

تخمین و ارزیابی نیروهای دینامیکی چرخ-ریل در خطوط ریلی - شبیه‌سازی عددی

سجاد ستاری^۱، محمد سعادت^{۲*}، سید حسن میرطلایی^۳، مهدی صالحی^۴، علی سلیمانی^۵

^۱گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. sajjad.sattari@gmail.com

^۲گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. saadat@pmc.iaun.ac.ir

^۳گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. mirtalaie@pmc.iaun.ac.ir

^۴گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. mehdi.salehi@pmc.iaun.ac.ir

^۵گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. soleimani@pmc.iaun.ac.ir

* نویسنده مسئول: محمد سعادت

چکیده

ارزیابی نیروهای دینامیکی چرخ-ریل، در پیش‌بینی عملکرد وسایل نقلیه ریلی و اندرکنش قطار-خط ضروری است. امروزه برای پذیرش وسایل نقلیه ریلی، نیروهای تماس چرخ-ریل یکی از معیارها به منظور ارزیابی اطمینان حرکت، بارگذاری خط و رفتار ارتعاشی می‌باشد. نیروهای دینامیکی بیش از حد، با ایجاد و رشد عیوب چرخ و ریل، عامل خروج از خط، تصادفات و تخریب‌ها می‌باشند و بایستی به طور پیوسته پایش انجام شود. روش‌های موجود برای محاسبه نیروی دینامیکی چرخ ریل به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. در مقاله حاضر پس از مدل‌سازی یک قطار مسافری با نرم‌افزار یونیورسال مکانیزم، اثرات تغییرات سرعت (۲۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت) و بی‌نظمی‌های خط (کلاس‌های ۶ و ۱ فدرال آمریکا) بر نیروهای عمودی دینامیکی چرخ-ریل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت قطار و دامنه بی‌نظمی (در محدوده‌های مدنظر)، مقدار نیروی دینامیکی چرخ-ریل افزایش یافته است. به عنوان مثال با افزایش سرعت قطار از ۲۰ به ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در کلاس بی‌نظمی ۱، نیروی چرخ-ریل از ۹۵/۲ کیلونیوتن به ۱۳۰ کیلونیوتن تغییر کرده است.

کلمات کلیدی

نیروی دینامیکی چرخ-ریل،
وسایل نقلیه ریلی، نرم‌افزار
یونیورسال مکانیزم، بی‌نظمی خط.

۱- مقدمه

کمیت و کیفیت سیستم حمل‌ونقل یک کشور، از مهم‌ترین نشانه‌های توسعه‌یافتگی آن کشور است. از مهم‌ترین امتیازاتی که سیستم حمل‌ونقل ریلی را در مقایسه با سایر سیستم‌های حمل‌ونقل متمایز می‌سازد، می‌توان به مواردی هم چون، ظرفیت بالای حمل بار و مسافر، ایمنی سیر، برخورداری از زمان‌بندی حرکت منسجم و منظم، توانایی دستیابی به سرعت بالا، برخورداری از صرفه اقتصادی به‌ویژه در مصرف سوخت و در نهایت آلودگی زیست‌محیطی بسیار کم اشاره نمود. موارد فوق دلایلی بوده است که امروزه جهان شاهد رشد و توسعه قابل ملاحظه‌ای در حمل‌ونقل ریلی به خصوص در احداث خطوط جدید با سرعت‌های بالا می‌باشد. با توسعه پایدار و سریع اجتماعی و اقتصادی در کشورها، تقاضای روزافزون برای حمل‌ونقل ریلی مسافری و باری به وجود آمده است، که ضرورت افزایش ظرفیت قطارهای باری و افزایش سرعت و بهبود کیفیت سیر با حفظ و اطمینان از ایمنی ترافیک را بیش‌ازپیش مهم می‌سازد. بنابراین، پیش‌بینی خصوصیات دینامیکی اندرکنش چرخ-ریل برای طراحی و تولید انواع جدید وسایل نقلیه ریلی به علاوه ساخت و تعمیر-نگهداری خطوط راه‌آهن امری ضروری خواهد بود. جهت حرکت ایمن و پایدار قطارها، بهره‌گیری از خطوط ریلی با عملکرد دینامیکی بهتر ضروری است؛ چراکه وسایل نقلیه ریلی با عملکرد دینامیکی بهتر، اثرات تخریبی خود بر خطوط را در اندرکنش‌های بین وسایل نقلیه و خطوط ریلی کاهش خواهند داد. علیرغم قابلیت بشر جهت شبیه‌سازی دقیق حرکت یک جسم در حال پرواز در فضا و همچنین کنترل صحیح آن، شبیه‌سازی اندرکنش چرخ و ریل به صورت دقیق امری غیرممکن است. این مسئله نشان می‌دهد که رابطه بین چرخ-ریل و اندرکنش وسیله نقلیه-خط هم چنان در رده مسائل پیچیده در مطالعه دینامیکی وسایل نقلیه و خطوط ریلی باقی مانده است. وسایل نقلیه ریلی و سازه خط یک سیستم یکپارچه با وابستگی و اندرکنش نسبت به یکدیگر را تشکیل می‌دهند. بنابراین، حین مطالعه عملکرد دینامیکی وسایل نقلیه ریلی، خط راه‌آهن را نمی‌توان به عنوان تنها منبع خارجی تلقی نمود. به‌بیان‌دیگر، خطوط ریلی به خودی خود دارای خصوصیات تحریک مستقل از قطارها نبوده و ارتعاش در این سیستم در اثر ناهمواری‌های تصادفی چرخ و ریل پدید می‌آید. بسیاری از محققین کشورهای مختلف جهت مطالعه دقیق خصوصیات دینامیکی سازه خط از روش شبیه‌سازی تحلیلی استفاده می‌کنند. مزیت این امر جایگزینی آزمایش‌های فیزیکی زمان‌بر و پرهزینه با مطالعات شبیه‌سازی عددی روی مسائل مورد بحث خواهد بود. در سال‌های اخیر، مدل‌های محاسباتی متنوعی توسعه

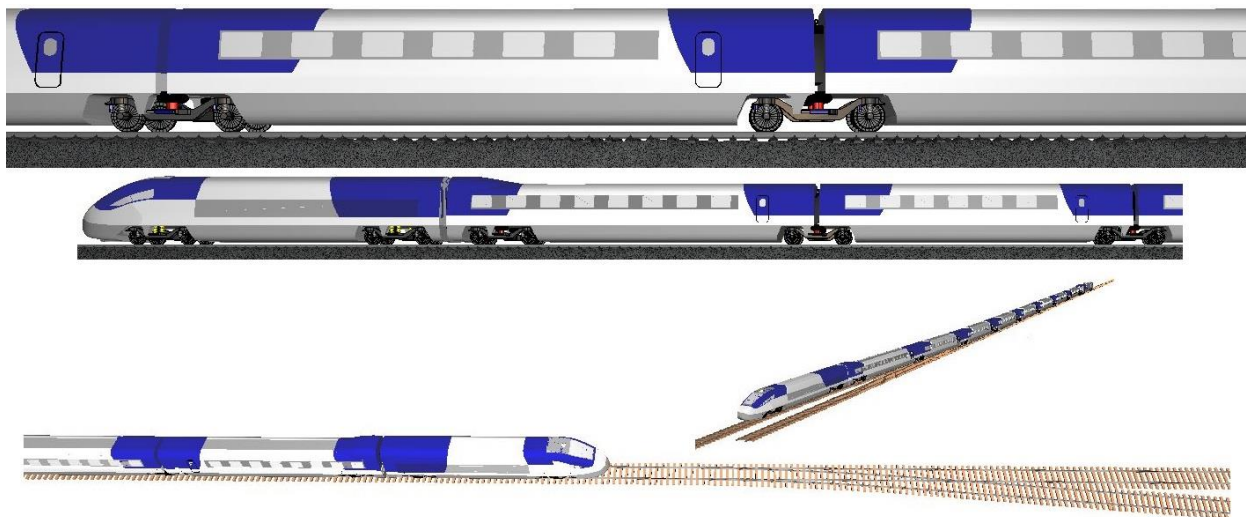
داده شده و پیشرفت‌هایی در این زمینه به دست آمده است [۸-۱].

۲- روش‌های تخمین نیروهای دینامیکی چرخ-ریل

تشخیص نیروی دینامیکی چرخ-ریل در این حوزه یکی از مباحث مورد علاقه محققینی است که در زمینه ارتعاشات و نویز خطوط ریلی و اندرکنش خط و قطار فعالیت می‌کنند. برای محققینی که در زمینه ارتعاشات و نویز خطوط ریلی مطالعه می‌کنند، اثر نیروی دینامیکی چرخ-ریل بر ارتعاشات زمین مهم است. هم‌چنین محققان حوزه مطالعاتی اندرکنش خط و قطار تمایل زیادی به بدست آوردن مقدار نیروی چرخ با در نظر گرفتن شرایط مختلف خط و قطار دارند. روش‌های موجود برای محاسبه نیروی دینامیکی چرخ ریل به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش‌های مستقیم عکس‌العمل‌های داخلی چرخ یا قطار (شامل مومنت‌های برشی و خمشی، شتاب یا جابجایی) اندازه‌گیری می‌شود که مستقیماً به نیروی دینامیکی چرخ-ریل مرتبط می‌شود. این روش‌ها دشواری‌های بسیاری از قبیل سخت بودن دسترسی به خط دارند. برای مثال در خطوط ریلی شهری، خط در طول زمان کاری به دلیل قوانین ایمنی و یا فاصله زمانی کم بین دو عبور متوالی قطار به ندرت در دسترس است. قوانین ایمنی هم روز به روز محدودتر می‌شود، برای مثال دسترسی به خطوط متروی تهران بعد از سال ۲۰۱۷ که یکی از کارگران مجروح شد، به طور قابل توجهی محدود شد. دومین دسته از روش‌های اندازه‌گیری نیروی چرخ-ریل (روش‌های غیرمستقیم) از اندازه‌گیری پاسخ‌های قطار بر بدنه واگن، قاب بوژی و جعبه محور قطار عبوری از خط برای محاسبه نیروی دینامیکی چرخ-ریل استفاده می‌کند. این روش‌ها انعطاف‌پذیری بیشتری دارند، زیرا می‌توان قطارها را در زمان توقف مجهز کرد. هم‌چنین استفاده از نرم‌افزارهایی مانند MATLAB، ABAQUS، UM، ANSYS و ... جهت شبیه‌سازی سیستم‌های ریلی و استخراج نیروهای دینامیکی چرخ-ریل از مواردی است که مورد توجه پژوهشگران است (روش غیرمستقیم). امروزه با افزایش روزافزون سرعت قطارها، رشد بارگیری قطارهای باری و گوناگونی شرایط کاری، مطالعه جامع دینامیک چرخ و ریل بیش‌ازپیش اهمیت می‌یابد [۲۷-۹].

۳- شبیه‌سازی‌های مربوطه

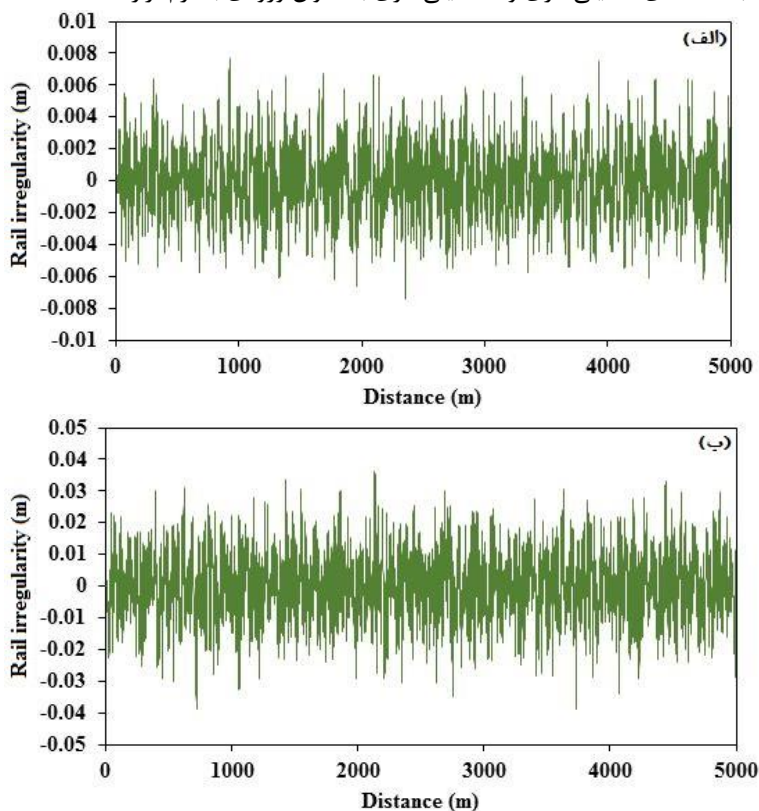
از یک نرم‌افزار مدل‌سازی پرکاربرد به نام یونیورسال مکانیزم (UM) به منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک مدل قطار استفاده شد. به منظور مدل‌سازی واگن و خط از تکنیک دینامیک چند بدنه و تئوری وینکلر استفاده شد. قابل ذکر است که از فنرهای هوایی مطابق با تئوری نیشیمورا جهت مدل کردن سیستم تعلیق ثانویه بهره گرفته شده است [۲۷-۲۶]. شمایی از مدل قطار مسافری در شکل ۱ نشان داده شده است. شبیه‌سازی حرکت قطار در خطوط مستقیم و با تغییر سرعت و بی‌نظمی‌های خط در نظر گرفته شده است و در نهایت با عبور قطار از سوزن مقایسه گردیده است.



شکل ۱: قطار مسافری مدل شده در نرم‌افزار یونیورسال مکانیزم در خطوط مستقیم و سوزن

بی‌نظمی خط به صورت تابعی تصادفی و متغیر با طول خط ریل قابل شبیه‌سازی است. تابع تصادفی می‌تواند به عنوان موج تصادفی حاصل از جمع آثار یک سری از موج‌های هارمونیک با طول موج، دامنه و فازهای مختلف لحاظ گردد. اداره راه‌آهن فدرال آمریکا تابع چگالی طیف توان

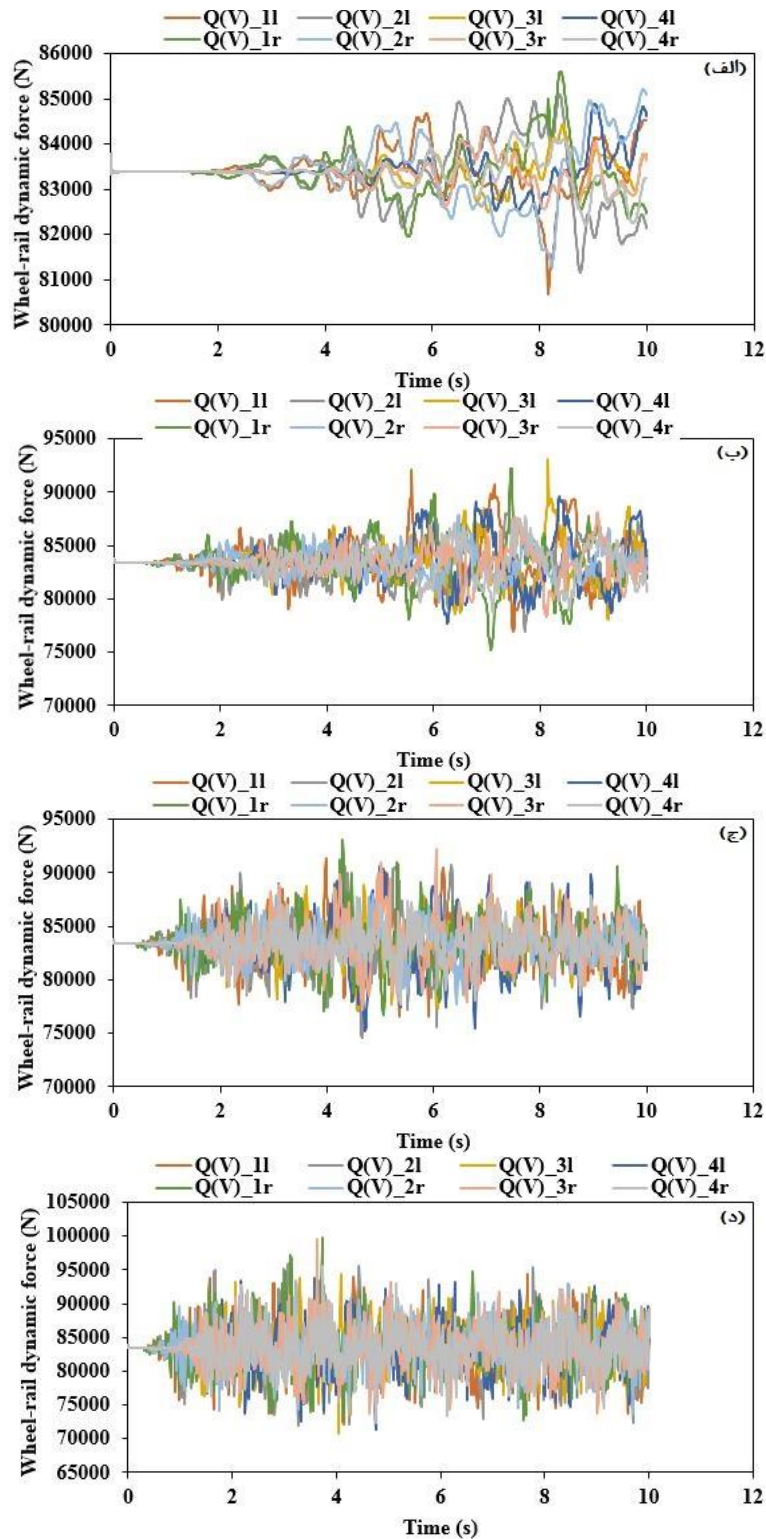
ناهمواری خطوط ریلی خود را بر اساس تعداد متعددی از اندازه‌گیری‌های میدانی به دست آورد و در نهایت به ۶ سطح تقسیم‌بندی کرد. کلاس ۱ بدترین حالت و بیش‌ترین دامنه بی‌نظمی و کلاس ۶ بهترین حالت و کم‌ترین دامنه بی‌نظمی دارد (سطوح کیفی ۱ تا ۶). در شکل ۲ دو تابع ناهمواری کلاس ۶ و کلاس ۱ با دامنه‌های ۶ میلی‌متری و ۳۰ میلی‌متری به عنوان ورودی به نرم‌افزار داده شده است.



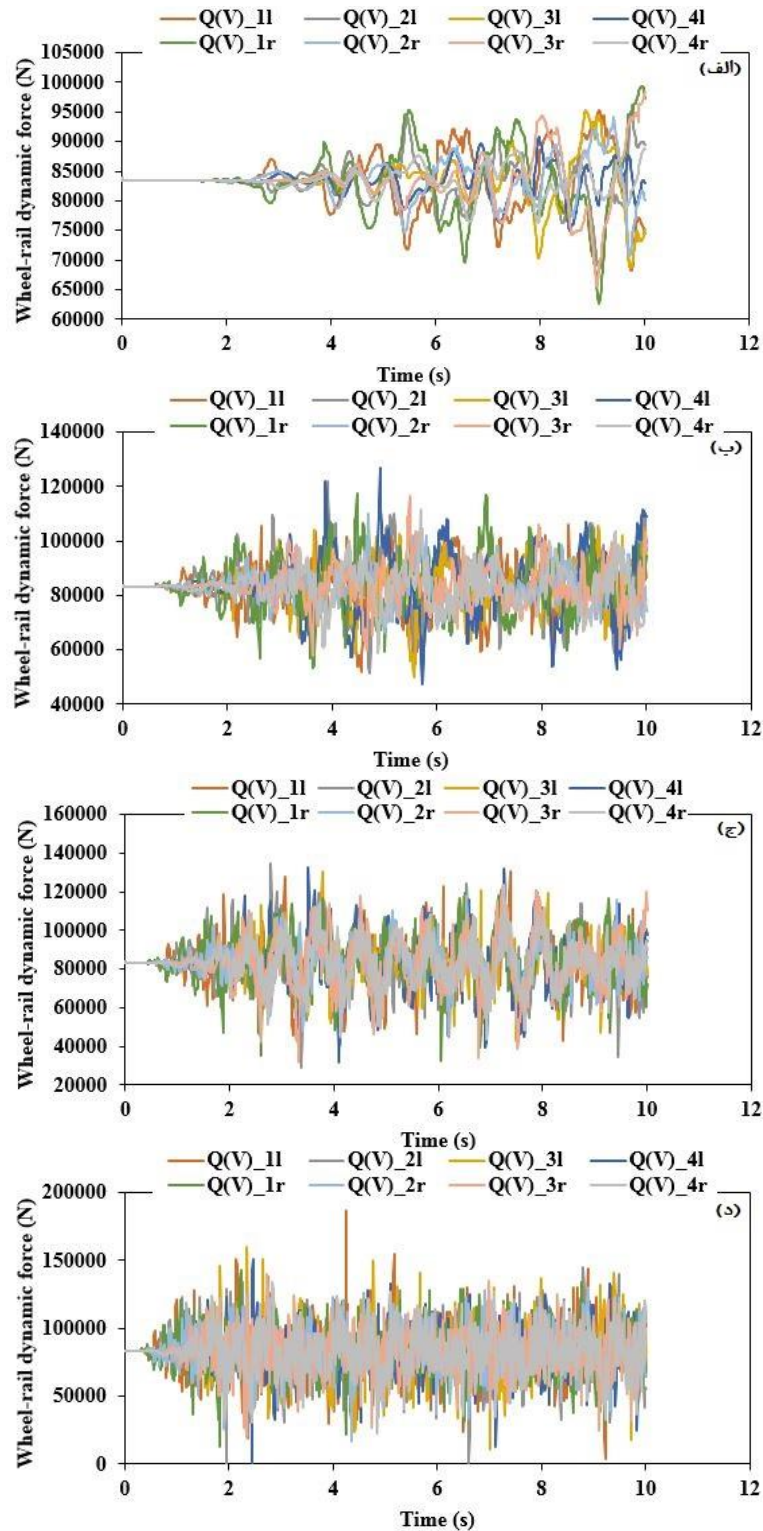
شکل ۲: بی‌نظمی‌های خط: (الف) کلاس ۶ و (ب) کلاس ۱

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در شکل‌های ۳ و ۴ مقادیر نیروی عمودی چرخ-ریل در سرعت‌های ۲۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت و در بی‌نظمی کلاس ۶ (دامنه بی‌نظمی کم‌تر) و کلاس ۱ (دامنه بی‌نظمی بیش‌تر) ارائه گردیده است (مقادیر ۴ چرخ سمت راست و ۴ چرخ سمت چپ در هر نمودار مشخص است). نتایج حاصل نشان می‌دهد که در یک بی‌نظمی ثابت با افزایش سرعت قطار، نیروهای دینامیکی چرخ-ریل افزایش می‌یابد که مطابق با سایر مراجع است. همچنین به منظور دید بهتر، یک چرخ انتخاب و مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین مقایسه گردیده است (شکل ۵). به‌عنوان مثال در بی‌نظمی کلاس ۶، با تغییر سرعت از ۲۰ به ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت مقدار بیشینه نیروی چرخ-ریل از حدود ۸۴۶۰۰ نیوتن به ۹۶۴۰۰ نیوتن رسیده و تغییراتی در حدود ۱۴ درصد داشته است. در بی‌نظمی کلاس ۱ نیز با افزایش سرعت از ۲۰ به ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت، مقدار بیشینه نیروی چرخ-ریل از حدود ۹۵۲۰۰ نیوتن به ۱۸۶۰۰۰ نیوتن رسیده و تغییراتی در حدود ۹۵ درصد داشته است.

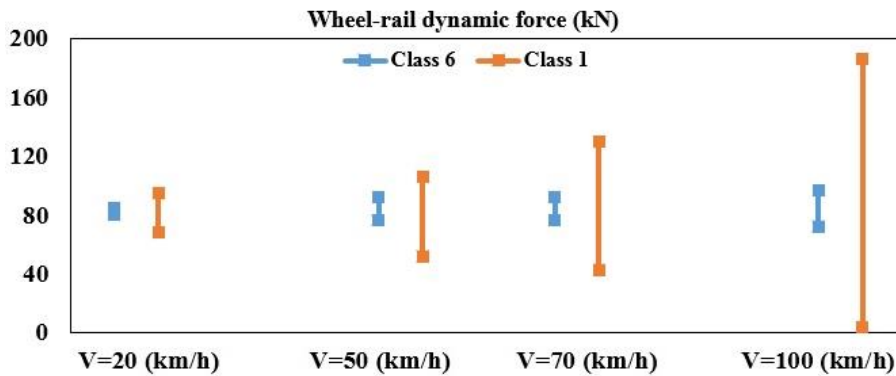


شکل ۳: نیروهای دینامیکی چرخ-ریل در کلاس بی‌نظمی ۶ در سرعت‌های مختلف: (الف) ۲۰، (ب) ۵۰، (ج) ۷۰ و (د) ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت



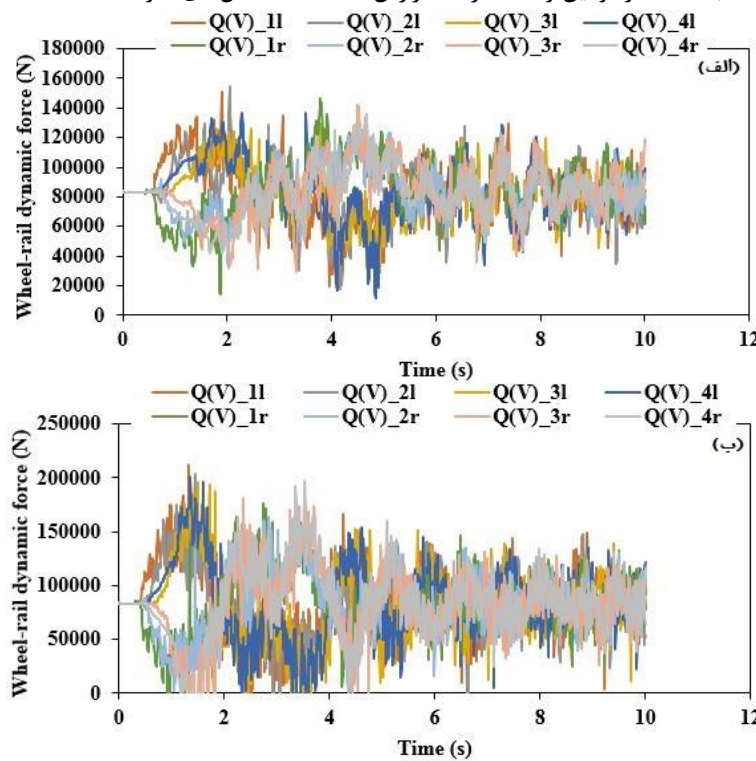
شکل ۴: نیروهای دینامیکی چرخ-ریل در کلاس بی‌نظمی ۱ در سرعت‌های مختلف: (الف) ۲۰، (ب) ۵۰، (ج) ۷۰ و (د) ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت

در شکل ۵ اثر هم‌زمان سرعت و بی‌نظمی بر نیروی دینامیکی چرخ-ریل ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که هر دو پارامتر بر نیروی چرخ-ریل مؤثر بوده و افزایش سرعت و دامنه بی‌نظمی منجر به افزایش نیرو خواهد شد که با نتایج سایر پژوهشگران مطابقت دارد [۱ و ۲۵].

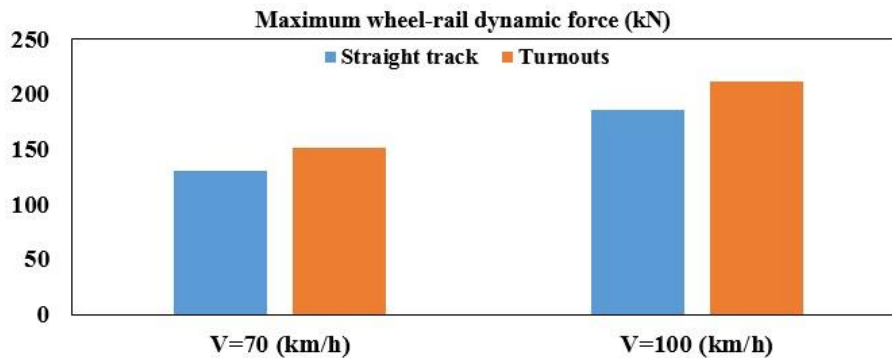


شکل ۵: تأثیر سرعت و بی‌نظمی خط بر نیروی دینامیکی چرخ-ریل

سوزن‌ها در خطوط ریلی به علت ساختار پیچیده و ناپیوسته، به عنوان یکی از مهم‌ترین نقاط ضعف زیرساخت‌های ریلی محسوب می‌شوند. از این رو ارزیابی و پیش‌بینی نیروهای دینامیکی چرخ-ریل و امکان خروج از خط در محل این ادوات از دیدگاه بهره‌برداری و نگهداری، دارای اهمیت ویژه‌ای است [۲۸-۳۴]. بدین منظور در کلاس بی‌نظمی ۱ در دو سرعت ۷۰ و ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت نیروهای دینامیکی چرخ-ریل در محل سوزن استخراج گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که در این نواحی نیروهای چرخ-ریل افزایش چشم‌گیری دارند و بایستی با سرعت کم‌تری نسبت به سایر نواحی قطار در حال حرکت باشد که در قوانین و استانداردها گزارش شده است (شکل‌های ۶ و ۷).



شکل ۶: نیروهای دینامیکی چرخ-ریل در کلاس بی‌نظمی ۱: (الف) سرعت ۷۰ و (ب) سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت



شکل ۷: مقایسه بیشینه نیروهای دینامیکی چرخ-ریل در کلاس ۱ و دو ناحیه مختلف (خط مستقیم و سوزن)

۵- نتایج

در دینامیک وسایل نقلیه ریلی، سیستم چرخ-ریل باید چندین عملکرد اساسی مانند حمل، هدایت و انتقال نیرو را انجام دهد. بنابراین، نیروهایی که در نواحی تماس چرخ-ریل ایجاد می‌شوند، تأثیرات اصلی بر ایمنی حرکت، بارگذاری خط و مشخصات راحتی وسیله نقلیه دارند. علاوه بر این، پایداری وسیله نقلیه به نیروهای تماس چرخ-ریل بستگی دارد. بنابراین شناخت این نیروها ضروری است. بدین منظور از نرم‌افزار چند بدنه یونیورسال مکانیزم جهت مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک قطار مسافری بهره گرفته شد. سپس تأثیر تغییرات سرعت قطار (۲۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت) و بی‌نظمی‌های خط (کلاس‌های ۶ و ۱) بر نیروی عمودی چرخ-ریل مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان که هر دو پارامتر به شدت بر نیروهای دینامیکی تأثیرگذارند. هم‌چنین شکل‌های ۵-۳ نشان داد که با افزایش سرعت قطار و دامنه بی‌نظمی خط، نیروهای دینامیکی چرخ-ریل افزایش یافته و بایستی کنترل و پایش به موقع صورت گیرد.

۶- مراجع

- [1] Naeimi, M., 3D dynamic model of the railway wagon to obtain the wheel-rail forces under track irregularities. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, Vol.229. No.4., pp. 357-369, 2015.
- [2] Eom, B.-G. and Lee, H.S., Assessment of running safety of railway vehicles using multibody dynamics. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol.11. No.2., pp. 315-320, 2010.
- [3] Bruni, S., Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context. Vehicle System Dynamics, Vol.49, No.7., pp. 1021-1072, 2011.
- [4] Auciello, J., Dynamic simulation of railway vehicles: wheel/rail contact analysis. Vehicle System Dynamics, Vol.47. No.7., pp. 867-899, 2009.
- [5] Pombo, J. and Ambrósio, J., An alternative method to include track irregularities in railway vehicle dynamic analyses. Nonlinear Dynamics, Vol.68. No.1., pp. 161-176, 2012.
- [6] Sun, Y.Q. and Cole, C., Comprehensive wagon-track modelling for simulation of three-piece bogie suspension dynamics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol.221. No.8., pp. 905-917, 2007.
- [7] Karttunen, K., E. Kabo, and Ekberg, A., A numerical study of the influence of lateral geometry irregularities on mechanical deterioration of freight tracks. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit., Vol.226. No.6., pp. 575-586, 2012.
- [8] Durali, M. and Jalili, M.M., A new criterion for assessment of train derailment risk. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, Vol.224. No.1., pp. 83-101, 2010.
- [9] Senyanskiy, D.M. PROBLEM OF INCREASING THE ACCURACY OF RAILWAY CARRIAGES WEIGHING IN MOTION. 2005.
- [10] Askarinejad, H., et al., Field Measurement of Wheel-Rail Impact Force at Insulated Rail Joint. Experimental Techniques., Vol. 39, 2012.
- [11] Yu, F. and Hendry, M.T., A new strain gauge configuration on the rail web to decouple the wheel-rail lateral contact force from wayside measurement. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit., Vol.233. No.9., pp. 951-960, 2019.
- [12] Parvathy, A., Automatic rail fault track detection for Indian railways. 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 2017.



- [13] Cortis, D., Self-diagnosis method for checking the wayside systems for wheel-rail vertical load measurement. *Transport Problems*, Vol.12., pp. 91-100, 2017.
- [14] Kouroussis, G., Review of Trackside Monitoring Solutions: From Strain Gages to Optical Fibre Sensors. *Sensors (Basel, Switzerland)*, Vol.15. No.8., pp. 20115-20139, 2015.
- [15] Kanehara, H. and T. Fujioka, Measuring rail/wheel contact points of running railway vehicles. *Wear*, Vol.253. No.1., pp. 275-283, 2002.
- [16] Sadeghi, J., Liravi, H., and Esmaeili, M.H., Experimental investigation on loading pattern of railway concrete slabs. *Construction and Building Materials*, Vol.153., pp. 481-495, 2017.
- [17] Charles, G., Goodall, R. and Dixon, R., Model-based condition monitoring at the wheel-rail interface. *Vehicle System Dynamics*, Vol.46. No.sup1., pp. 415-430, 2008.
- [18] Feng, Q., Lei, X., and Lian, S., Vibration Analysis of High-Speed Railway Slab Track on Soil Subgrade with Geometric Irregularities, in *International Conference on Transportation Engineering*, pp. 1287-1292, 2009.
- [19] Zhang, J., Non-stationary random vibration of a coupled vehicle-slab track system using a parallel algorithm based on the pseudo excitation method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol.227. No.3., pp. 203-216, 2013.
- [20] Lei, X. and Wang, J., Dynamic analysis of the train and slab track coupling system with finite elements in a moving frame of reference. *Journal of Vibration and Control*, Vol.20. No.9., pp. 1301-1317, 2014.
- [21] Sadeghi, J., Dynamic Interaction of Vehicle and Discontinuous Slab Track Considering Nonlinear Hertz Contact Model. *Journal of Transportation Engineering*, Vol.142. No.4., pp. 04016011, 2016.
- [22] Kumar, V. and Vikas, R., Investigation of vertical dynamic behaviour and modelling of a typical indian rail road vehicle through bond graph. *World Journal of Modelling and Simulation*, Vol.5., 2009.
- [23] Pombo, J. and Ambrósio, J., An alternative method to include track irregularities in railway vehicle dynamic analyses. *Nonlinear Dynamics*, Vol.68., 2013.
- [24] Zhai, W., Wang, K. and Cai, C., Fundamentals of vehicle-track coupled dynamics. *Vehicle System Dynamics*, Vol.47. No.11., pp. 1349-1376, 2009.
- [25] Sadeghi, J., Investigation of rail irregularity effects on wheel/rail dynamic force in slab track: Comparison of two and three dimensional models. *Journal of Sound and Vibration*, Vol.374., pp. 228-244, 2016.
- [26] Zakeri, J., Impact of heavy urban rail vehicles running over light rail turnouts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol.235. No.3., pp. 300-312, 2021.
- [27] Aziznia, M., Owjadi, A. and Shadfar, M., Analysis of wheel and rail Hertzian and Non-Hertzian contact theories using UM software considering the effect of rail inclination on wheel wear. *International Journal of Railway Research*, Vol.8. No.2., pp. 21-32, 2021.
- [28] Yousefi, S., Naseri Taheri, M.M. and Sharavi, M., Performance Comparison of two Freight Bogies when Passing Through Different Turnouts. *International Journal of Railway Research*, Vol.6. No.2., pp. 133-141, 2019.
- [29] Lagos, R.F., Rail vehicle passing through a turnout: analysis of different turnout designs and wheel profiles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol.226. No.6., pp. 587-602, 2012.
- [30] Pålsson, B.A. and Nielsen, J.C.O., Wheel-rail interaction and damage in switches and crossings. *Vehicle System Dynamics*, Vol.50. No.1., pp. 43-58, 2012.
- [31] Dos Santos, G.F. and Barbosa, R.S., Modeling of a railway vehicle travelling through a turnout. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol.230. No.4., pp. 1397-1404, 2016.
- [32] Hiensch, E.J.M. and Burgelman, N., Switch Panel wear loading – a parametric study regarding governing train operational factors. *Vehicle System Dynamics*, Vol.55. No.9., pp. 1384-1404, 2017.
- [33] Chen, D., A Design Method for Rail Profiles in Switch Panel of Turnout Based on the Contact Stress Analysis. *Shock and Vibration*, pp. 8575498, 2020.
- [34] Naseri Taheri, M., Performance comparison of MD523 and SF400 bogies when passing through different turnouts. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, Vol.28. No.4., pp. 503-520, 2021.