یادداشت پژوهشی

تأثیر پارامترهای روسازی خط آهن در خروج از خط واگن در محل سوزن

مرتضی اسماعیلی، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمدرضا احدی (مسئول مکاتبات)، استادیار، پژوهشکده حمل‌ونقل، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
مسعود فتحعلی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
محمد مهر علی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
E-mail: Ahadi@rahiran.ir

دریافت: ۹۰/۰۷/۰۵ پذیرش: ۹۱/۰۸/۲٤

چکیده

ادوات انشعاب (سوزنها) در خطوط راه آهن به علت ساختار پیچیده و ناپیوسته حاکم، به عنوان یکی از مهم ترین نقاط ضعف زیرساختهای ریلی محسوب می شوند. از این رو ارزیابی و پیش بینی امکان خروج از خط در محل این ادوات از دیدگاه بهره برداری و نگهداری، دارای اهمیت ویژه ای است. این موضوع به عنوان یک مسئله اندرکنش خط و قطار تابع پارامترهای مختلفی از جمله مشخصات هندسی و سازه ای خط و نیز مشخصات دینامیکی وسیله نقلیه ریلی، اعم از سرعت و بار محوری است. بنابراین، انجام تحلیلهایی که بتواند پارامترهای مختلف مؤثر بر مسئله را منظور کرده و با دقت مناسبی امکان خروج از خط را ارزیابی کند، اهمیت قابل ملاحظه ای خواهد داشت. در تحقیق پیش رو، ارزیابی پارامترهای مؤثر بر پدیده خروج از خط یک واگن تک در محل سوزن با بهره گیری از نتایج تحلیلهای حساسیت صورت گرفته، ارایه شده است. برای این منظور، مدلسازی عددی ناوگان منتخب باری و مسافری در محل سوزن استاندارد با استفاده از نرم افزار دینامیکی ADAMS/RAIL انجام گرفته و تأثیر پارامترهای هندسی و سازه ای سوزن و پارامترهای بهره برداری ناوگان (بار محوری و سرعت) بر معیار خروج از خط ارزیابی شده است. نتایج ارزیابیها حاکی از آن است که عرض خط در کنار سرعت عبوری ناوگان بیشترین تأثیر را دارد، در حالی که سختی یکنواخت خط ریلی، تأثیری کمتر از ٤ درصد را در نتایج تحلیل نشان می دهد.

واژه‌های کلیدی: ادوات انشعاب، سوزن، خروج از خط، تحلیل حساسیت، شبکه عصبی

۱. مقدمه

حادثه خروج از خط به عنوان رایج ترین طبقه سوانح ریلی دنیا، هر ساله خسارات سنگینی را بر بدنه راه‌آهنها تحمیل می‌کند. تنها در راه‌آهن فدرال آمریکا سالانه به طور متوسط ۲ میلیون دلار خسارت حاصل از حادثه خروج از خط گزارش می‌شود که یکی از مهم ترین دلایل آن، ادوات انشعاب (سوزنها) ارزیابی شده است [Arnold, 2011]. در راه‌آهن کانادا نیز در سال ۲۰۰۹، در مجموع ٥٤/٣ درصد سهم حوادث خروج از خط در خطوط اصلی و فرعی گزارش شده که موقعیت اکثر این خروج از خطها در محل سوزن اعلام شده است [TSBC, 2009]. مطابق آمار سال ۲۰۰۸ اتحادیه بین المللی راه‌آهنها (UIC)، برای ۲۱ کشور پیشرفته عضو، خروج از خط، ٤/٧ درصد از سهم کل حوادث را در برگرفته است [SDAR, 2009]. در راه‌آهن ایران نیز، بیشترین سهم حوادث با ۷۳ درصد در سال ۱۳۸۸ به خروج از خط اختصاص داشته است. همچنین بیشترین عامل ایجاد حادثه نیروی انسانی با سهم ٥٤ درصد و خط ریلی با سهم ۱۹ درصد در همین سال گزارش شده است[Statistical Bulletin of Railway Accidents in Iran, 2009].

از پارامترهای مؤثر در ایجاد حادثه خروج از خط می‌توان به عوامل هندسی (نظیر عرض خط، شیب عرضی ریل و شعاع قوسها)، عوامل سازه‌ای (نظیر اجزاء تشکیل دهنده روسازی شامل ریل، تراورس، ادوات اتصال و زیرسازی شامل بالاست، زیربالاست و بسترخط ریلی) و در نهایت پارامترهای بهره‌برداری (نظیر سرعت و بار محوری) اشاره کرد. اگرچه در آیین‌نامه‌های مطرح در زمینه طراحی خط ریلی، محدوده مجاز هر پارامتر در کنار رواداریهای مربوطه ارایه شده است، اما تأثیر این مقادیر در مقایسه با یکدیگر از یک سو، و ارزیابی توامان و تجمعی همه پارامترها در کنار هم جای سوال دارد. این موضوع به ویژه در محل ادوات انشعاب (سوزنها) که بخش عمده‌ای از سوانح خروج از خط را به خود اختصاص می‌دهد، بیش از پیش حائز اهمیت خواهد بود.

با مروری بر ادبیات فنی موجود در راه‌آهن، چهار موضوع اصلی در رأس مطالعات انجام گرفته قرار می‌گیرد که به ترتیب عبارتند از: ۱- شناخت پارامترهای طراحی خط و نحوه تأثیر هر یک از آنها بر خروج از خط، ۲- معرفی ضوابط حاکم بر طراحی ایمن خط با توجه به رواداریهای آیین‌نامه‌ای هر یک از اجزای خط آهن، ۳- شناخت پدیده اندرکنش قطار و خط و ٤- شبیه سازیهای تحلیلی و عددی خروج از خط. اغلب آیین‌نامه‌ها، تأمین دو هدف نخست را مورد اشاره قرار داده‌اند. به عنوان مثال، آیین‌نامه راه‌آهن آمریکا [AREMA ،2006] مجموعه فیشهای اتحادیه بین المللی راه‌آهنها [UIC ،1994-1989] و استانداردهای اروپایی [E -۱ rocode, 2002-2001]، اگرچه ضوابط روشن و صریحی در مورد پدیده‌های خروج از خط ارایه نکرده‌اند، اما اطلاعات بسیار جامعی را در مورد شناخت پارامترهای طراحی خط و رواداریهای مورد استفاده در طراحی هر یک از اجزای خط آهن دارا هستند. از سوی دیگر مباحث و سرفصلهای گزارش شماره ۷۱ برنامه تحقیقاتی (TCRP, 2005) به طور خاص به مسأله خروج از خط قطار و معیارهای کنترل و ممانعت از بروز چنین پدیده‌ای اختصاص یافته است. اغلب کتب مرجع نیز عناوین اول و سوم از مجموع چهار عنوان فوق‌الذکر را پوشش داده‌اند. به طور مثال، کتابهای دکتر ایسولد [Esveld, 2001] و دکتر لیختبرگر [L -chtberger, 2005] مجموعه مطالب بسیار مفید و مبسوطی در خصوص شناخت رفتار اجزای روسازی و زیرسازی خطوط راه‌آهن در کنار معرفی اصول اندرکنش چرخ و ریل و مفاهیم مرتبط با آن از جمله خروج از خط راه‌آهن ارایه کرده‌اند.

مقالات، گزارشات تحقیقاتی و پایان‌نامه‌های مورد بررسی نیز عمدتاً سه مورد آخر از عناوین را شامل بوده است. در این بین می‌توان به تحقیقات صورت گرفته توسط محمد زاده و همکاران [Mohammadzadeh, et al., 2011] اشاره کرد که به بررسی تأثیر ناهمواریهای هندسی بر خروج از خط ناوگان با بهره گیری از تکنیک قابلیت اعتماد پرداخته است. همچنین صادقی و همکاران [Sadeghi, et al., 2009] تأثیر پارامترهای هندسی از جمله شیب نشیمنگاه ریل را بر خروج از ناوگان در یک مسیر مشخص مورد بررسی و ارزیابی قرار داده اند. در خارج از کشور نیز تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است

که از جمله می‌توان به گزارش تحقیقاتی دکتر ایسولد در مورد مطالعه موردی یک سانحه خروج از خط در کشور ترکیه، دلایل و راهکارهای جلوگیری از بروز آن اشاره کرد. همچنین، در سایر مراجع از جمله مطالعات آقایان چلی و همکاران [Cheli et al., 2006]، تاکایی و همکاران [Takai, et al., 2002] ایوینسکی [Iwnicki, 2006] و شیاوو و همکاران [Xiao et al., 2008] ، تأثیر پارامترهای هندسی بر ایمنی سیر و حرکت ناوگان ارزیابی شده است. سایر مقالات نیز به تناوب در موضوعاتی همچون تأثیر معایب و نقایص موجود در اجزای خط بر بروز پدیده خروج از خط [Jin et al., 2007] و شناخت دقیق‌تر اندرکنش میان چرخ و ریل [Barbosa, 2004] [Zeng and Guan, 2008;] ، شامل اطلاعات بسیار مفیدی هستند. لازم به ذکر است که در هیچ یک از مقالات، ارزیابی توأمان پارامترهای مختلف مؤثر در پدیده خروج از خط، شامل پارامترهای هندسی و سازه‌ای سوزن و بویژه پارامترهای سرعت و بار محوری دیده نشده است.

تحقیق پیش رو، موضوع خروج از خط یک واگن تک را در محل سوزن استاندارد بررسی کرده و بر مبنای پارامترهای مؤثر در طراحی ایمن خط ریلی، ارزیابی عوامل مؤثر را ارایه کرده است. برای دستیابی به این هدف، مبانی فنی و اصول طراحی ایمن خطوط ریلی در کنار بررسی روش تحلیل دینامیکی اندرکنش خط و ناوگان مورد ارزیابی جامعی قرارگرفته است. در ادامه بر همین مبنا و به کمک نرم افزار دینامیکی AdamsRail، آنالیز حساسیت بر روی فاکتورهای مبین خروج از خط با تغییر پارامترهای خط (سوزن استاندارد) و ناوگان، برای دو واگن مسافری و باری منتخب راه‌آهن ایران انجام شده است. در پایان جمع‌بندی نتایج تحلیل صورت گرفته و پیشنهادات تحقیق ارایه شده است.

۲. تعیین معیار خروج از خط

برای پدیده خروج از خط، چهار معیار ویژه شامل ۱) افتادن چرخ بین دو ریل، ۲) واژگونی ناوگان، ۳) انحراف ناوگان به علت جابجایی عرضی خط و ٤) بالا آمدن چرخ از روی ریل در نظر گرفته می‌شود [Arap Consulting Engineers, 2011].

افتادن چرخ بین دو ریل، به دلیل وجود اضافه عرض خط بیش از حد مجاز است که اغلب در قوسهای افقی دیده شده است. معیار دوم یعنی واژگونی وسیله نقلیه ریلی به دلیل آن روی می‌دهد که چرخهای یک سمت بوژی در آستانه بلند شدن از روی ریل بلند قرار می‌گیرند. معیار دیگر خروج از خط ناوگان ریلی در اثر انحراف مسیر خط آهن در راستای عرضی (عمود بر امتداد طولی خط) اتفاق می‌افتد. هرچه انحراف مسیر خط آهن در طول کوتاه تری روی دهد، احتمال خروج از خط بیشتر خواهد شد.

به منظور ارزیابی احتمال وقوع خروج از خط ناشی از بالا آمدن چرخ از روی ریل در سال ۱۸۹٦ رابطه‌ای توسط نادال ارایه شد. نادال معیار خود را بر مبنای نسبت مؤلفه جانبی به قائم بار چرخ (نسبت خروج از خط) که از تعادل نیروهای بین چرخ و ریل در مقطع عرضی خط آهن حاصل می‌شود، توسعه داد. وی بر این اساس، رابطه شماره (۱) را پیشنهاد کرد[Sadeghi et al., 2009]:

$$\frac{L}{V}=\frac{tg\delta-\mu}{1+\mu tg\delta}\le\left(\frac{L}{V}\right)_{\max} \qquad (۱)$$

که در آن: L نیروی دینامیکی افقی، V نیروی دینامیکی قائم، ضریب اصطکاک بین لبه چرخ و ریل و δ زاویه لبه چرخ است. سمت چپ معادله (۱)، نماینده نیروهای مهاجم و سمت راست، معادله نماینده نیروهای مقاوم است. مروری بر مراجع نشان می‌دهد که معیار نادال به عنوان قابل اطمینان‌ترین و کاربردی‌ترین روش جهت ارزیابی احتمال بالا آمدن چرخ از روی ریل، به شمار می‌آید. اتحادیه بین المللی راه‌آهنها (UIC) در فیش شماره ۵۱۸ خود، مبنای ارزیابی خروج از خط را رابطه نادال دانسته و مقدار حداکثری آن را به ۰/۸ محدود کرده است [Esveld, 2004]. از این رو در این مقاله، از این معیار با مقدار بیشینه مجاز ۰/۸ به عنوان معیار وقوع خروج از خط بهره گرفته شده است.

۳. شبیه سازی دینامیکی پدیده خروج از خط

۳-۱ فرآیند مدلسازی

برای شبیه سازی پدیده خروج از خط نیاز به بهره‌گیری از مدلهای

دینامیکی اندرکنش خط و ناوگان است. از این رو در این مطالعه، تئوری سیستم چند جسمی (MBS) مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور جلوگیری از فرآیند زمان گیر تهیه معادلات حاکم بر سیستم دینامیکی به صورت دستی، از نرم افزار تخصصی – A AMS/Rail با توجه به سهولت کاربرد، دسترسی سریع، سرعت بالای پردازش و دقت قابل قبول آن جهت شبیه سازی دینامیکی غیرخطی پایداری ناوگان ریلی بر روی خط استفاده شده است. برای شبیه سازی نیروهای تماسی چرخ و ریل در مسیر تماس نیز از مدل غیر خطی Fastsim توسعه یافته توسط Kalker بهره گرفته شده است [Kalker, 1982]. نمای شماتیک فرآیند شبیه سازی در این نرم افزار در شکل (۱) قابل مشاهده است.

۳-۲ اعتبارسنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی مدلسازی صورت گرفته نتایج واگن باری با مدل مشابه موجود در پیش فرض نرم‌افزار UM، که دقت آن با نتایج آزمون میدانی تایید شده است (UML 2012)، مقایسه شد. برای این امر، هر دو واگن باری مورد نظر بر روی قوسی به شعاع ۳۵۰ متر و دور ۱۵۰ میلیمتر و سرعت ۲۰ متر بر ثانیه حرکت داده شد. ضریب اصطکاک مسیر نیز ۰/۲۵ در نظر گرفته شد. نمودار زیر نتایج خروج از خط بر حسب شاخص نادال را برای چرخ بحرانی نشان می‌دهد. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که مدل واگن باری مورد نظر دقت قابل قبولی داشته و در بدترین حالت اختلاف ۵ درصدی را از خود نشان می دهد.

۳-۳ فرضیات حاکم بر تحلیل

۳-۳-۱ مشخصات هندسی و سازه‌ای سوزن

کاربرد گسترده انشعابات استاندارد با زاویه مرکزی ۱ به ۹ و شعاع انحنای ۱۹۰ و ۳۰۰ متر در خطوط ریلی بالاستی، تیم تحقیق را به سمت انتخاب مشخصات هندسی این نوع از انشعابات به عنوان مبنای مدل‌سازی نرم‌افزاری سوق داد. همچنین با توجه به حساس‌تر بودن شعاع انحنای ۱۹۰ متر نسبت به ۳۰۰ متر، این شعاع مبنای مدلسازی های نرم افزاری واقع شد. در محل خط معمولی اکثر پارامترهای هندسی (شعاع قوس، عرض خط گیج، بربلندی (دور) و شیب طولی) قابل تغییر است. این در حالی است که در محل سوزن با توجه به نوع خاص این ادوات به لحاظ شعاع قوس (در اینجا سوزن استاندارد با شعاع ۱۹۰ متر)، پارامتر شعاع قوس قابل تغییر نیست. همچنین تغییرات بربلندی را در تحقیق جاری شاهد نیستیم (بربلندی صفر). شیب طولی نیز در محل سوزنها می‌بایستی صفر بوده و تنها پارامتر باقیمانده یعنی عرض خط به عنوان پارامتر تأثیرگذار در فرآیند شبیه سازی در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که مطابق آیین نامه طرح هندسی راه‌آهن ایران[Iranian Org. Management and Planning, 2004] ، رواداری مجاز عرض خط برای خط ریلی تازه تأسیس ۱– تا ۳+ میلیمتر است. در این تحقیق، محدوده رواداری ٦– تا ۱۰+ میلیمتر در نظر گرفته شده است.

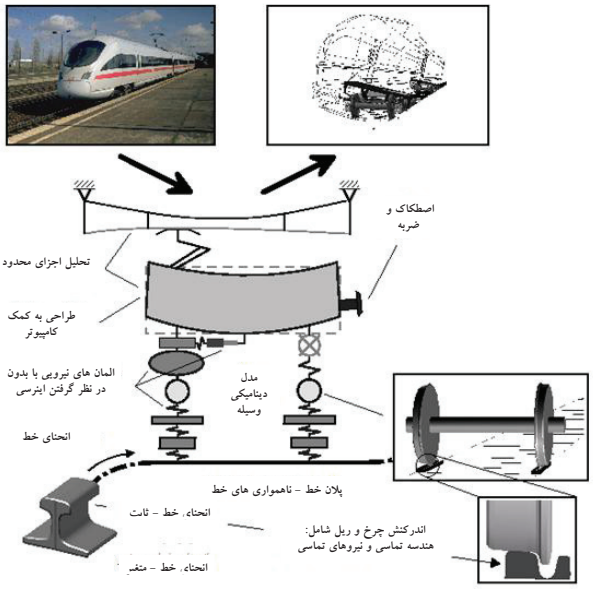
پارامترهای روسازی و زیرسازی نیز در این تحقیق براساس فاکتور سختی خط، مد نظر قرار گرفته‌اند. از این رو سختی خطوط مختلف با در نظرگرفتن روسازیها و زیرسازیهای مختلف از دامنه ۲۰ تا ٤۰ کیلونیوتن بر میلیمتر [Zozaji, 2008] برای خط نمونه بالاستی (از دیدگاه طراحی) مد نظر قرار گرفت.

۳-۳-۲ مشخصات هندسی و سازه ای ناوگان ریلی

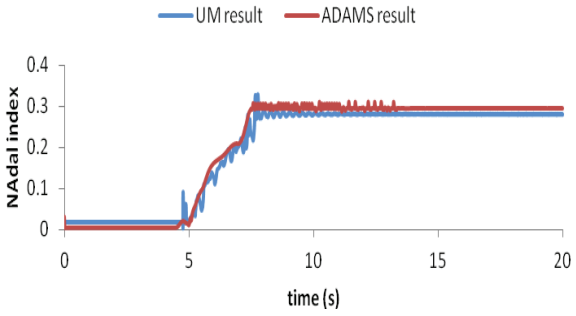
با توجه به شرایط ناوگان مورد استفاده در شبکه ریلی ایران و بر مبنای دو معیار فراوانی عددی و پتانسیل سانحه‌خیزی، دو بوژی (بوژی مسافری (۳٦MD) و بوژی باری (سه تکه روسی ۱۸۱۰۰) برای مدل‌سازی نرم‌افزاری انتخاب شده است[Mirmohammad Sadeghi, ۲۰۰۸]. مشخصات این بوژیها در کنار مشخصات بدنه واگنهای مورد استفاده در جدول (۱) قابل دستیابی است. لازم به ذکر است که در این تحقیق، تنها عملکرد یک واگن تک و نه کل قطار در نظر گرفته می شود.

۳-۳-۳ فرضیات بهره برداری (بار محوری و سرعت)

پارامتر بار محوری با توجه به انتخاب نوع واگن عبوری و نیز فرض پر بودن یا خالی بودن آن قابل تبیین است. از این رو برای



شکل ۱. نمای شماتیک فرآیند مدلسازی دینامیکی MBS



شکل ۲. نتایج موردی خروج از خط بر حسب شاخص نادال برای نرم افزارهای UM و ADAMS

جدول ۱. مشخصات ناوگان ریلی

مشخصات بدنه واگن			مشخصات بوژی			مشخصات چرخ و محور		
مسافری	باری	توضیح مشخصه	مسافری	باری	توضیح مشخصه	مسافری	باری	توضیح مشخصه
٤٠٠٠٠	٧٥٠٠٠	جرم واگن پر (kg)	٣١٣	٣٦٥	جرم گهواره (kg)	٢٥٠٠	١٨٥٠	فاصله دو محور (mm)
٥٦٨٠٠	١٠٠٠٠٠	Ix(kgm^2)	١٠٣٤	٤٠٤	جرم شاسی (kg)	١٥٠٠	١٤٩٠	فاصله دو دایره غلتش (mm)
١٩٧٠٠٠٠	١٠٧٠٠٠٠	Iy(kgm^2)	–	١٠	سختی بالشتک (MN/m)	٢٠٠٠	٢١٨٦	طول محور (mm)
١٩٧٠٠٠٠	١٢٠٠٠٠٠	Iz(kgm^2)	–	١/٥	سختی پیچشی کاسه بوژی (MN/rad)	٤٦٠	٤٧٨/٥	شعاع دایره غلتش (mm)
			–	٥/٣٢	سختی قائم فنرهای تعلیق (MN/m)	١٣١٠	١٧٥١	جرم (kg)
			٠/١٦	–	فنر اصلی در تعلیق ثانویه (MN/m)			
			٠/٢٠	–	فنر اصلی در تعلیق اولیه (MN/m)			
			٠/٤٩	–	فنر بچه در تعلیق ثانویه (MN/m)			
			٠/٦١	–	فنر بچه در تعلیق اولیه (MN/m)			

واگن باری، تغییرات بار محوری از کاملا خالی (٦ تن)، نیمه خالی (١١ تن)، نسبتا پر (١٨ تن) و کاملا پر (٢١ تن) برای واگن منتخب در نظر گرفته شد. در عین حال با توجه به رویکرد افزایش بار محوری در شبکه ریلی کشور، تحلیلها برای بار محوری ٢٥ تن نیز صورت گرفته است. در مورد واگن مسافری نیز با توجه به فرض کاملا خالی (١٤ تن) و کاملا پر (١٦ تن)، این دو بار محوری مبنا قرار گرفت. همچنین، برای واگن باری در محل سوزن از سرعتهای ٢٠، ٣٥، ٥٠ و ٧٠ کیلومتر بر ساعت و برای واگن مسافری از سرعتهای ٣٠، ٦٠، ٨٠ و ٩٠ کیلومتر بر ساعت بهره گیری شد.

نتیجه تحلیلها، نیروهای مختلف اعمال شده در هر یک از ٨ چرخ مدلسازی شده برای واگنها را خروجی می‌دهد، به طوری که رفتار نیرو– زمان چرخها قابل دستیابی خواهد بود. بر مبنای این خروجیها امکان دستیابی به معیار خروج از خط میسر می شود . برای این منظور، بحرانی ترین چرخ که عمدتا" چرخهای شماره ١ یا ٥ در تحلیلها بوده است، منظور شده است.

٤. نتایج تحلیلهای حساسیت

٤–١ ارزیابی تأثیرات سختی خط

قبل از ورود به تحلیلهای حساسیت، فاکتور سختی خط به عنوان نماینده پارامترهای روسازی و زیرسازی به صورت مجزا مورد ارزیابی واقع شد. برای این منظور براساس بیشینه مقادیر سایر

جدول ۲. تأثیر سختی در خروج از خط سوزن شعاع ۱۹۰

مقادیر سختی(KN/mm)			۲۵	۳۰	۳۵	۴۰
نسبت نیروی افقی به قائم چرخ	واگن مسافری	عرض خط ٦- میلیمتر	۰/٦۵۵	۰/٦۵٤	۰/٦۵٤	۰/٦۵٤
		عرض خط ۱۰+ میلیمتر	۰/٦۸۱	۰/٦۸۵	۰/٦۸٦	۰/٦۸۵
	واگن باری	عرض خط ٦- میلیمتر	۰/٦۱۷	۰/٦۱۱	۰/۵۹٤	۰/۵۹۸
		عرض خط ۱۰+ میلیمتر	۰/۹۰۳	۰/۸٦۷	۰/۸٦٤	۰/۹۰۸

پارامترهای مؤثر (بارمحوری، سرعت و عرض خط) سنجش معیار خروج از خط برای محدوده سختی مورد نظر در این تحقیق صورت گرفت. نتایج نشان دادند که این پارامتر در بیشترین حالت کمتر از ٤ درصد معیار تحلیل را تحت تأثیر قرار داده و می‌توان از آن چشم پوشی کرد (جدول ۲).

٤-۲ نتایج تحلیل واگن باری

برای واگن باری، چارچوب کلی تحلیلهای خروج از خط و نتایج حاصله در محل سوزن استاندارد با شعاع ۱۹۰ متر در جدول (۳) ارایه شده است. به طوری که تأثیر تمامی عوامل منتخب (یعنی بار محوری، سرعت و عرض خط، به صورت یکپارچه مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است

٤-۳ نتایج تحلیل واگن مسافری

نتایج تحلیلهای خروج از خط برای واگن مسافری با در نظر گرفتن تمامی عوامل منتخب (یعنی بار محوری، سرعت و عرض خط) در جدول (٤) ارایه شده است.

۵. تفسیر نتایج تحلیل و ارایه پیشنهادات

در ادامه و برای تفسیر نتایج تحلیل، رفتار خروج از خط واگنهای

جدول ۳. نتایج تحلیل حساسیت سوزن استاندارد با شعاع ۱۹۰ متر برای واگن باری

بار محوری (تن)		٦				۱۱			
سرعت (کیلومتر بر ساعت)		۲۰	۳۵	۵۰	۷۰	۲۰	۳۵	۵۰	۷۰
رواداری عرض خط (میلیمتر)	-٦	۰,٤۷	۰,٤۹	۰,٤۹	۰,۵۰	۰,٤٤	۰,٤٤	۰,٤۸	۰,۵۵
	-۳	۰,٤۸	۰,٤۹	۰,۵٤	۰,٦۰	۰,٤٤	۰,٤۵	۰,٤۵	۰,٤۹
	۰	۰,٤۸	۰,۵۱	۰,۵۷	۰,٦۵	۰,۵۳	۰,٤٦	۰,٤۳	۰,۵٦
	۵	۰,۵۵	۰,۵٤	۰,۷۲	۰,۷٦	۰,٤٦	۰,٤۸	۰,۵۲	۰,٦۳
	۱۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰
بار محوری (تن)		۱۸				۲۱			
سرعت (کیلومتر بر ساعت)		۲۰	۳۵	۵۰	۷۰	۲۰	۳۵	۵۰	۷۰
رواداری عرض خط (میلیمتر)	-٦	۰,٤۲	۰,٤۳	۰,٤٦	۰,۵٤	۰,٤۱	۰,٤۲	۰,۳۱	۰,٤۹
	-۳	۰,٤۳	۰,٤٤	۰,٤٦	۰,۵۰	۰,٤۲	۰,٤۳	۰,٤۲	۰,۵۰
	۰	۰,٤۳	۰,٤٤	۰,٤۷	۰,۵٦	۰,٤۲	۰,٤٤	۰,۵۰	۰,۵۹
	۵	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰
	۱۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰
بار محوری (تن)		۲۵							
سرعت (کیلومتر بر ساعت)		۲۰	۳۵	۵۰	۷۰				
رواداری عرض خط (میلیمتر)	-٦	۰,٤۱	۰,٤۳	۰,۵۰	۰,۸۰				
	-۳	۰,٤۱	۰,٤۳	۰,۵۰	۰,٦۰				
	۰	۰,٤۳	۰,٤٤	۰,۵۱	۰,٦۲				
	۵	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰				
	۱۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۸۰				

• برای مقادیر خروج از خط بالاتر از ۰,۸، با توجه به معیار UIC مقدار ۰,۸ به عنوان بیشینه مقدار خروج از خط در جدول در نظر گرفته شده است.

جدول ٤. چارچوب نتایج تحلیل حساسیت سوزن استاندارد با شعاع ۱۹۰ متر برای واگن مسافری

بار محوری (تن)		١٤					١٦			
سرعت (کیلومتر بر ساعت)		۳۰	٦٠	۸۰	۹۰	۳۰	٦٠	۸۰	۹۰
روادارى عرض خط (میلیمتر)	-٦	۰/۵۲	۰/٦٠	۰/٦٦	۰/٦۹	۰/۵۲	۰/۸٠	۰/۸٠	۰/۸٠
	-۳	۰/۵۱	۰/۵۹	۰/٦٤	۰/۸٠	۰/۵۲	۰/٦٠	۰/۸٠	۰/۸٠
	۰	۰/۵۱	۰/۵۹	۰/٦۵	۰/۸٠	۰/۵۳	۰/٦٠	۰/۸٠	۰/۸٠
	۵	۰/۵۲	۰/٦٠	۰/٦۵	۰/۸٠	۰/۵٤	۰/٦۱	۰/٦٦	۰/۸٠
	۱٠	۰/۵۵	۰/٦۳	۰/٦۹	۰/۷۲	۰/۵۵	۰/٦۲	۰/٦٦	۰/۸٠

• برای مقادیر خروج از خط بالاتر از ۰/۸، با توجه به معیار UIC مقدار ۰/۸ به عنوان بیشینه مقدار خروج از خط در جدول در نظر گرفته شده است

باری و مسافری با استخراج نمودارهای یکپارچه بر مبنای پارامترهای بار محوری و سرعت و با در نظر گرفتن تغییرات پارامتر هندسی عرض خط برای یک حالت مبنا استخراج شده است.

۵-۱ واگن باری

نمودار (۳) نتایج یکپارچه تحلیل را برای سوزن باری نمایش داده است. همان طور که مشخص است، رفتار حاکم بر تغییرات عرض خط کاملا" غیر خطی است. احتمال خروج از خط واگن به طور کلی با افزایش یا کاهش عرض خط از حالت ایده آل افزایش می‌یابد. در بار محوری پایین تر (٦ تن)، رفتار یکنواخت‌تری در مقایسه با بار محوری بالاتر از ۱۸ تن مشاهده می‌شود. نکته جالب توجه آن که رواداریهای افزایش عرض خط نسبت به کاهش عرض خط نتایج بحرانی‌تری را نشان می‌دهند. اگرچه این موضوع با استاندارد مطرح در راه‌آهن یعنی بازه (۳+ ۱-) در تناقض است، اما توجه به موارد زیر ضروری است:

اولا" نتایج این تحقیق برای یک واگن تک و نیز سوزن استاندارد با شعاع ۱۹۰ استخراج شده است. همچنین این موضوع به دلیل انتخاب بازه بیشتر عرض خط مثبت (اضافه عرض ۱۰+ میلیمتر) در مقایسه با عرض خط منفی (کمبود عرض ٦- میلیمتر) نمود بیشتری دارد. در انتها نیز رفتار فراتر از محدوده رواداری مطرح در استاندارد، آن هم با در نظر گرفتن سایر پارامترهای هندسی و بهره برداری جای سوال داشته و در آیین نامه مشخص نشده است.

افزایش سرعت در کلیه پارامترهای مؤثر با رفتار نسبتا خطی و به صورت تشدید کننده بر خروجیها تأثیر نشان داده است. بار محوری نیز در کلیه پارامترهای مؤثر در محدوده پایین (حدود ٦ تا ۱۱ تن)، رفتار متفاوتی را نسبت به محدوده بالا (حدود ۱۸ تا ۲۵ تن) رقم می‌زند.

۵-۲ واگن مسافری

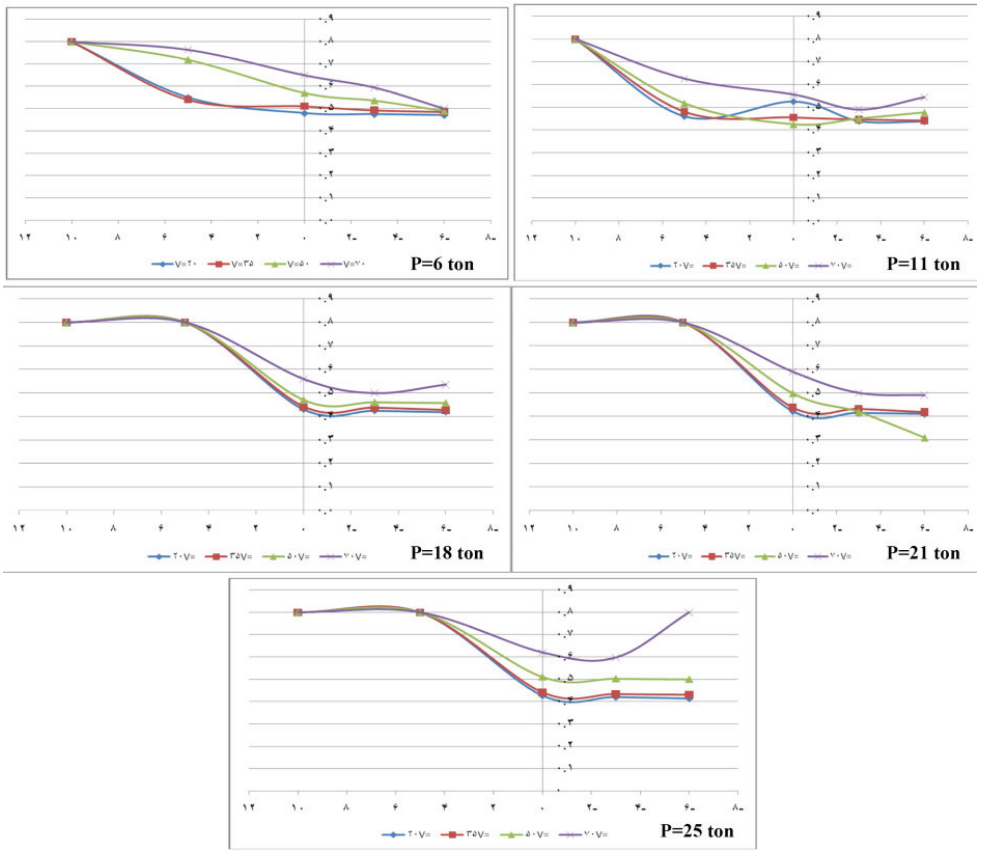
نمودار (٤) نتایج یکپارچه تحلیل را برای سوزن مسافری نمایش داده است. همان طور که مشخص شده است، رفتار حاکم بر تغییرات عرض خط همچنان به صورت غیرخطی، ولی این بار نزدیک تر به حالت خطی تغییر می‌کند. همچنین احتمال خروج از خط واگن با افزایش و کاهش رواداریهای عرض خط بیشتر می‌شود (شبیه حالت کاسه‌ای با کمینه مقدار در عرض خط با رواداری صفر).

افزایش سرعت همچنان به صورت نسبتاً خطی و تشدید کننده بر خروجیها تأثیر نشان می‌دهد. برای واگنهای مسافری در بارهای محوری ١٤ و ١٦ تن، با در نظر گرفتن سرعتهای سیر بالاتر از ۸۰ کیلومتر بر ساعت احتمال خروج از خط بسیار زیاد است.

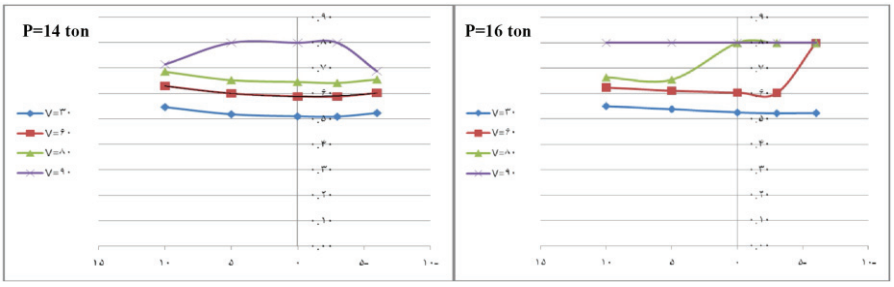
افزایش بار محوری نیز از ١٤ به ١٦ تن در محدوده سرعتهای پایین تر از ٦٠ کیلومتر بر ساعت، خروجیها را اندکی تحت تأثیر قرار داده است. اما برای سرعتهای بالاتر، افزایش بار محوری حساسیت معیار خروج از خط را بیشتر کرده، به طوری که رشد ۱۸ درصدی خروج از خط را در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت و به ازای افزایش بار محوری از ١٤ تن به ١٦ تن شاهد هستیم. از این رو کیفیت پارامترهای هندسی خط در محل سوزن، بویژه با در نظر گرفتن بیشینه سرعت سیر و بیشینه بار محوری باید در حد رواداریهای حداقلی قرار گیرد.

٦. جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق، به ارایه مدل پیش بینی خروج از خط واگن در محل ادوات انشعاب پرداخته شد. برای دستیابی به این هدف، تحلیلهای حساسیت بر روی پارامترهای مؤثر بر خروج از خط در محل سوزنها به کمک شبیه سازیهای اندرکنش خط و ناوگان برای هر یک از واگنهای مسافری و باری صورت گرفت. خروجیهای تحلیل نشان داد که پارامترهای بار محوری، سرعت سیر و عرض خط به عنوان مؤثرترین پارامترهای سوزن قابل تبیین هستند. رفتار حاکم بر تغییرات عرض خط به صورت غیر خطی نتیجه گیری شده و نشان داده شد که رواداریهای افزایش نسبت به کاهش عرض خط کمی بحرانی-تر است. همچنین نشان داده شد که افزایش سرعت و بار محوری به صورت نسبتاً خطی و تشدید کننده بر خروجیها تأثیرگذار است. در عین حال مشاهده شد که پارامتر سختی خط کمتر از ٤ درصد در بحرانی‌ترین حالت بر روی خروجیهای خروج از خط تأثیر گذاشته و از این رو به عنوان یک پارامتر غیرمؤثر از جریان شبیه سازیها خارج شد.



نمودار ۳. رفتار خروج از خط سوزن باری



نمودار ٤. رفتار خروج از خط سوزن مسافری

۷. سپاسگزاری

از همکاران بخش ایمنی پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و ترابری و کارشناسان فنی مهندسین مشاور آراپ در جریان انجام این تحقیق تشکر می شود.

۸. پی نوشت

MBS: Multi Body System

۹. منابع

– راه آهن جمهوری اسلامی ایران. اداره خط و ابنیه فنی راه آهن (۱۳۸۹) "نقشه های اجرایی انشعابات استاندارد ۱۹۰/۱ شرکت وسلو کوجیفر"،تهران: راه آهن جمهوری اسلامی ایران.

– راه آهن جمهوری اسلامی ایران. اداره کل حفاظت و ایمنی سیر و حرکت. گروه تحلیل سوانح (۱۳۸۸) "بولتن آماری حوادث راه آهن"، تهران: راه آهن جمهوری اسلامی ایران.

– زجاجی ع. (۱۳۸۷) "بررسی تحلیلی و محاسبه سختی قائم خط آهن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.

– سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (۱۳۸۳) "آیین نامه طرح هندسی راه آهن"، نشریه شماره ۲۸۸، تهران: سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.

– مهندسین مشاور آراپ (۱۳۹۱) "ارایه مدل تاثیر پارامترهای طراحی خط بر ایمنی سیر و حرکت راه آهن"، گزارش تحقیقاتی، پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و ترابری.

– میرمحمدصادقی، جواد (۱۳۸۷) "اصول و مبانی تحلیل و طراحی خطوط بالاستی راه آهن"،تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

- AREMA American Railway Engineering and Maintenance of Way Association(2006) "Manual for railway engineering", Volume 1.

- Arnold, D. (2011) "How did we get off track? Functional comparison of railroad switch designs and derailments", Google Science Fair, USA.

- Barbosa, R. S. (2004) "A 3D contact force safety criterion for flange climb derailment of a railway wheel", Journal of Vehicle System Dynamics, Vol. 44, No. 5, pp. 289-300.

- Cheli, F., Corradi, R., Diana, G., Facchinetti, A. and Gherardi, F. (2006) "Effect of track geometrical defects on running safety of tramcar vehicles", Journal of Vehicle System Dynamics, Vol. 44, pp. 302-312.

- Demuth, H., Beale, M. and Hagan, M. (2006) "Neural network toolbox for use with MATLAB", the MathWorks, Inc.

- Esveld, C. (2001) "Modern railway track", MRT Publications, the Netherlands.

- Esveld, C. (2004) "Investigation of the train accident on 22 July 2004 near Pamukova, Turkey", Esveld Consulting Services, BV

- Evans, J. and Iwnicki, S. D. (2002) "Vehicle dynamics and the wheel/rail interface", IMechE Seminar, London, England.

- Eurocode (2001-2002) "European Committee for Standardization, EN 13 Series".

- International Union of Railways (2009) "UIC SDAR: Safety Database Activity Report" , UIC.

- Iwnicki, S. (2006) "Handbook of railway vehicle dynamics", Taylor & Francis GR, CRC Press.

- Jin, X., Wen, Z., Xiao, X. and Zhou, Z. (2007) "A numerical method for prediction of curved rail wear", Journal of Multibody System Dynamics, Vol. 18, pp. 531-557.

- Kalker, J. (1982) "A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact", Veh. Syst. Dyn., 11,

- TCRP: Transit Cooperative Research Program, (2005) "Flange climb derailment criteria and wheel/rail profile management and maintenance guidelines for transit operations", Report 71, Vol. 5 National Academy Press, USA.

- TSBC: Transportation Safety Board of Canada (2009) "Statistical summary railway occurrences", Communications Division, Gatineau, Quebec.

- UIC International Union of Railways (1989-1994) "UIC Codes, 700 Series". UIC.

- UML:Universal Mechanism Loco (2012) "Universal mechanism: Simulation of rail vehicle dynamics", power point, www.umlab.ru.

- Xiao, X., Jin, X., Deng, Y. and Zhou, Z. (2008) "Effect of curved track support failure on vehicle derailment", Journal of Vehicle System Dynamics, Vol. 46, No. 11, pp 1029-1059.

- Zeng, J. and Guan, Q. H. (2008) "Study on flange climb derailment criteria of a railway wheelset", Journal of Vehicle System Dynamics, Vol. 46, No. 3, pp. 239-251.

pp.1–13.

- Lichtberger, B. (2005) "Track compendium: Formation, permanent way, maintenance, economics", Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. KG, Hamburg, Germany.

- Mohammadzadeh, S., Sangtarashha, M. and Molatefi, H. (2011) "A novel method to estimate derailment probability due to track geometric irregularities using reliability techniques and advanced simulation methods", Arch Appl Mech, DOI 10.1007/s00419-011-0506-3.

- Sadeghi, J., Fathali, M. and Boloukian, N. (2009) "Development of new track geometry assessment technique incorporating rail Cant Factor", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, Journal of Rail and Rapid Transit, manuscript reference number JRRT237.

- Shevtsov, I. Y. (2008) "Wheel/rail interface optimization" Ph.D Thesis, Delft University of Technology, the Netherlands.

- Takai, H., Uchida, M., Muramatsu, H. and Ishida, H. (2002) "Derailment safety evaluation by analytic equations", Railway Technical Research Institute, Vol. 43, No. 3, pp. 119-124.