



خروج از خط و روشهای تشخیص اتوماتیک آن

اسماعیل فاطمی، کارشناس مسئول علائم، مرکز تحقیقات راه آهن

تلفن: ۰۲۱-۸۹۷۰۷۰۱-۳ نمابر: ۰۲۱-۸۹۶۱۴۶۲، پست الکترونیکی: e_fatemi@irirw.com

چکیده

یکی از حوادث مهم و خطرناکی که خسارات جانی و مالی زیادی را در سیستم حمل و نقل ریلی بدنبال دارد، خروج از خط است. این پدیده ناخواسته که بر اثر انحراف محورهای واگن از ریل حادث می‌گردد، هزینه‌های زیادی مانند خرابی تراورسها در مسافتهای طولانی، خرابی و انحراف ریل، صدمات وارده به واگن مربوطه و ... را به دنبال دارد. محوری که از خط خارج شده است در نقاط حساسی مانند سوزنهای مسیر، ممکن است منجر به انحراف واگنهای پشت سری خود از مسیر، برخورد آنها به یکدیگر و در هم کوبیدن قطار شده که حوادث ناگواری را خصوصاً در واگنهای حمل سوخت بدنبال خواهد داشت. مطالعات و بررسی‌های انجام شده بیانگر این واقعیت است که هر چند در لحظه رخ داد خروج از خط صدمات و خساراتی بر سیستم حمل و نقل ریلی وارد می‌شود، اما بسیاری از هزینه‌های این پدیده ناخواسته ناشی از متوجه نشدن لکوموتیوران و در نتیجه ادامه مسیر قطار در مسافتهای طولانی است. لذا با توجه به اینکه با تشخیص سریع و به موقع این پدیده می‌توان قطار مربوطه را فوراً متوقف کرده و به این ترتیب خسارات و هزینه‌های ناشی از خروج از خط را به مقدار بسیار زیادی کاهش داد، تشخیص سریع و اتوماتیک آن از اهمیت زیادی برخوردار است.

کلید واژه‌ها: خروج از خط (Derailment)، شتاب‌سنج پیزوالکتریک، شباهای دینامیک، پردازش سیگنال

۱. مقدمه

خروج از خط اصطلاحاً به انحراف حداقل یکی از محورهای وسیله نقلیه از مسیر ریلها اطلاق می‌شود، بگونه‌ای که یکی از چرخهای محور مذکور در فاصله بین دو ریل بر روی تراورسها و چرخ دیگر در خارج از فاصله ریلها حرکت کند. از دلایل عمده این پدیده ناخواسته می‌توان به عوامل زیر اشاره کرد:

- ۱- افزایش عرض خط
- ۲- تأثیر نیروهای جانبی وارد بر وسیله نقلیه
- ۳- توزیع نامناسب بار
- ۴- افتادگی خط که منجر به حالت بی باری وسیله نقلیه می‌شود

۵- نوسانات و ارتعاشات وسیله نقلیه ناشی از عوامل مختلفی چون ناهمگونی وسیله نقلیه و ریل، خرابی یاتاقانها و یا بریدگی چرخ

۶- از هم پاشیدگی چرخ و محور بر اثر داغی شدید سر محور

۷- تیزی لبه چرخ و ۰۰۰

بر اثر این عوامل محور (یا محورهای) وسیله نقلیه از مسیر ریل خارج شده که در اصطلاح به آن خروج از خط گویند.

یکی از آمارهای ارائه شده در خصوص خروج از خط (ناشی از عیبهای آلات ناقله) در سالهای ۷۵ تا ۷۷ راه آهن ایران در جدول ۱ ارائه شده است که با دقت در آن می توان به تنوع عوامل مؤثر در بروز این حادثه پی برد. از طرفی بررسی عوامل مختلف بوجود آورنده خروج از خط مستلزم مطالعه و بررسی رفتار دینامیکی ریل و قطار است. مطالعات انجام شده نشان می دهد که دینامیک حرکت وسیله نقلیه بر روی ریل به پارامترهای مختلف ریل و وسیله نقلیه بستگی دارد. این رفتار دینامیک معمولاً توسط آزمایشات عملی مورد بررسی قرار می گیرد ولی می توان با استفاده از نرم افزارهای خاصی حدود رفتار ریل و قطار را در مقابل هم مورد تحلیل قرار داد. نتایج این تحلیلها نشان می دهد که اندرکنش قطار و خط در محدوده وسیعی از فرکانسها اتفاق می افتد. این فرکانسها، از فرکانسهای حدود یک هرتز برای نوسان بدنه قطار تا چند کیلوهرتز برای ضربات وارده از قطار به خط گسترده شده است، که ناشی از وجود عیب و نواقص ناخواسته در وضعیت خط و تجهیزات وسیله نقلیه و بعضاً شیوه های بهره برداری نامناسب می باشد. اگر یکی از عوامل مذکور تحت یک شرایط خاص از حد ایمنی خود خارج گردد، ممکن است در یک لحظه و بطور آنی منجر به ایجاد پدیده خروج از خط گردد.

از طرف دیگر تخمین دقیق علل ایجاد یک پدیده خروج از خط کار مشکل و بعضاً غیر ممکن است، بطوریکه اگر پس از ایجاد یک سانحه خروج از خط، همان شرایط تخمینی مجدداً تکرار شود ممکن است خروج از خطی اتفاق نیافتد. لذا تعیین تمامی شرایط در لحظات رخ داد خروج از خط کار بسیار مشکلی است. مجموعه این عوامل باعث شده است که حتی کشورهای پیشرفته نیز تا کنون نتوانند بطور کامل از ایجاد خروج از خط در راه آهنهای خود جلوگیری کنند، بلکه این پدیده ناخواسته همچنان

جدول ۱: علل خروج از خط (عامل آلات ناقله ریلی) از سال ۷۵ تا ۷۷

تعداد	علت	تعداد	علت	تعداد	علت
۳	چسبندگی بالشتک و یکطرفه شدن بار در قوس	۱۰	خرابی و شکستگی فنر	۳۷	شکستگی بوژی
۲	شکستگی واگن از محل جوشکاری	۹	افتادگی خط	۳۶	عدم گردش بوژی
۲	خرابی محور	۸	خرابی واگن	۲۴	افتادن میله مثلث
۲	خرابی سر محور	۵	خرابی بانداژ چرخ	۱۴	تیزی پروفیل چرخ
۲	شکستگی شاسی واگن	۵	در آمدن طوقه	۱۴	لقی طوقه
		۴	شکستگی بانداژ چرخ	۱۲	بریدن سر محور

بیشترین آمار سوانح را در کشورهای مختلف به خود اختصاص داده است.

۲. خسارات و هزینه‌های ناشی از خروج از خط

خسارات و هزینه‌های وارده در اثر هر پدیده خروج از خط معمولاً به دو دسته خسارات مستقیم و غیر مستقیم تقسیم‌بندی می‌شود. خسارات مستقیم اصطلاحاً به "خسارات وارده به واگنها، خسارات وارده به خط، خسارات وارده به علائم و خسارات وارده به بار" اطلاق می‌شود. از طرف دیگر خسارات غیر مستقیم شامل "خسارات ناشی از مسدودی خط و هزینه‌های مربوط به اعزام قطار نجات" است.

رخ داد یک خروج از خط به خودی خود ممکن است خسارات زیادی را بدنبال نداشته باشد، بلکه آنچه منجر به گسترش خسارات و هزینه‌های ناشی از این پدیده ناخواسته می‌شود، عدم اطلاع لکوموتیوران نسبت به خروج از خط بخشی از قطار و طی مسافتهای طولانی در این حالت است. به عنوان نمونه چگونگی رخ دادن حادثه‌ای که در کشور سوئیس در سال ۱۹۹۴ اتفاق افتاده است را بیان می‌کنیم.

حادثه از آنجایی شروع شد که یکی از محورهای یک واگن مخزن‌دار حاوی سوخت که قسمتی از یک قطار باری را تشکیل می‌داد از خط خارج شده و بر روی تراورسها به حرکت در آمد. این موضوع به خودی خود هزینه زیادی را در بر نخواهد داشت، اما آنچه منجر به تبدیل آن به یک حادثه خطرناک شد، عدم اطلاع لکوموتیوران از خروج از خط واگن مربوطه و طی مسافت طولانی در این وضعیت بود. سرانجام حادثه در ایستگاهی در نزدیکی شهر زوریخ اتفاق افتاد. واگن مخزن‌دار مذکور در محل سوزن ورودی ایستگاه از مسیر منحرف شده و پس از سرنگون شدن منفجر شد. این حادثه که در شکل ۱ نشان داده شده است، بالغ بر ۲۴ میلیون فرانک سوئیس خسارت وارد کرده اما تلفات جانی نداشته است.

حادثه‌ای از این نوع در ایستگاه رخس در راه آهن ایران اتفاق افتاده است. به این ترتیب که داغی شدید سر محور یکی از واگنهای قطار باری باعث شد که چرخها بطور ثابت بر روی ریل کشیده شده و پس از طی مسافتی سرمحور واگن مذکور از محور جدا، و منجر به خروج از خط آن محور شود. اما لکوموتیوران که

متوجه موضوع نمی‌شود، به مسیر خود ادامه داده و به این ترتیب سبب آسیب دیدن تعداد زیادی از تراورسها و پابندهای نزدیک به ۶ کیلومتر از مسیر می‌شود. این واگن هنگام ورود به ایستگاه رخس و در سر سوزن ایستگاه، به مسیر دیگری منحرف شده و به این ترتیب واگنهای بعدی را نیز از مسیر منحرف کرده، که پس از برخورد به یکدیگر کاملاً منهدم



شکل ۱: تصویری از حادثه خروج از خط در کشور سوئیس

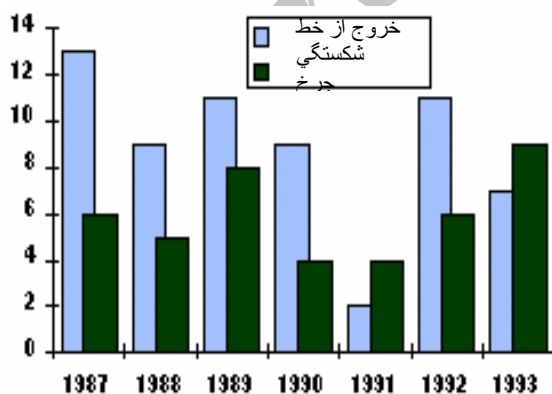
می‌شوند. مجموع خسارات مستقیم و غیر مستقیم این حادثه حدود ۳۲۰ میلیون تومان برآورد شده است. اگر چه همه خروج از خطها منجر به چنین حوادث خطرناکی نمی‌شوند، اما چنین حوادث ناگواری مجدداً نیز تکرار خواهند شد. در این حوادث نمی‌توان لکوموتیوران را مقصر دانست، زیرا برای او امکان دیدن اینکه محوری از خط خارج شده است، وجود ندارد. اما خسارات ناشی از این حوادث قابل ملاحظه است. صرفنظر از وسیله نقلیه، تراورسهای زیادی خسارت می‌بینند و خطوط بایستی عوض شوند. سؤالی که مطرح می‌شود این است که: "آیا می‌توان از بروز چنین حوادثی جلوگیری کرد؟"

راه آهن آمریکای شمالی با توجه به مطالعات زیادی که در مورد عوامل ایجاد خروج از خط دارد، هنوز هم متحمل خسارات ناشی از این پدیده است. طبق آماری که این کشور ارائه داده است، در سال ۱۹۹۰ جمعاً ۲۱۴۶ مورد خروج از خط به وقوع پیوسته که هزینه مستقیم آنها بالغ بر ۱۵۰ میلیون دلار و هزینه غیر مستقیم آنها حدود ۳۳۰ میلیون دلار بوده است.

همچنین آمار ارائه شده توسط TSB (Transport Safety Board)، در مورد خروج از خطهای راه آهن کانادا در سالهای ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۳ در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به مدارک ارائه شده، بطور متوسط نزدیک به ۱۰ مورد خروج از خط فقط ناشی از داغی سر محور در هر سال توسط TSB شناسایی شده، که هزینه هر حادثه بطور متوسط ۲۵۰ هزار دلار تخمین زده شده است.

۳. شناسایی اتوماتیک خروج از خط

همانطور که اشاره شد خروج از خط یکی از حوادث مهمی است که خسارات و هزینه‌های زیادی را بر سیستم حمل و نقل ریلی تحمیل می‌کند. امروزه این پدیده ناخواسته قسمت اعظم خسارات ناشی از سوانح را چه در کشورهای پیشرفته و چه کشورهای در حال توسعه به خود اختصاص داده است. مطالعات و تحقیقات



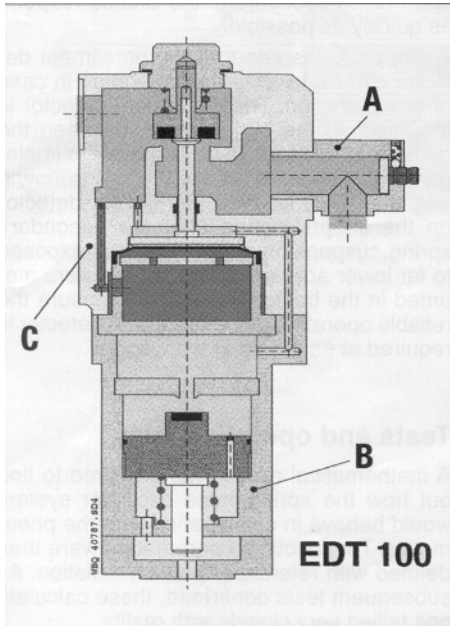
شکل ۲: آمار خروج از خطهای ناشی از داغی

سرمحور و شکستگی چرخ در کانادا که توسط

TSB تشخیص داده شده است.

وسیع انجام شده نشان می‌دهد که گرچه می‌توان با تمهیداتی از تعداد بروز این پدیده کاست، ولی با توجه به تنوع عوامل مؤثر در بروز این سانحه و پیچیدگی نقش هر عامل در ایجاد آن، جلوگیری از بروز خروج از خط ناممکن است.

بنا به دلایل فوق تشخیص اتوماتیک خروج از خط موضوعی است که از مدتها قبل مورد توجه و تحقیق راه‌آنها و شرکتهای مختلف مرتبط با صنعت حمل و نقل ریلی بوده است. این تحقیقات اخیراً نتایج مطلوب و مفیدی را از خود نشان داده و سیستمهایی به این منظور پیشنهاد شده است که عمدتاً بر اساس اندازه‌گیری



شکل ۳: قسمت‌های اصلی سیستم EDT100

شتابهای عمودی اعمالی به واگن کار می‌کنند. در مقاله حاضر دو سیستم متفاوت از این نوع مورد بررسی قرار می‌گیرد که عبارتند از:

۱- سیستمی مکانیکی که بر اساس یک نوسان کننده جرم-فنر (Spring-mass oscillator) کار می‌کند. این سیستم که توسط راه‌آهن سوئیس ارائه شده است، EDT100 نامیده شده و روشی جدید را برای این منظور ارائه می‌دهد. این آشکارساز خروج از خط بر اثر نوسانات و ضربه‌های عمودی ناشی از خروج از خط تحریک شده و با اعمال فرمان به ترمز اضطراری، قطار را متوقف می‌کند.

۲- سیستم دوم از سنسورهای شتاب‌سنج پیزوالکتریک، که بر روی بدنه واگن و خصوصاً بوژی‌ها نصب می‌شود بهره‌جسته و با اندازه‌گیری لرزشهای اعمالی به واگن، و مقایسه آنها با یکسری دیتای از پیش تعیین شده، باعث آشکارسازی خروج از خط می‌شود.

۴. تشخیص اتوماتیک خروج از خط با استفاده از EDT100

شکل ۳ بلوک دیاگرام این سیستم را که از دو قسمت اصلی زیر تشکیل یافته است، نشان می‌دهد:

- ۱- یک شیر ترمز اضطراری
- ۲- یک آشکارساز جرم-فنر

این سیستم مطابق شکل ۴ در طرفین هر واگن نصب شده، بگونه‌ای که شیر ترمز اضطراری آن به لوله هوای ترمز سراسری متصل می‌باشد. همانطور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشخص شده است، سیستم از طریق لوله سراسری ترمز بوسیله هوای فشرده پر می‌شود. شیر موجود در آشکارساز B نیز در حالت عادی بسته بوده که



نیروی مسدود کننده این شیر توسط فنری که در قسمت زیرین آن تعبیه شده، تأمین می‌شود. عملکرد این بخش از سیستم بگونه‌ای است که اگر یک ضربه عمودی به آن اعمال گردد، شیر باز شده و هوای فشرده وارد محفظه بالایی پیستون می‌شود. ضربه وارد شده

شکل ۴: محل نصب سیستم EDT100 در طرفین واگن

باید دارای یک حداقل نیروی معین و بازه زمانی مشخصی باشد تا قادر به فعال کردن شیر مربوطه شود. سیستم بگونه‌ای تنظیم می‌شود که فقط در لحظه رخ دادن خروج از خط فعال گردد. به این ترتیب هوای فشرده‌ای که وارد پیستون می‌شود، بر سطح داخل آن فشار وارد کرده و منجر به تخلیه هوا از طریق شیر ترمز اضطراری می‌شود، به این ترتیب قطار در کمترین زمان و کوتاهترین فاصله ممکن متوقف می‌شود. طراحی این سیستم به گونه‌ای است که پس از تخلیه هوای درون لوله اصلی، شیر مربوطه بطور اتوماتیک بسته خواهد شد.

سیستم تشخیص خروج از خط فوق با همکاری شرکت Oerlikon-Knorr و راه آهن سوئیس، توسعه یافته و آزمایشات عملی آن از سال ۱۹۹۶ آغاز شده است. این سیستم با خروج از خط واگنهای پر و خالی مختلف و در سرعتهای متفاوت مورد تست و آزمایش قرار گرفته و شتاب ۵g به عنوان مناسبترین سطح آستانه تعیین شده است. این مقدار به گونه‌ای انتخاب شده است که شتابهای اعمالی مربوط به بریدگی چرخ یا شکاف درز ریل، قادر به فعال کردن سیستم نمی‌باشند.

بدنبال نتایج مطلوب کسب شده از تستهای سیستم EDT100، شرکت Wascosa AG بزرگترین شرکت اجاره دهنده واگنهای مخزن‌دار به راه آهن سوئیس، در نظر دارد از این سیستم به منظور ایمنی هرچه بیشتر واگنهای حمل سوخت خود استفاده کند.

۵. تشخیص اتوماتیک خروج از خط با استفاده از سنسورهای پیزوالکتریک

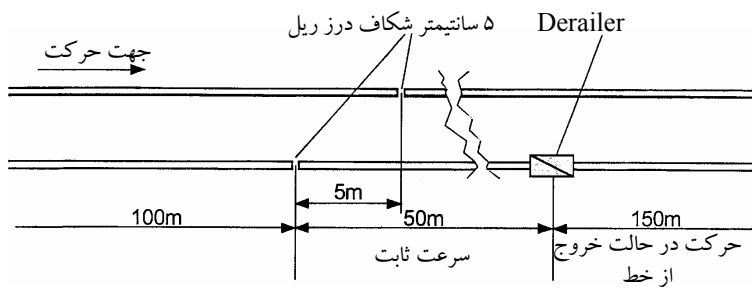
همانطور که اشاره شد، این روش مبتنی بر آشکارسازی لرزشهای اعمالی به واگن و مقایسه آنها با یکسری دیتا و مقادیر از پیش تعیین شده است. این کار با استفاده از سنسورهای حساس پیزوالکتریک برای اندازه‌گیری ضربه‌ها و شتابهای دینامیک اعمالی به بوژی و واگن انجام پذیر است. سنسور (سنسورهای) پیزوالکتریک در نقاط مناسبی از واگن نصب شده و هنگام حرکت، لرزشهای مربوطه را اندازه‌گیری می‌کنند. به این ترتیب در صورت بروز خروج از خط، بلافاصله می‌توان شتابهای دینامیک ناشی از آن را تشخیص داده و با اعمال فرمان، قطار مربوطه را متوقف کرد.

شرکت ADAMS/Rail آزمایشاتی را با استفاده از سنسورهای حساس پیزوالکتریک برای رسیدن به دو هدف عمده زیر در زمینه خروج از خط انجام داده است:

۱- پیدا کردن محلی مناسب بر روی واگن باری برای اندازه‌گیری لرزشها و شتابهای دینامیک مربوط به خروج از خط

۲- بدست آوردن دیتای معتبر برای شبیه‌سازی خروج از خط

به این منظور برای اندازه‌گیری لرزشهای واگن در حالات مختلف، خط تستی مطابق شکل ۵ تدارک دیده شده و تستهای مربوطه بر روی آن انجام شده است. اندازه‌گیریها در مسافت ۳۰۰ متر از خط مربوطه (که شامل یک شکاف درز ریل، به فاصله ۵ سانتیمتر و یک عامل خروج از خط می‌باشد)، انجام شده و لرزشهای



شکل ۵: خط تست تدارک دیده شده برای آزمایش خروج از خط

مربوط به حرکت عادی و حالت خروج از خط واگن اندازه گیری، و با ضربه های ناشی از عوامل مختلفی چون شکاف درز ریل، بریدگی خط و ۰۰۰ مقایسه شده است.

در این آزمایشات از ۱۲ سنسور

شتاب سنج پیزوالکتریک، مطابق شکل ۶ در نقاط مختلف واگن و در جهات مختلف، استفاده شده است. استفاده از سنسورهای متعدد در جهات مختلف این امکان را می دهد که با مقایسه دیتاهای ذخیره شده، مناسبترین محل برای تشخیص خروج از خط بدست آید.

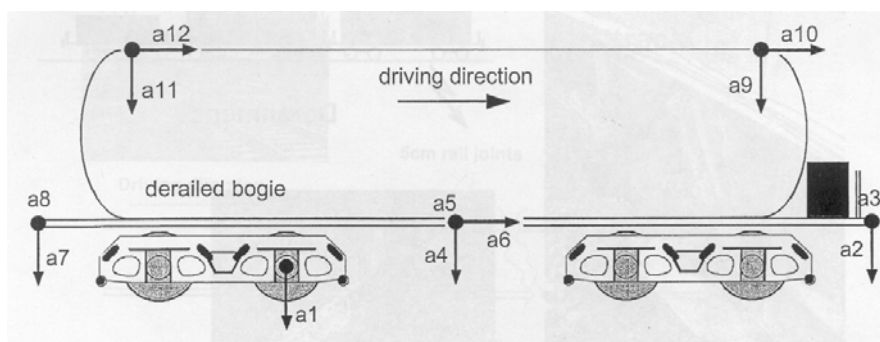
این آزمایشات به کرات بر روی واگنهای مخزن دار پر و خالی، و واگنهای با چرخ بریده، در سرعتهای مختلف انجام شده و لرزشهای دینامیک مربوط به سنسورها با هم مقایسه شده است.

نمونه ای از شتابهای دینامیک اندازه گیری شده در اثر پدیده خروج از خط در شکل ۷ نشان داده شده است. تغییرات فاحش این لرزشها در حالت خروج از خط بیانگر این واقعیت است که از این اطلاعات می توان در تشخیص سریع خروج از خط استفاده کرد. به این ترتیب که لرزشهای اعمالی به شتابسنجها اندازه گیری و ذخیره می شوند. سپس با اعمال تکنیکهای پردازش سیگنال، ویژگیهای مهم آنها استخراج شده و با مقادیر از پیش تعیین شده ای که از نتایج آزمایشات بدست آمده است، مقایسه می شوند. به این ترتیب می توان از مقایسه این مقادیر با اطلاعات قبلی، وقوع خروج از خط را تشخیص داده و بلافاصله قطار را متوقف ساخت

بطور کلی شتابهای دینامیک در حالت خروج از خط نسبت به حالت عادی واگن، دارای دو تفاوت عمده و محسوس است که عبارت اند از:

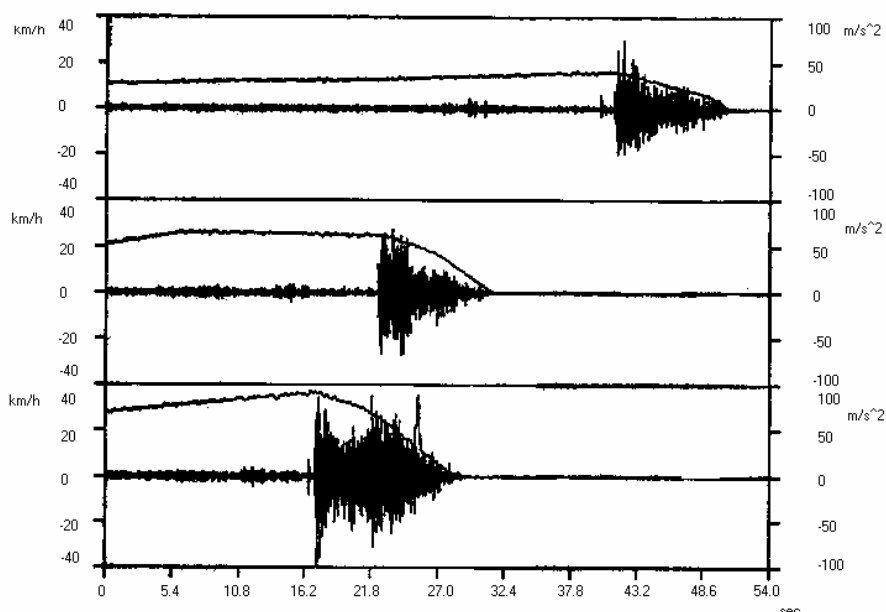
- ۱- دامنه لرزشها
- ۲- فرکانس شتابهای دینامیک اندازه گیری شده

همان طور که در شکل ۷ کاملاً مشخص است در حالت خروج از خط دامنه نوسانات به شدت افزایش یافته و از این ویژگی می توان برای شناسایی سریع این پدیده ناخواسته استفاده کرد. از طرف دیگر وقتی یک



شکل ۶: نحوه توزیع سنسورهای شتاب سنج پیزوالکتریک بر روی واگن باری مخزن دار

محور از واگنی از خط خارج شود یکی از چرخهای آن بر روی تراورسها حرکت می کند. به این ترتیب ضربه هایی با پیروی تکرار تراورسها به واگن وارد شده که با



شکل ۷: نمونه‌ای از شتابهای دینامیک اندازه‌گیری شده در اثر خروج از خط واگن مخزن‌دار پر

اندازه‌گیری فرکانس این ضربه‌های پرودیگ می‌توان به وقوع خروج از خط پی برد.

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به تنوع عوامل مؤثر در بروز خروج از خط و پیچیدگی نقش هر عامل در ایجاد آن، و با توجه به اینکه هزینه‌های ناشی از بروز این پدیده

ناخواسته از نقطه نظر اقتصادی و ایمنی فوق‌العاده سنگین است، لذا تشخیص سریع و اتوماتیک آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. به این منظور دو سیستم مکانیکی و الکترونیکی در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار گرفت که پیاده‌سازی هر یک از آنها می‌تواند از خسارات و هزینه‌های ناشی از خروج از خط جلوگیری نماید. هر دو این روشها عملی و قابل پیاده‌سازی هستند، اما روش استفاده از سنسورهای پیزوالکتریک و تکنیکهای پردازش سیگنال نسبت به سیستم مکانیکی دارای این مزیت است که از آن می‌توان بطور همزمان برای تشخیص سایر عیوب چرخ و ریل، مانند بریدگی چرخ، بررسی و تحلیل ناهمواریهای ریل و چرخ، و ... نیز استفاده کرد. ضمن اینکه از نظر اقتصادی سیستم الکترونیکی در مقایسه با سیستم مکانیکی هزینه کمتری خواهد داشت.

۷. مراجع و مأخذ

- [1] Schirmer, Lee, "Derailment Investigations and its Simulation by the Use of ADAMS", 5th ADAMS/Rail User's Conference, 1999.
- [2] Oerlikon Catalogue, The Derailment Detector.
- [3] Transportation Safety Board of Canada, A Special Study of Main Track Derailments, 1994.

[۴] رحیمی، حسن، "بررسی سانحه ایستگاه رخس"، سومین همایش ارتقاء ایمنی و تحلیل سوانح، ۱۳۷۸.

[۵] درگزی، محسن، "شناسایی عوامل خروج از خط"، سومین همایش ارتقاء ایمنی و تحلیل سوانح، ۱۳۷۸.