فصلنامه علمی مهندسی ترافیک
| JOURNAL OF TRAFFIC ENGINEERING |

بررسی نیروهای جانبی وارد بر چرخ و ریل در حد فاصل بین ایستگاه‌های راه آهن و جوادیه در خط سه متروی تهران با استفاده از نرم افزار آدامز–ریل

میلادهادی نژاد شیخ[۱]، محمد مهدی شهبازی[۲]

۱– کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، مدرس دانشگاه جامع علمی–کاربردی

۲ – مدیر عملیات و تعمیرات جاری خط ۳ متروی تهران

چکیده

در این مقاله پارامترهایی مانند نیروی جانبی، وزن واگن و سرعت حرکت قطار، که بر تماس میان فلنج چرخ و گوشه داخلی تاج ریل تاثیر گذار هستند مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور در نرم افزار آدامز-ریل مدل سازی و شرایط دینامیکی مختلف و مشخص از پارامترها و عوامل موثر بر رفتار دینامیکی قطار شبیه سازی شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان داده است در خطوط ریلی قوس دار با افزایش وزن قطار، از کمترین به بیشترین وزن خود، یعنی از ۳۷/۵ تن به ۶۱ تن در سرعت‌های یکسان، نیروی جانبی بطور قابل توجه‌ای تا ۵۵ درصد افزایش می‌یابد اما با بررسی تغییرات سرعت می‌توان پی برد، که افزایش سرعت از کمترین به بیشترین سرعت خود، یعنی ۲۵ کیلومتر بر ساعت تا ۶۵کیلومتر بر ساعت (معادل ۷ متر بر ثانیه تا ۱۸ متر بر ثانیه) تاثیر کمتری در حدود ۱۵ درصد، در افزایش نیروی جانبی وارد بر فلنج چرخ و گوشه داخلی تاج ریل دارد. تاثیر سرعت بر نیروی جانبی وارد بر فلنج چرخ و گوشه داخلی تاج ریل در کمینه ترین و بیشینه ترین حالت تقریبا نصف وزن قطار در حالت مشابه است.

واژگان کلیدی: صنعت ریلی، نرم افزار آدامز-ریل، وزن، سرعت، نیروی جانبی.

۱– مقدمه

تماس میان چرخ و ریل از پیچیده ترین سیستم‌های مکانیک تماس است که پارامترهای زیادی بر روی آن موثر بوده و میزان تاثیر هریک از این پارامترها در شرایط مختلف متفاوت است. میزان و نوع تماس در خطوط مستقیم و خطوط قوس دار با هم متفاوت است. سیستم‌های حمل و نقل ریلی داخل شهری (مترو) بدلیل اهمیت سرعت زمانی حمل و نقل و کوتاهی مسیر، از قوس‌های شدیدتری نسبت به خطوط ریلی خارج شهری برخوردار بوده و در نتیجه مولفه‌های نیرویی و استهلاک بیشتری را متحمل می‌شوند[۱].

خطوط قوس دار قسمت کوچکی از کل خطوط را تشکیل می‌دهند اما به علت نیروی گریز از مرکز، این قسمت از خطوط راه آهن از اهمیت بیشتری برخوردار هستند [۲]. قسمت جانبی ریل و فلانج چرخ قسمت‌هایی هستند که به دلیل ایجاد حرکت لغزشی در مسیر قوس‌دار تحت نیروهای جانبی زیاد و سایش شدید قرار می‌گیرند. با توجه به این موضوع که نیروهای جانبی محدودکننده سرعت و بار قابل انتقال می‌باشد، این موضوع علاوه بر بعد ایمنی از لحاظ اقتصادی نیز با اهمیت و قابل توجه می‌باشد [۳ و۴].

بخش عمده‌ای از مقالات و پژوهش‌های تحقیقاتی انجام شده در این زمینه، مبین اهمیت این موضوع است. طراحی پروفیل بهینه چرخ و ریل از دیدگاه‌های دینامیکی و سایش[۵]، تعیین عددی به عنوان معیار یا سنجه نیروی جانبی[۶]، تخمین عمر چرخ و ریل با استفاده از شبیه سازی‌های کامپیوتری نمونه‌هایی از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌باشد [۷].

رابطه آرچارد تنها سختی ماده را به عنوان خاصیت موثر در سایش معرفی می‌کند. هورنبورگ این رابطه را تعمیم داده که رابطه اصلاح شده به صورت (۱) بیان شده است [۸].

$$W_{ad} = N^{2} \frac{P_y E F_n^{1.5}}{K_{IC}^{2} H^{1.3}} \qquad (1)$$

که در این رابطه K_{IC} چقرمگی شکست ماده، P_y تنش تسلیم سطح نرمتر، E مدول الاستیسیته ترکیبی دو سطح، H سختی جسم نرمتر، F_n بار نرمال بر سطح و N فاکتور کار سختی می‌باشد.

همانطور که در روابط (۱) و (۲) مشاهده می‌شود، تاثیر نیرو بر نرخ سایش یکی از پارامترهای اصلی در سایش می‌باشد. نیروهای عمودی و جانبی از جمله نیروهایی هستند که در اثر حرکت چرخ بر روی ریل ایجاد می‌گردند. نیروی عمودی بیشتر متاثر از وزن قطار در خطوط مستقیم ریلی و نیروی جانبی نیز حاصل از وزن قطار در خطوط قوس دار بر روی چرخ و ریل می‌باشد. نیروی جانبی در خطوط قوس دار از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$\sum L = M \frac{V^{2}}{R} \cos\alpha - Mg \sin\alpha \qquad (2)$$

که در آن α شیب عرضی خط، R شعاع قوس مسیر، g شتاب جاذبه، V سرعت و M جرم وسیله نقلیه است.

با توجه به اهمیت تماس چرخ و ریل در صنعت حمل و نقل ریلی، پژوهش‌های بسیاری در این زمینه صورت گرفته است، لذا در تحقیق حاضر پارامترهای وزن و سرعت قطار و اثرات آن بر نیروهای جانبی وارد بر فلنج چرخ و گوشه داخلی ریل با استفاده از نرم افزار آدامز-ریل در حد فاصل ایستگاه‌های راه آهن و جوادیه در خط ۳ متروی تهران مورد بررسی قرار گرفته است.

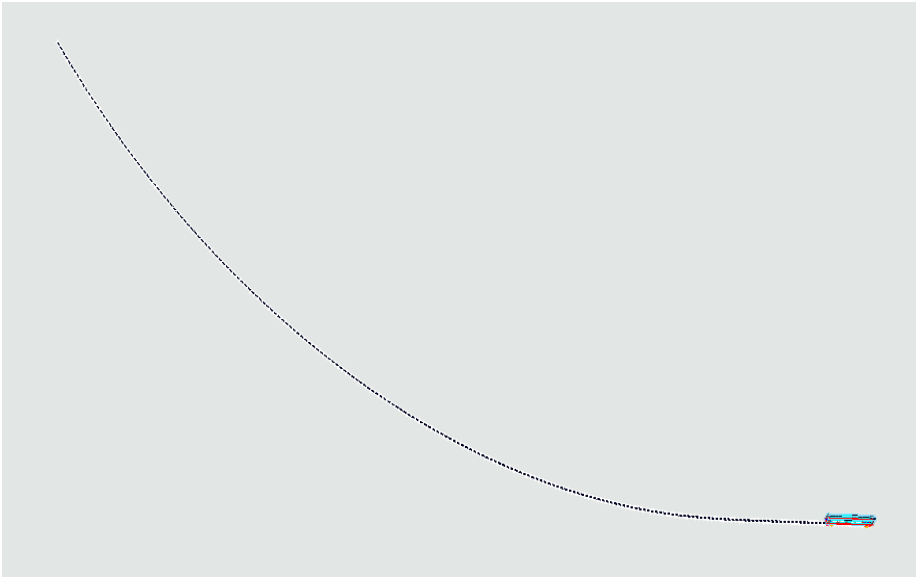
۲- شبیه سازی با نرم افزار آدامز – ریل

برای شبیه سازی پدیده سایش میان چرخ و ریل، از نرم افزار تجاری Adams Rail ۲۰۰۵ استفاده شده است که یکی از نرم افزارهای قدرتمند دینامیکی ADAMS می‌باشد. این نرم افزار با ابزارهایی که در اختیار کاربر می‌گذارد امکان شبیه سازی و تحلیل را می‌دهد. اساس مکانیک تماس چرخ و ریل در این نرم افزار بر تئوری ساده شده و غیر خطی کالکر استوار است و ورودی‌های این نرم افزار مدل هندسی کامل وسیله نقلیه، پارامترهای رفتار مکانیکی(فنر و دمپرها)، خواص اجسام صلب و خصوصیات خط و شکل پروفیل چرخ و ریل و نواحی تماس می‌باشد. تحلیل دینامیکی حرکت یک قطار در واقع حرکت قطار بر روی ریل می‌باشد و زمانیکه یک تحلیل دینامیکی انجام می‌گیرد، می‌توان مشخصات و پارامترهای دینامیکی ایجاد شده در طول حرکت از قبیل جابجایی‌ها، سرعت‌ها، نیروها، شتاب‌ها و غیره را بدست آورد. در این پژوهش نیز از این نرم افزار جهت شبیه‌سازی پارامترهای موثر بر سایش میان چرخ و ریل استفاده شده است.

در این پژوهش شبیه سازی با استفاده از نرم افزار آدامز ریل مطابق جدول (۱) برای سه وزن مختلف و دو سرعت متغیر حداقل و حداکثر از قطار مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این شبیه سازی بررسی مقادیر نیروی‌های جانبی وارد بر گوشه داخلی ریل و فلنج چرخ می‌باشد. شکل (۱) نحوه شبیه سازی مسیر حرکت واگن را روی خط ریلی نشان می‌دهد. پارامترهای ورودی اعمال شده در نرم‌افزار مطابق جدول (۲) می‌باشد.

جدول (۱) طراحی آزمایش جهت انجام شبیه سازی در مسافت ۴۰۰ متر با نرم افزار آدامز-ریل

شماره آزمایش	وزن واگن (ton)	سرعت واگن (m/s)
۱	۳۷/۵	۷
۲	۵۰	۷
۳	۶۱	۷
۴	۳۷/۵	۱۸
۵	۵۰	۱۸
۶	۶۱	۱۸



شکل (۱) مسیر حرکت واگن روی خط ریلی

جدول(۲) پارامترهای اعمال شده در شبیه سازی

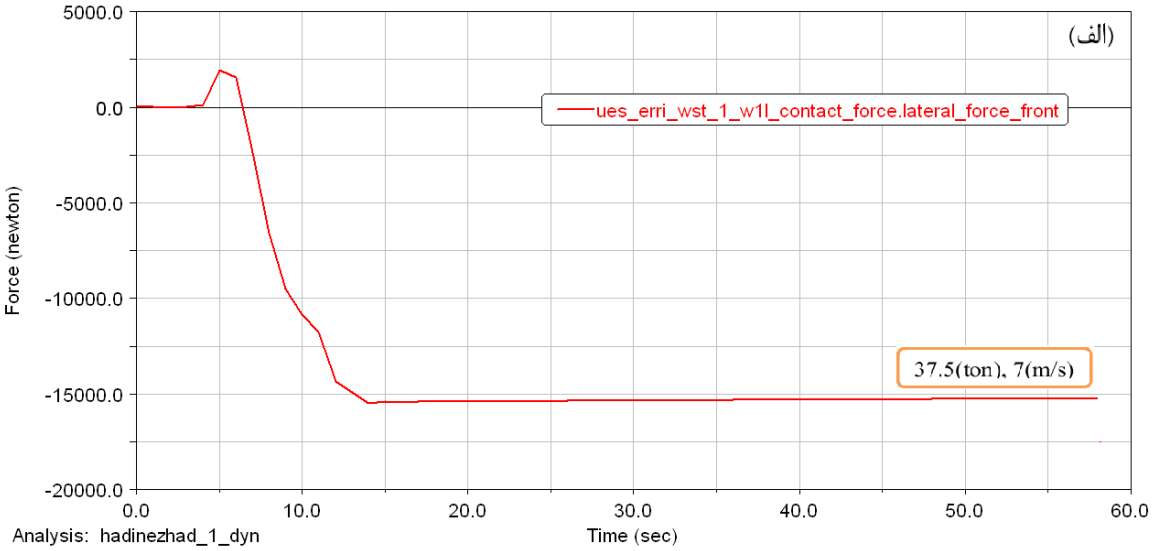
پارامترهای فرایند	مقدار
۲۱۰	مدول الاستیسیته (Gpa)
۳۰۰	شعاع قوس مسیر (m)
۰/۴۳	شعاع اصلی غلتش چرخ (m)
۲/۵۶	فاصله بین دو محور (m)
۲۰	طول واگن (m)
۰/۳	ضریب پوآسون
۰/۱	شیب عرضی خط (rad)
۳۷/۵	وزن یک واگن (ton)
۱/۴۳۵	عرض ریل (m)
۳/۵۶۰	ارتفاع واگن (m)

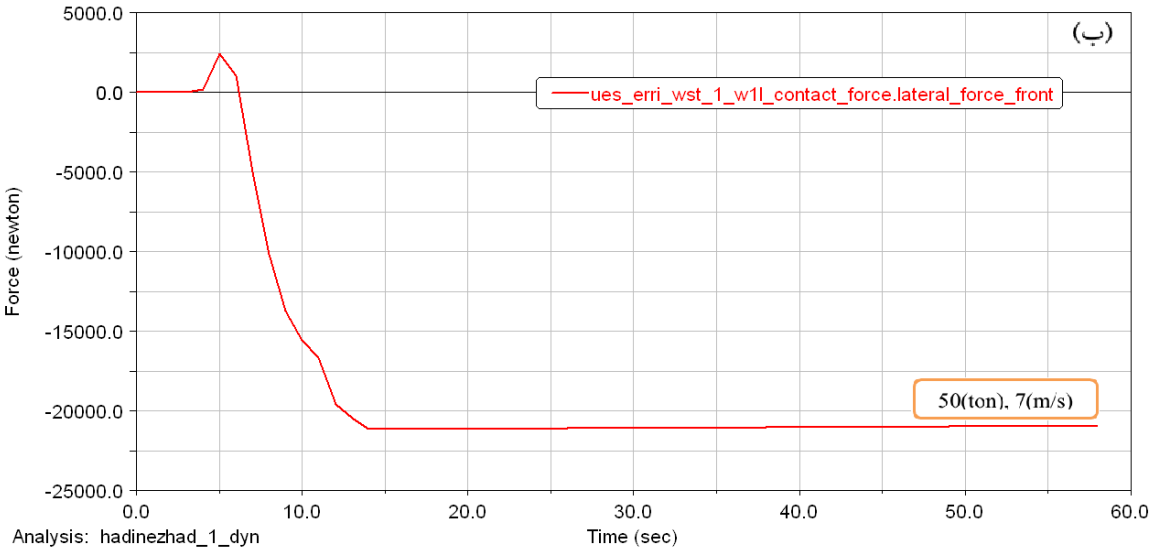
۳- نتایج و بحث

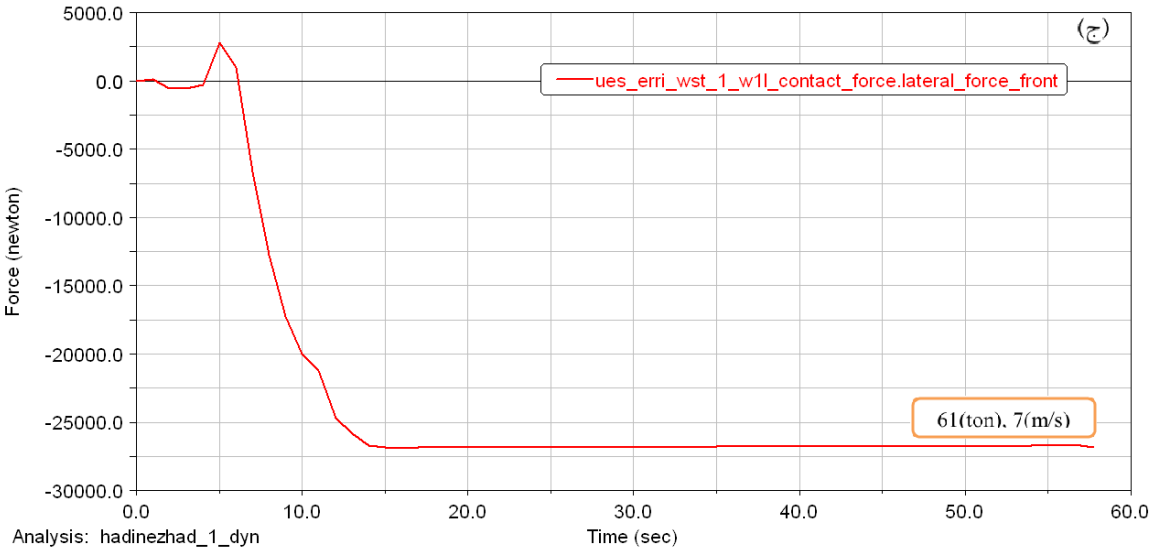
۳-۱- نتایج حاصل از شبیه سازی

با توجه به نمودارهای شکل (۲و۳) مشاهده می‌شود که قطار در زمان‌های ابتدایی بدلیل حرکت روی مسیر مستقیم (۵۰ متر اولیه) نوسان نمودار خیلی کم بوده، که علت ایجاد این نیروی جانبی کم در اثر نوسانات حرکتی قطار می‌باشد. در ادامه حرکت قطار، وقتی قطار از حالت حرکت روی مسیر مستقیم وارد مسیر قوس‌دار با شعاع قوس ۳۰۰ متر می‌شود، می‌توان مشاهده کردکه یک شوک نیرویی شدیدی درنمودار پدید و رفته رفته با ادامه حرکت قطار روی مسیر قوس‌دار نیروی جانبی بیشتر می‌شود و در نهایت پس از قرار گرفتن کل واگن در قوس، نیروی جانبی به حالت پایدار درآمده و تا زمانی که در قوس قرار دارد ثابت باقی می‌ماند. همچنین در تمامی نمودارها، نیروی جانبی دارای مقدار منفی می‌باشد که علت آن بستگی به طراحی مسیر حرکت دارد. بعبارتی دیگر نیروهای جانبی وارده بین چرخ و ریل در جهت منفی محورهای مختصاتی می‌باشد.

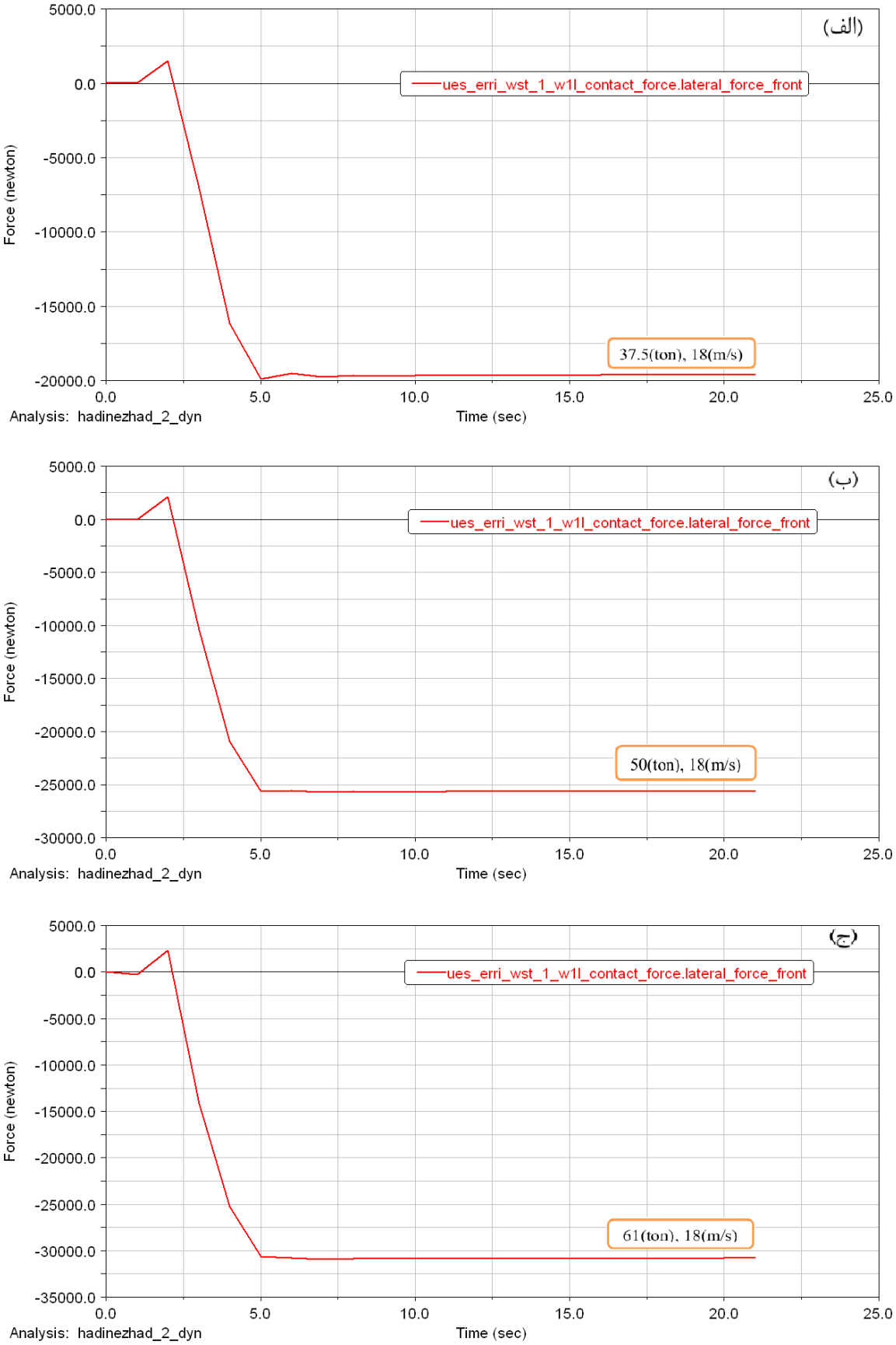
فصلنامه علمی مهندسی ترافیک
سال ۱۶ / پاییز ۱۳۹۵ / شماره ۶۶







شکل ۲: نیروهای جانبی وارد بر نقطه تماس بین گوشه داخلی ریل و فلانج چرخ را بر حسب زمان نشان می‌دهد. (الف) در سرعت ۷ متر بر ثانیه و ۳۷/۵ تن، (ب) در سرعت ۷ متر بر ثانیه و ۵۰ تن، (ج) در سرعت ۷ متر بر ثانیه و ۶۱ تن.



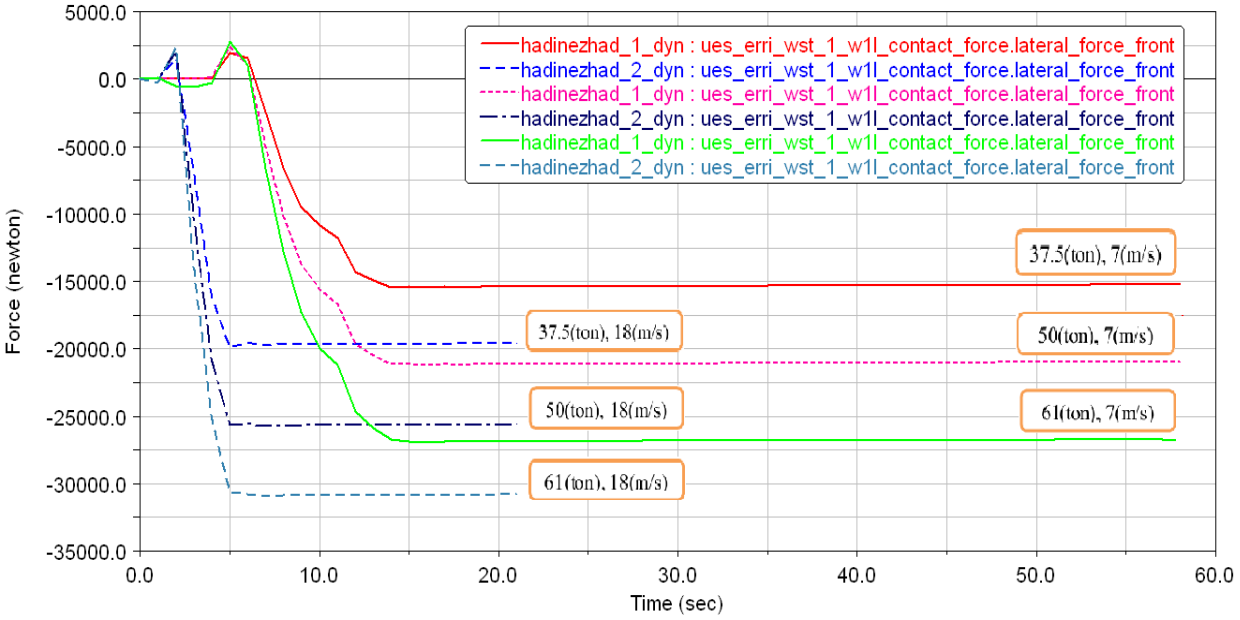
شکل ۳: نیروهای جانبی وارد بر نقطه تماس بین گوشه داخلی ریل و فلانج چرخ را بر حسب زمان نشان می‌دهد. (الف) در سرعت ۱۸ متر بر ثانیه و ۳۷/۵ تن، (ب) در سرعت ۱۸ متر بر ثانیه و ۵۰ تن، (ج) در سرعت ۱۸ متر بر ثانیه و ۶۱ تن.

فصلنامه علمی مهندسی ترافیک
سال ۱۶ / پاییز ۱۳۹۵ / شماره ۶۶

۳-۲- اثر وزن و سرعت قطار بر نیروی جانبی وارد بر مجموعه چرخ‌ها در قوس

شکل (۴) نیروهای جانبی را در سه وزن ۳۷/۵، ۵۰ و ۶۱ تن واگن و دو سرعت خطی ۱۸ و ۷ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. همانطورکه مشاهده شد با افزایش وزن قطار، نیروی جانبی بطور قابل توجه‌ای افزایش یافته است اما با بررسی تغییرات سرعت می‌توان پی برد که افزایش سرعت تاثیر کمتری نسبت به وزن واگن در افزایش نیروی جانبی وارد بر چرخ و ریل دارد. همچنین می‌توان پی برد در سرعت ۷ متر بر ثانیه نسبت به سرعت ۱۸ متر بر ثانیه، نیروی جانبی با توجه به تغییرات مشابه وزن واگن افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر نرخ نیروی جانبی با افزایش سرعت کاهش می‌یابد. جدول (۳) نیز تغییرات سرعت و وزن واگن را نسبت نیروی‌های جانبی بین فلنج چرخ و گوشه داخلی ریل را به صورت کمی نشان داده است.

چرخها تمایل دارند که در جهتی که با آن روبرو می‌شوند بغلتند. در مسیر قوس‌دار، به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز، مجموعه چرخهای جلو تمایل دارند که به سمت خارج قوس و مجموعه چرخ‌های عقب به سمت داخل قوس بغلتند. بدلیل مخروطی بودن طوقه چرخ در نقاط تماس زمانیکه مجموعه چرخ‌ها به سمت خارج قوس تمایل به حرکت دارند شعاع چرخی که به سمت خارج قوس حرکت می‌کند بزرگتر از چرخ مجاور خود می‌شود که این اختلاف شعاع غلتش اضافی ایجاد شده منجر به خزش و افزایش نیروهای وارده می‌گردد [۹].



شکل ۴: مقایسه نیروهای جانبی بر حسب زمان در سرعت و وزن‌های متفاوت

جدول ۳: نیروهای جانبی بدست آمده از شبیه سازی در سرعت و وزن‌های مختلف

شماره آزمایش	سرعت (m/s)	وزن واگن (ton)	نیروی جانبی وارد برفلنج یک چرخ(kN)
۱	۷	۳۷/۵	۱۵
۲	۷	۵۰	۲۱
۳	۷	۶۱	۲۷
۴	۱۸	۳۷/۵	۲۰
۵	۱۸	۵۰	۲۵/۵
۶	۱۸	۶۱	۳۱

در تماس میان چرخ و ریل بر اساس تئوری تماسی هرتز، با افزایش نیروهای وارده به چرخ و ریل، تنش افزایش می‌یابد. تئوری هرتز در رابطه(۳) نشان داده شد.

$$\sigma = \frac{3P}{2ab} \qquad (3)$$

که در این رابطه p نیروی دینامیکی وارد بر چرخ و ریل و a وb به ترتیب قطرهای کوچک و بزرگ بیضی تماس هرتز است. σ ماکزیمم تنش عمودی وارد بر چرخ و ریل است.

مطابق تئوری هرتز علت سایش در خطوط ریلی به طور مستقیم به‌گستردگی و توزیع سطح تماس و فشار تماسی مربوط می‌شود. مکانیزم اصلی سایش بین چرخ و ریل از نوع سایش چسبان می‌باشد. آرچارد پدیده سایش چسبان به صورت رابطه (۴) ارائه کرده است [۱۰].

$$W_{ad} = \frac{V}{L} = K\frac{F_n}{H} \qquad (4)$$

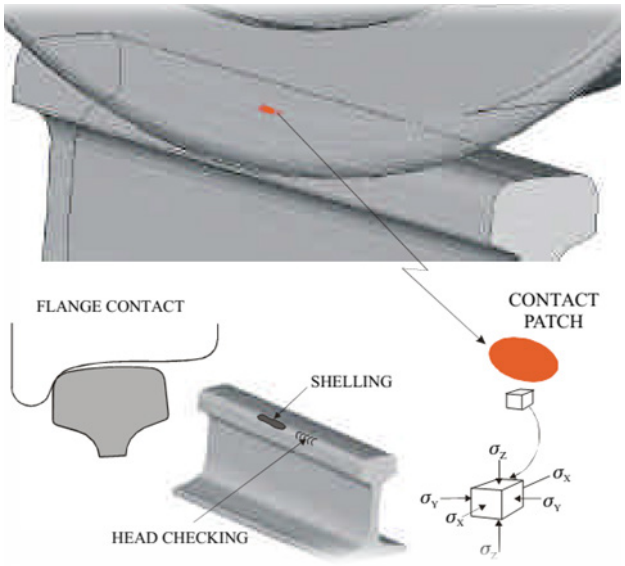
که در این رابطه W_{ad} نرخ سایش (حجم ساییده شده در واحد مسافت طی شده لغزش)، Kضریب سایش، V حجم ساییده شده، L مسافت لغزش، F_n بار نرمال و H سختی جسم نرمتر می‌باشد.

از پارامترهای دیگر مهم که متاثر از نیروهای جانبی میان چرخ و ریل در مسیرهای قوس دار می‌باشد، موضوع خروج از خط است، که بر اساس رابطه نادال با افزایش نیروهای جانبی بیش از ۱/۲ نسبت به نیروی قائم حالت بحرانی احتمال خروج از خط وسیله نقلیه ریلی وجود دارد. نادال خروج از خط به دلیل پس زدگی چرخ بر روی ریل را به صورت رابطه (۵) ارائه کرده است.

$$Y = Q\frac{\tan\beta - f}{1 + f.\tan\beta} \qquad (5)$$

در این رابطه Y کل نیروهای جانبی وارد بر چرخ و ریل، Q کل نیروهای عمودی وارد بر چرخ و ریل، β زاویه بین چرخ و ریل و f ضریب اصطکاک است.

در تمامی روابط فوق می‌توان به این موضوع اشاره کرد که با افزایش نیروهای تماسی به خصوص در مسیر قوسدار به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز، موجب افزایش تنش در یک سطح کوچکتر و همچنین باعث خستگی و سایش بیشتر در تماس فلنج چرخ و گوشه داخلی ریل می‌گردد. شکل(۵) تماس گوشه داخلی تاج ریل و فلنج چرخ را نشان می‌دهد که یکی از شدیدترین حالت‌های تماسی در چرخ و ریل است.



شکل (۵) تماس بین سطح فلانج چرخ و گوشه داخلی تاج ریل [۱۱]

۴- نتیجه گیری

۱- حرکت قطار روی مسیر مستقیم، نوسانات جانبی خیلی کمی را ایجاد می‌کند، اما وقتی قطار از حالت حرکت روی مسیر مستقیم وارد مسیر قوس‌دار شد، یک شوک نیرویی شدید با شتاب زیاد پدید و رفته رفته با ادامه حرکت قطار روی مسیر قوس‌دار نیروی جانبی میان فلنج چرخ و گوشه داخلی تاج ریل بیشتر می‌شود و در نهایت پس از قرار گرفتن کل واگن در قوس، نیروی جانبی به حالت پایدار در می‌آید.

۲- خطوط ریلی مختلف دارای کمیت و کیفیت مختلفی از قوس‌ها می‌باشند. در خطوط ریلی قوس دار از کمترین به بیشترین وزن خود، یعنی با افزایش وزن قطار از ۳۷/۵ تن به ۶۱ تن در سرعت‌های یکسان، نیروی جانبی بطور قابل توجه‌ای تا ۵۵ درصد افزایش می‌یابد اما با بررسی تغییرات سرعت می‌توان پی برد، که افزایش سرعت از کمترین به بیشترین سرعت خود، یعنی با افزایش سرعت قطار از ۷ متر بر ثانیه به ۱۸ متر بر ثانیه تاثیر کمتری در حدود ۱۵ درصد، در افزایش نیروی جانبی وارد بر فلنج چرخ و گوشه داخلی تاج ریل دارد. تاثیر سرعت بر نیروی جانبی وارد بر فلنج چرخ و گوشه داخلی تاج ریل در کمینه ترین و بیشینه ترین حالت تقریبا نصف وزن قطار در حالت مشابه است.

۳- با افزایش نیروهای تماسی به خصوص در مسیر قوسدار به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز، موجب افزایش تنش در یک سطح کوچکتر می‌شود. همچنین باعث خستگی و سایش بیشتر در تماس فلنج چرخ و گوشه داخلی تاج ریل می‌گردد.

۵- مراجع

[۱] فلاحتی آرزودار، ع. و حسین آبادی، ع. (۱۳۸۸). بررسی عوامل موثر بر سایش، دومین کنفرانس بین المللی پیشرفت‌های اخیر در مهندسی راه آهن.

[2] Wu T.X., Thompson D.J., “An investigation into rail corrugation due to micro slip under multiple wheel/ rail interactions”, ISVR technical memorandum, (2002).

[3] International Heavy Haul Association., Book: Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: wheel and rail interface ISSUES .(2001)

[4] M. Pau, F. Aymerich, F. Ginesu “Distribution of contact pressure in wheel–rail contact area” Wear 253, 265–274, (2002).

[5] I.Y. Shevtsov, V.L. Markine, C. Esveld, Optimal design of wheel profile for railway vehicles Wear 258 (2005) 1022-1030.

[6] T. Jendel, Prediction of wheel profile wear-comparisons with field measurements, Wear, 253 (2002) 89-99.

[7] K.L. Johnson, Contact Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1985.

[8] B. Bhushan, Tribology and mechanics of magnetic storage devices, Springer Verlag, New York, 1990.

[9] Milad Hadinezhad, M, Elyasi, “Study of the effect of process parameters on wear rate” AMPT conference, dubai (2014)

[10] J.F. Archard, Contact and rubbing of flat surfaces, Journal of applied physics, 24 (1953) 98-104.

[11] International Heavy Haul Association. Book: GUIDELINES TOBEST PRACTICESFOR HEAVY HAULRAILWAY OPERATIONS WHEEL AND RAIL INTERFACE ISSUES .2001

Study of lateral forces on wheel and rail at the interface between Rahahan and Javadieh stations in Tehran Metro Line 3, using Adams-rail software

Milad Hadinezhad[1], m.m shahbazi[2]

[1)] Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Applied Science and Technology milad.

[2)] manager of operation and current repairs in line 3 (Tehran subway)

Abstract

The present paper focuses on study of parameters such as lateral force, wagon weight, train speed and those have greatest effects on wear mechanism of wheel and rail. ADAMS-RAIL simulation software was used for dynamical modeling of train while moving via railway. Also, the effects of mentioned parameters were contributed in this simulation. The results shown on curved rail train with weight gain, from least to greatest weight, i.e. 37.5 tons to 61 tons at the same speed, lateral force is significantly increased to 55% but By studying changes in speed can be realized, which increases the speed of the lowest to the highest speed at 25 kilometers per hour to 65 kilometers per hour (equivalent to 7 meters per second to 18 m/s) is about 15 percent less impact on the increase lateral force on the wheel flange and gauge corner of rail . The effect of speed on the lateral force on the wheel flange and gauge corner of the minimum and maximum crest rail at almost half the weight of the train in the same state.

Keywords: Rial industry, Adamz-rail Soft ware, Weight speed, Side Force.