر بسیاری دارد [۶]. پارامترهای حاکم بر پدیده هانتینگ ناشی از فنر عرضی خطی و تغییرات مشخصات غیر خطی مجموعه توسط یابونو و همکاران و با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی بررسی گردید [۷]. محمدی و آل علی به بررسی اثر خواص غیر خطی در سیستم تعلیق اولیه بر روی سرعت پایداری یک چرخ و محور پرداختند [۸]. اثر جرم و اینرسی بوژی و بدنه واگن بر روی وقوع هانتینگ در یک چرخ و محور نیز توسط یونسین و همکاران انجام پذیرفت [۹]. آنها با استفاده از تئوری انشعاب هاف^۴ تاثیر پارامترهای مختلفی چون میزان لقی عرضی بین

اجزای اصلی واگن مولد بخار شامل مخزن سوخت، مخزن آب، پمپ آب و بویلر است. ظرفیت مخازن سوخت و آب در مدل‌های مختلف با یکدیگر متفاوت بوده و در مدل بررسی شده در این مقاله، ظرفیت مخازن سوخت و آب در مجموع برابر با ۲۶ تن است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، مخزن سوخت در زیر واگن قرار گرفته و بدنه واگن بر روی دو عدد بوژی از نوع Y25 نصب شده است.

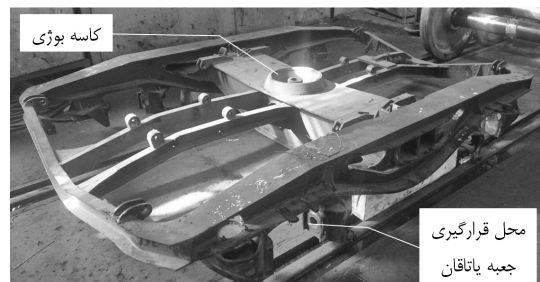


شکل ۳: واگن مولد بخار راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران با مجموع ظرفیت مخازن ۲۶ تن

بوژی Y25 تنها دارای سیستم تعلیق اولیه بوده و با توجه سختی بالای فنرها و استحکام خوب مجموعه، عموماً در واگن‌های باری مورد استفاده قرار می‌گیرد. فریم بوژی شامل یک سازه فلزی صلب است که به وسیله سیستم تعلیق اولیه متشکل از فنرهای مارپیچ و دمپره‌های اصطکاکی، بر روی محورها قرار گرفته است. نمای جانبی بوژی Y25 نصب شده در زیر واگن مولد بخار به همراه اجزای اصلی سیستم تعلیق، در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: نمای جانبی بوژی Y25 نصب شده زیر واگن مولد بخار و اجزای اصلی آن اتصال بدنه واگن به فریم بوژی از طریق کاسه بوژی صورت می‌گیرد که شکل و محل قرارگیری آن در شکل ۵ نشان داده شده است.



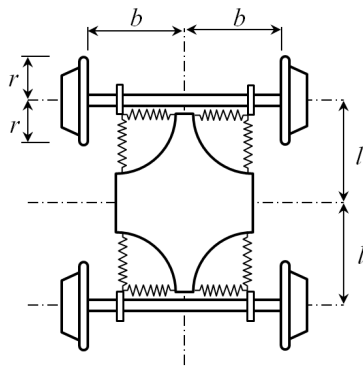
شکل ۵: فریم بوژی Y25 شامل اتصال کاسه بوژی و محل قرارگیری جعبه پاتاقان

^۱Hunting

^۲Klingel formula

^۳Hopf bifurcation theory

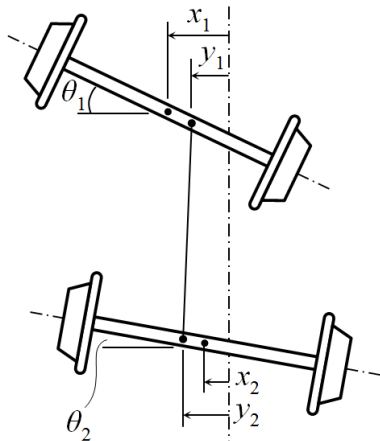
^۴حرکت دورانی حول محور عمود بر صفحه ریل‌ها.



شکل ۷: نمای بالایی مدل بوژی شامل یک فریم و دو چرخ و محور و سیستم تعلیق اولیه [۱۰]

جدول ۱: مشخصات و پارامترهای اصلی بوژی Y25 [۱۲]

پارامتر	مقدار (واحد)	توضیحات
r	۴۵ (cm)	شعاع نامی چرخ
$2b$	۱/۵ (m)	فاصله عرضی دو چرخ
$2l$	۱/۸ (m)	فاصله طولی دو محور
m_1	۱۸۱۳ (kg)	جرم چرخ و محور
I	۱۱۲۰ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	ممان چرخشی چرخ و محور
m_2	۲۶۱۵ (kg)	جرم فریم بوژی
J	۳۰۶۷ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	ممان چرخشی فریم بوژی
k_1	۴e۷ (N/m)	سختی عرضی بین محور و فریم
k_2	۵/۵e۷ ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$)	سختی پیچشی بین محور و فریم



شکل ۸: درجات آزادی حرکتی چرخ و محورها و فریم بوژی

همانطور که در شکل ۹- (الف) مشاهده می‌گردد، R نشان دهنده شعاع مسیر حرکت و φ موقعیت زاویه‌ای هر چرخ و محور نسبت به مرکز قوس است که تغییرات آن از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$\dot{\varphi} = V/R \quad (2)$$

بنابراین مرکز جرم هر چرخ و محور با سرعت مماسی $\dot{\varphi}(R + x_i)$ و سرعت عمود بر مسیر \dot{x}_i نسبت به مرکز قوس در حال حرکت است. مقدار مطلق سرعت دورانی یا چرخ و محور معادل $(\dot{\theta}_i + \dot{\varphi})$ است، بنابراین مطابق شکل ۹- (ب) برآیند سرعت در راستای حرکت یا برای هر چرخ نسبت به مرکز جرم آن چرخ برابر با $b(\dot{\theta}_i + \dot{\varphi})$ خواهد بود.

چرخ و فریم، مقادیر میرایی، شعاع چرخ، جرم بوژی و سختی عرضی را بر سرعت بحرانی وسیله نقلیه ریلی بررسی کردند.

مطابق استاندارد ریلی EN 14363، جهت بررسی ایمنی سیر از نظر دینامیکی و نیز راحتی سفر، شتاب‌های حاصل از ارتعاشات عرضی بوژی و جعبه یاتاقان‌ها اندازه گیری می‌گردد. از سوی دیگر، اثرات ناشی از عیوب مختلف زیرساخت، شامل افتادگی یا دفورمگی در طول خط، در ارتعاشات عرضی و یا عمودی خود را نشان می‌دهند. بنابراین با بهبود ارتعاشات عرضی، می‌توان باعث بهبود ایمنی سیر و نیز افزایش راحتی سفر گردید. یکی از مهمترین اثرات ارتعاشات عرضی، وقوع پدیده هانتینگ است. لذا در این مقاله به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر پدیده هانتینگ در بوژی Y25 پرداخته شده است [۱۰].

در حال حاضر، با توجه به محدودیت‌های مربوط به سرعت بحرانی و پدیده هانتینگ، حداکثر سرعت بهره‌برداری واگن‌های مولد بخار در راه آهن کشور برابر با 120 km/h می‌باشد که به میزان 20 km/h پایین‌تر از حداکثر سرعت سیر مجاز سایر واگن‌های مسافری است. در نتیجه حداکثر سرعت حرکت قطارهایی که در آرایش خود دارای واگن مولد بخار هستند، به 120 km/h محدود می‌گردد که این کاهش سرعت منجر به کاهش قابل توجه ظرفیت شبکه ریلی کشور خواهد شد. هدف از انجام این پژوهش یافتن راهکارهای عملی جهت افزایش سرعت بحرانی واگن مولد بخار و در نتیجه افزایش سرعت سیر کل قطار است. به این منظور مدلی پارامتری از ارتعاشات جانبی بوژی Y25 ارائه و تاثیر هر پارامتر بر سرعت بحرانی بررسی شده است. این مدل بر پایه مدل ارائه شده توسط بهرامی توسعه داده شده است [۱۱]. سپس مسئله مقدار ویژه برای این سیستم تشکیل و حل شده و مقادیر ویژه و نسبت میرایی سیستم برای سرعت‌های مختلف محاسبه گردیده است. با افزایش پله به پله سرعت، نسبت میرایی برای مقادیر ویژه سیستم به سمت منفی شدن تغییر می‌نمایند. حداقل سرعتی که در آن یک نسبت میرایی منفی گردد، سرعت بحرانی بوژی خواهد بود و سیر با سرعت بالاتر از آن ایمن نخواهد بود. در حالت کلی، سرعت سیر وسیله نقلیه ریلی باید به گونه‌ای باشد که مقادیر ویژه سیستم به مرحله ناپایداری نرسند.

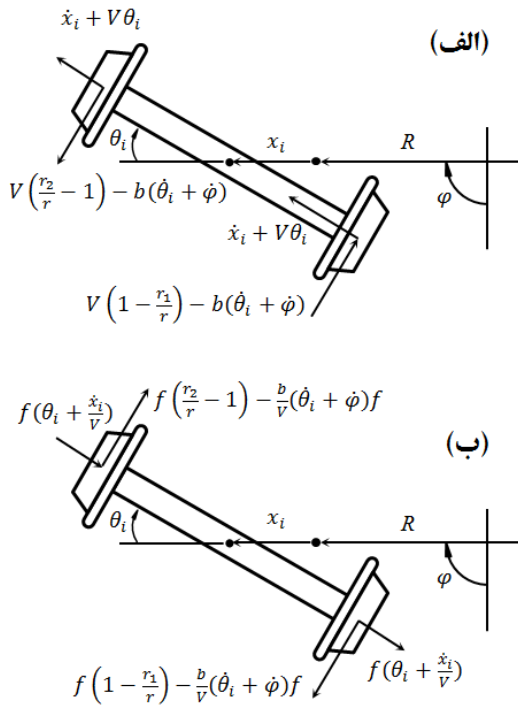
۲ مدل ارتعاشی بوژی Y25

بوژی Y25 از سه جرم اصلی شامل یک فریم و دو عدد چرخ و محور تشکیل شده است. فریم بوژی به صورت صلب بوده و به وسیله سیستم تعلیق اولیه بر روی چرخ و محورها قرار گرفته است. اتصال بدنه و فریم نیز از طریق کاسه بوژی صورت می‌گیرد. بنابراین با نوشتن دو معادله حرکت در صفحه حرکتی برای هر قطعه، در مجموع شش معادله حرکت کوپل شده بدست می‌آید. نمای بالایی بوژی Y25 به همراه اجزای اصلی در شکل ۷ آورده شده است. پارامترهای حاکم بر مدل نیز در جدول ۱ ارائه شده است [۱۲].

درجات آزادی هر قطعه در شکل ۸ نشان داده شده است. چرخ و محور دارای حرکت دورانی و جابجایی عرضی (θ_i, x_i) و فریم دارای حرکت جابجایی عرضی (y_i) در هر انتها بوده و کل مجموعه بوژی دارای سرعت خطی V در راستای مسیر است.

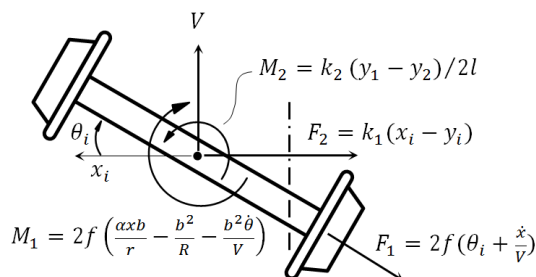
بر صفحه حرکت به صورت رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$\text{creep force couple} = 2f \left(\frac{\alpha b}{r} x - \frac{b^2}{R} - \frac{b^2 \dot{\theta}}{V} \right) \quad (6)$$



شکل ۱۰: (الف) مؤلفه‌های سرعت لغزشی و (ب) نیروهای خزشی اعمالی روی هر چرخ و محور

بنابراین نیروهای وارده به چرخ و محور در هنگام عبور از قوس مطابق شکل ۱۱ بدست می‌آید که در آن F_1 و M_1 به ترتیب نیرو و کوپل خزشی اعمالی به چرخ و محور هستند که مقدار M_1 از رابطه (۶) بدست می‌آید. نیرو و ممان F_2 و M_2 به ترتیب ناشی از سختی جانبی k_1 و سختی پیچشی k_2 بین فریم بوژی و چرخ و محور است.



شکل ۱۱: نیروهای خزشی معادل و گشتاور اعمالی به چرخ و محور هنگام عبور از قوس

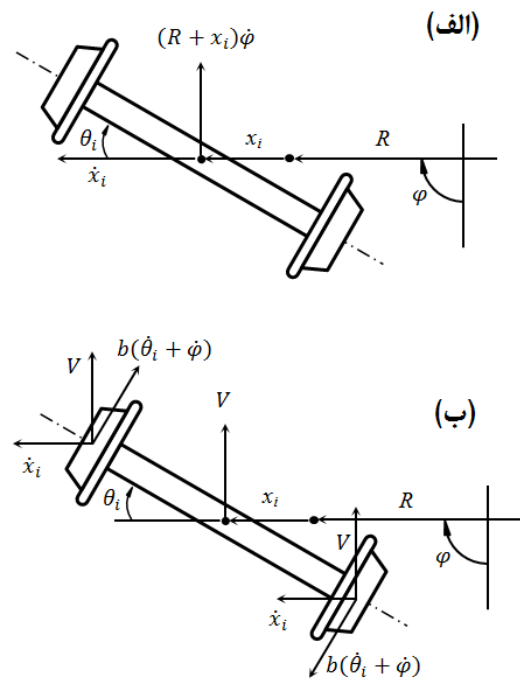
با نوشتن قانون دوم نیوتون در راستای x_i و نیز حول راستای عمود بر صفحه، معادلات حرکت برای هر چرخ و محور به صورت روابط (۷) و (۸) بدست می‌آید.

$$\sum F_{x_i} = m\ddot{x} \Rightarrow m_1\ddot{x}_i + F_1 \cos \theta_i + F_2 = 0 \quad (7)$$

$$\sum M = I\ddot{\theta} \Rightarrow I\ddot{\theta}_i + M_2 - M_1 = 0 \quad (8)$$

با فرض حرکت دورانی چرخ و محور بر روی ریل به صورت غلتش خالص با سرعت $\Omega = V/R$ ، سرعت خطی مرکز جرم چرخ داخلی در قوس و چرخ خارجی در قوس به ترتیب برابر با Ωr_2 و Ωr_1 خواهد بود که در آن r_2 و r_1 به ترتیب شعاع دورانی چرخ داخل قوس و چرخ خارج قوس هستند. بنابراین سرعت خطی مرکز جرم هر چرخ به صورت Vr_1/r و Vr_2/r محاسبه می‌گردد. نیروی خزشی با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه است. در این رابطه f ضریب خزش و V_{slip} سرعت لغزشی هر چرخ بر روی ریل است که از تفاوت بین سرعت غلتشی هر یک از چرخ‌ها بدست می‌آید [۱۳].

$$\text{creep force} = \frac{f}{V_{slip}} \quad (3)$$



شکل ۹: (الف) حرکت چرخ و محور در قوس و (ب) مؤلفه‌های سرعت مرکز هر چرخ

مؤلفه‌های سرعت لغزشی هر چرخ در شکل ۱۰ - (الف) نشان داده شده است. با استفاده از رابطه (۳) و مؤلفه‌های سرعت لغزشی، نیروهای خزشی ناشی از این سرعت‌ها مطابق شکل ۱۰ - (ب) محاسبه می‌گردد که در این روابط سرعت دورانی چرخ و محور نسبت به مرکز قوس از رابطه (۲) قابل محاسبه است.

با توجه به مخروطی بودن سطح چرخ‌ها، تغییرات شعاع چرخ‌های داخلی و خارجی از رابطه‌های (۴) و (۵) بدست می‌آید که در آن نصف زاویه مخروطیت معادل چرخ است [۱۴].

$$r_o = r + \alpha x \quad (4)$$

$$r_i = r - \alpha x \quad (5)$$

با جاگذاری روابط (۲) و (۴) و (۵) در معادله نیروهای خزشی عمود بر محور محاسبه شده در شکل ۱۰ - (ب)، کوپل نیرویی اعمالی در جهت عمود

$$[K_{\psi}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-\psi f \alpha b}{r} \\ -k_{\psi} & 0 & -k_{\psi} \\ k_{\psi} l & -k_{\psi} & -k_{\psi} l \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$[K_{\varphi}] = \begin{bmatrix} c & \frac{k_{\varphi}}{\psi l} & \frac{-k_{\varphi}}{\psi l} \\ 0 & k_{\varphi} & k_{\varphi} \\ -k_{\varphi} & -k_{\varphi} l - \frac{k_{\varphi}}{l} & k_{\varphi} l + \frac{k_{\varphi}}{l} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

با بازنویسی معادله (۱۵) به فرم استاندارد مطابق رابطه (۲۳) و حل مسئله مقدار ویژه، شکل مودهای سیستم محاسبه می‌گردد. کمترین سرعتی که در آن مودهای ناپایدار دارای قسمت حقیقی مثبت مربوط به حرکت عرضی مشاهده گردد، سرعت بحرانی مجموعه است [۱۱].

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (23)$$

پارامترهای مربوط به بوژی Y25 و واگن مولد بخار و مقادیر آنها برای واگن تحت بررسی در این مقاله در جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: سایر مشخصات بوژی Y25 و واگن مولد بخار تحت بررسی

پارامتر	مقدار (واحد)	توضیحات
α	۰/۰۵ (rad)	مخروطیت معادل چرخ
f	۱/۲e۷ (N)	ضریب خزش بین چرخ و ریل
m_{ψ}	۳۳ - ۵۷ (Ton)	جرم واگن مولد بخار با مخازن سوخت و آب پر و خالی

۳ نتیجه‌گیری

با جایگذاری مقادیر جداول ۱ و ۲ در رابطه (۱۵) و حل مسئله مقدار ویژه برای سرعت‌های مختلف و محاسبه مقادیر ویژه، سرعت بحرانی واگن بخار با مخازن پر، برابر با ۱۳۷/۵ کیلومتر بر ساعت بدست می‌آید. از پارامترهای موجود در مدل، مقادیر I و J ، به ترتیب وابسته به مقادیر m_{ψ} و m_{φ} هستند و ضریب خزش وابسته به تماس چرخ و ریل بوده و به آسانی قابل کنترل نیست. در سوی دیگر، سختی پیچشی بین فریم و چرخ و محورها با توجه به میزان سختی جانبی و همچنین ابعاد فریم بوژی با استفاده از رابطه (۲۴) قابل محاسبه است.

$$k_{\psi} = k_{\psi} (b^2 + l^2) \quad (24)$$

بنابراین پارامترهای مستقل طراحی در مدل ارائه شده $\alpha, l, b, r, m_{\psi}, m_{\varphi}, k_{\psi}$ هستند. میزان تغییرات سرعت بحرانی بر حسب تغییرات پارامترهای طراحی در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ آورده شده است. مطابق شکل ۱۲، سرعت بحرانی وابستگی زیادی به فاصله بین دو محور داشته و با افزایش این پارامتر، مقدار سرعت بحرانی افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. مطابق فیش UIC 515 از مقررات بین المللی راه‌آهن‌ها، کاهش فاصله طولی بین محورها در یک بوژی، باعث افزایش ناپایداری در سیستم خواهد شد که با نتایج بدست آمده مطابقت دارد [۱۵]. از طرفی مطابق استاندارد UIC 518، مقدار مجاز افزایش فاصله محورها برای هر بوژی به میزان ۵٪ است و هر تغییری بیش از این مقدار نیازمند انجام تست‌های دینامیکی بر روی واگن است [۱۶]. با افزایش ۵ درصدی در فاصله دو محور بوژی، مقدار سرعت بحرانی به ۱۴۱/۵ km/h می‌رسد. اما ایجاد تغییر در این پارامتر مستلزم ایجاد تغییرات بسیار زیاد در طراحی بوژی است. در سوی دیگر، جرم واگن

پدیده هانتینگ در مسیر مستقیم رخ می‌دهد که در آن $R \rightarrow \infty$ است. لذا مؤلفه‌های دارای شعاع قوس در مخرج قابل صرف‌نظر کردن هستند. همچنین با توجه به کوچک بودن زاویه θ_i ، ترم $F_1 \cos \theta_i$ در رابطه (۷) برابر با F_1 خواهد بود. بنابراین معادلات حرکت برای چرخ و محور جلو به صورت روابط (۱۰) و (۹)، برای چرخ و محور عقب به صورت روابط (۱۱) و (۱۲) و برای فریم بوژی به صورت روابط (۱۳) و (۱۴) نوشته می‌شوند.

$$m_1 \ddot{x}_1 + \frac{\psi f}{v} \dot{x}_1 + k_1(x_1 - y_1) + \psi f \theta_1 = 0, \quad (9)$$

$$I \ddot{\theta}_1 + \frac{\psi f b^2}{v} \dot{\theta}_1 - \psi f \frac{\alpha b}{r} x_1 + k_{\psi} \theta_1 + \frac{k_{\psi}}{\psi l} (y_1 - y_{\psi}) = 0, \quad (10)$$

$$m_1 \ddot{x}_{\psi} + \frac{\psi f}{v} \dot{x}_{\psi} + k_1(x_{\psi} - y_{\psi}) + \psi f \theta_{\psi} = 0, \quad (11)$$

$$I \ddot{\theta}_{\psi} + \frac{\psi f b^2}{v} \dot{\theta}_{\psi} - \psi f \frac{\alpha b}{r} x_{\psi} + k_{\psi} \theta_{\psi} + \frac{k_{\psi}}{\psi l} (y_1 - y_{\psi}) = 0, \quad (12)$$

$$(m_{\psi} + m_{\varphi}) \left(\frac{\ddot{y}_1 + \ddot{y}_{\psi}}{\psi} \right) + k_1(y_1 - x_1) + k_1(y_{\psi} - x_{\psi}) = 0, \quad (13)$$

$$-\frac{J}{\psi l} \ddot{y}_1 + \frac{J}{\psi l} \ddot{y}_{\psi} + k_{\psi} l (x_1 - x_{\psi}) - k_{\psi} (\theta_1 + \theta_{\psi}) - \left(k_{\psi} l + \frac{k_{\psi}}{l} \right) (y_1 + y_{\psi}) = 0, \quad (14)$$

با بازنویسی معادلات حرکت به فرم ماتریسی، معادله ارتعاشات عرضی مجموعه به صورت رابطه (۱۵) بدست می‌آید که در آن ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی به ترتیب از روابط (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) محاسبه می‌گردد.

$$[M] \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{x}_{\psi} \\ \ddot{\theta}_{\psi} \\ \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_{\psi} \end{bmatrix} + [C] \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{x}_{\psi} \\ \dot{\theta}_{\psi} \\ \dot{y}_1 \\ \dot{y}_{\psi} \end{bmatrix} + [K] \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \\ x_{\psi} \\ \theta_{\psi} \\ y_1 \\ y_{\psi} \end{bmatrix} = 0 \quad (15)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{m_{\psi} + m_{\varphi}}{\psi} & \frac{m_{\psi} + m_{\varphi}}{\psi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{J}{\psi l} & \frac{J}{\psi l} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{\psi f}{v} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\psi f b^2}{v} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\psi f}{v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\psi f b^2}{v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

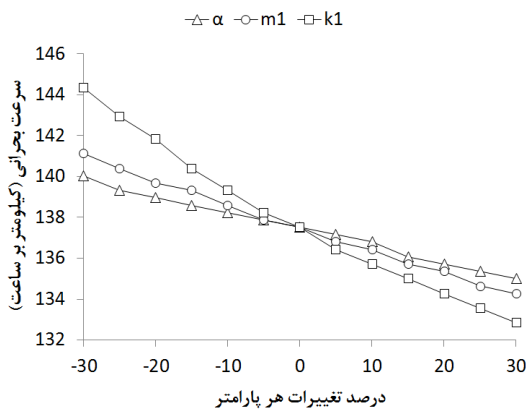
$$[K] = \begin{bmatrix} K_1 & K_{\psi} \\ K_{\psi} & K_{\varphi} \end{bmatrix} \quad (18)$$

که در رابطه (۱۸) مقادیر ماتریس‌های K_i به صورت زیر است:

$$[K_1] = \begin{bmatrix} k_1 & \psi f & 0 \\ \frac{-\psi f \alpha b}{r} & k_{\psi} & 0 \\ 0 & 0 & k_1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$[K_{\psi}] = \begin{bmatrix} 0 & -k_1 & 0 \\ 0 & \frac{k_{\psi}}{\psi l} & \frac{-k_{\psi}}{\psi l} \\ \psi f & 0 & -k_1 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

اعمال این تغییرات، واگن مولد بخار امکان سیر با سرعت ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت را خواهد داشت. بنابراین می‌توان سرعت سیر قطارهای دارای این نوع واگن را به میزان ۲۰ کیلومتر بر ساعت بهبود بخشید که موجب افزایش ظرفیت شبکه ریلی کشور در بخش ناوگان مسافری خواهد شد.



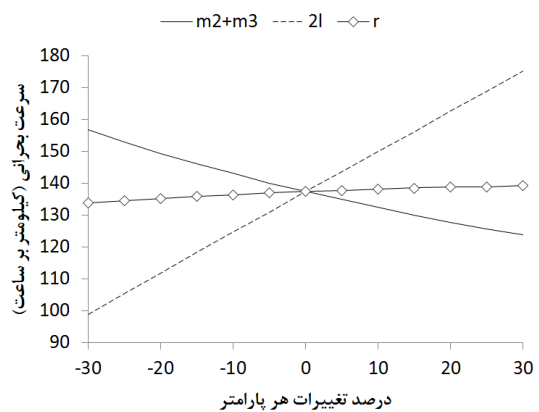
شکل ۱۳: نمودار تغییرات سرعت بحرانی بر حسب درصد تغییرات مخروطیت معادل چرخ و جرم چرخ و محور و سختی عرضی فریم

مراجع

- [1] Iwnicki, SD, Stichel, Sebastian, Orlova, A, and Hecht, M. Dynamics of railway freight vehicles. *Vehicle system dynamics*, 53(7):995-1033, 2015.
- [2] Spiryagin, Maksym, Cole, Colin, Sun, Yan Quan, Mc-Clanachan, Mitchell, Spiryagin, Valenty, and Mc-Sweeney, Tim. *Design and simulation of rail vehicles*. CRC Press, 2014.
- [3] Thompson, John Michael Tutill, Thompson, Michael, and Stewart, HB. *Nonlinear dynamics and chaos*. John Wiley & Sons, 2002.
- [4] Esveld, Coenraad. *Modern railway track*. 2001.
- [5] Jensen, Carsten Nordstrøm and True, Hans. On a new route to chaos in railway dynamics. *Nonlinear Dynamics*, 13(2):117-129, 1997.
- [6] Ahmadian, Mehdi and Yang, Shaopu. Hopf bifurcation and hunting behavior in a rail wheelset with flange contact. *Nonlinear Dynamics*, 15(1):15-30, 1998.
- [7] Yabuno, H, Okamoto, T, and Aoshima, N. Effect of lateral linear stiffness on nonlinear characteristics of hunting motion of a railway wheelset. *Meccanica*, 37(6):555-568, 2002.
- [8] Karami, Mohammadi A and Ale Ali, N. Effects of nonlinear suspension on hunting and critical velocity of railway wheelset. 6(2):51-59, 2013.
- [9] Younesian, D, Jafari, AA, and Serajian, R. Effects of the bogie and body inertia on the nonlinear wheel-set hunting recognized by the hopf bifurcation theory. *Int J Auto Engng*, 3(4):186-196, 2011.
- [10] BS EN 14363 : Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - testing of running behavior and stationary tests. *British Standards Institution*, 2005.

[۱۱] نیکخواه-بهرامی، منصور. *تئوری ارتعاشات و کاربرد آن در مهندسی. انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۴.*

نیز تاثیر قابل توجهی در سرعت بحرانی وسیله نقلیه دارد و با تغییر حجم مخازن سوخت و آب، به راحتی می‌توان مقدار این پارامتر را کنترل نمود. با توجه به افزایش شتاب‌های جانبی ناشی از افزایش جرم واگن، نیروهای جانبی بیشتری بر بدنه بوژی اعمال می‌گردد که باعث افزایش احتمال وقوع پدیده هانتینگ خواهد گردید. لذا به نظر می‌رسد با افزایش جرم واگن، سرعت بحرانی کاهش خواهد یافت [۴]. مطابق شکل ۱۲، با کاهش ۲۰ درصدی در جرم بدنه واگن، مقدار سرعت بحرانی به میزان ۸/۶ درصد افزایش می‌یابد. سرعت بحرانی با شعاع چرخ نیز رابطه مستقیم دارد. به طوری که با کاهش شعاع چرخ، سرعت بحرانی نیز کاهش می‌یابد که این پدیده با گذشت عمر چرخ و انجام تراشکاری روی سطح آن به مرور زمان اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۴: نمودار تغییرات سرعت بحرانی بر حسب درصد تغییرات جرم بدنه واگن و طول محور و شعاع چرخ

پارامتر تاثیر گذار دیگر ضریب سختی عرضی بین فریم و محور است. مطابق شکل ۱۳ با کاهش ۳۰ درصدی در پارامتر، سرعت بحرانی به میزان ۵ درصد افزایش می‌یابد. سختی عرضی در بوژی Y25 ناشی از تماس بین فلز با فلز بوده و وابستگی شدیدی به مدول الاستیسیته سطوح تماسی دارد. بنابراین با قرار دادن صفحات فلزی با مدول الاستیسیته پایین در فضای موجود بین جعبه یاتاقان و فریم که در حدود ۳ الی ۵ میلیمتر است، می‌توان سختی جانبی بین فریم و محور را کاهش داد. جرم چرخ و محور و مخروطیت معادل چرخ نیز رابطه عکس با تغییرات سرعت بحرانی دارد که ایجاد تغییر در آنها مستلزم بهبود تکنولوژی ساخت و تغییر در پروفیل چرخ است. جرم چرخ و محور جزو جرم فنر بندی نشده محاسبه می‌شود که مطابق فیش UIC 518 افزایش آن باعث کاهش سرعت بحرانی وسیله نقلیه و افزایش سایش چرخ‌ها خواهد شد [۱۶]. در خصوص مخروطیت معادل چرخ نیز مطابق شکل ۱۰-۲ از کتاب Esveld، افزایش این پارامتر باعث کاهش پایداری سیستم می‌گردد [۴]. لذا نتایج بدست آمده از شکل ۱۳ مطابق با اصول بیان شده در مراجع فوق است.

با توجه به نتایج بدست آمده، بهترین پارامترها جهت افزایش میزان سرعت بحرانی در واگن مولد بخار، کاهش ظرفیت مخازن و ضریب سختی جانبی بوژی است. با کاهش ۳۰ درصدی حجم مخازن آب و سوخت، سرعت بحرانی به ۱۴۴/۳ km/h افزایش می‌یابد. بعلاوه با کاهش ۳۰ درصدی در سختی جانبی بوژی، سرعت بحرانی به ۱۶۲/۷ کیلومتر بر ساعت خواهد رسید که افزایش ۱۸ درصدی را در مقایسه با طراحی اولیه نشان می‌دهد. با

- [12] Molatefi, H, Hecht, M, and Kadivar, MH. Critical speed and limit cycles in the empty y25-freight wagon. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 220(4):347-359, 2006.
- [13] Wang, Tianlong, Liu, Pengfei, Xiang, Fan, and Liang, Yu. A brief review of modelling and simulation of three dimensional train system dynamics. *Journal of Advances in Vehicle Engineering*, 3(2), 2017.
- [14] Orlova, Anna and Boronenko, Yuri. The anatomy of railway vehicle running gear. *Handbook of railway vehicle dynamics*, 3:1-552, 2006.
- [15] UIC 515-1: General provisions applicable to components of trailer bogies. *International Union Railways*, 2003.
- [16] UIC 518: Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior, safety, track fatigue and running behavior. *International Union Railways*, 2009.