

## ارزیابی رفتار دینامیکی واگن متروی تهران

### مقاله پژوهشی

اصغر نصر، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران  
محمد مهدی نصری طاهری\*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، تهران، ایران  
مجید شهبوی، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Naseri71@alumni.iust.ac.ir

دریافت: ۹۸/۰۴/۱۷ - پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۲

صفحه ۶۱-۷۰

### چکیده

در این مقاله با مدلسازی بوژی CCDZC42 در واگن‌های نسل اول متروی تهران، به بررسی رفتار دینامیکی این بوژی بر روی خط مستقیم پرداخته شده است. شبیه‌سازی دینامیکی در نرم افزار (Universal Mechanism) انجام شده است. در ابتدا با شبیه سازی قطعات مختلف بوژی در نرم افزار مدل سازی سه بعدی، ممان اینرسی ادوات بوژی و جرم‌های مختلف قسمت‌های بوژی به دست آمده است و سپس بوژی به طور کامل در نرم افزار گرافیکی مونتاژ شده است. در شبیه‌سازی دینامیکی واگن مترو، شبیه‌سازی سیستم تعلیق اولیه و ثانویه با توجه به تفاوت این دو سیستم تعلیق اولیه و ثانویه این واگن نسبت به واگن‌های معمول که از فنرهای لول بهره می‌برند، نیاز به شبیه سازی دقیقی دارند. سپس با وارد کردن قطعات به نرم افزار دینامیکی مدل واگن و بوژی تکمیل شده است و سپس اقدام به دست آوردن سرعت بحرانی واگن و شتاب‌های عمودی بدنه شده است. با توجه به تفاوت سیستم تعلیق ثانویه به کار رفته در این ناوگان در انتها اقدام به شبیه‌سازی سیستم تعلیق فنر هوایی و سپس ارزیابی نیروهای دینامیکی واگن و شتاب‌های خروجی اعمال شده بر بدنه صورت گرفته است. در انتها اندیس راحتی سفر واگن مترو تهران به دست آورده شده است. با توجه به روش‌های مختلف به دست آوردن معیار راحتی سفر در واگن‌های مسافری مقدار اندیس راحتی سفر به دست آمده از شبیه سازی دینامیکی با مقادیر مجاز موجود مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: بوژی، مترو، واگن، هانتینگ

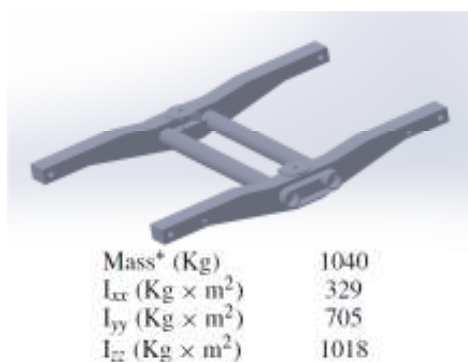
### ۱- مقدمه

دست آوردن ممان اینرسی قطعات می‌توان، قطعات مختلف یک واگن را در نرم افزار شبیه سازی رسم نموده و سپس اقدام در بدست آوردن ممان‌های اینرسی نمود. برای شبیه سازی قطعات یک بوژی، از شبیه‌سازی فریم و جعبه یاتاقان‌ها در نرم افزار Solid works استفاده شده است. سپس برای صحت سنجی مقدار ممان‌ها و جرم، از کاتالوگ شرکت متروی تهران استفاده شده است. اولین شبیه سازی صورت گرفته بر روی واگن‌های مترو به منظور شبیه‌سازی دینامیکی و استخراج ضریب سایش چرخ‌ها و پیش بینی الگوی سایش چرخ توسط آقای انصاری و همکارانشان صورت گرفته است. (Ansari et al., 2008) از جمله

مطالعه‌ی رفتار دینامیکی واگن، از جمله مطالعات بسیار مهم در صنعت ریلی می‌باشد. با توجه به اینکه یکی از اهداف صنعت ریلی حمل و نقل مسافر به صورت ایمن می‌باشد، از ابزارهای شبیه‌سازی دینامیکی واگن به منظور ارزیابی ایمنی ناوگان ریلی استفاده می‌شود. یکی از ابزارهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی دینامیکی واگن، استفاده از نرم افزارهای دینامیک چند جرمی می‌باشد. از جمله نرم افزارهای دینامیکی موجود در صنعت برای شبیه‌سازی دینامیکی واگن، نرم‌افزارهای UM، ADAMS و SIMPACK می‌باشند. برای شبیه‌سازی دینامیکی واگن، یکی از ملزومات مورد نیاز، داشتن جرم‌ها و ممان‌های اینرسی قطعات می‌باشد. برای به

## ۲- شبیه‌سازی قطعات واگن

در ابتدا برای شبیه‌سازی قطعات واگن، از شبیه‌سازی فریم بوژی شروع شده است. شبیه‌سازی فریم بوژی در نرم افزار Solid Works انجام شده است. شکل مشخصات فریم بوژی در زیر قابل مشاهده می‌باشد. مقدار ممان اینرسی در نظر گرفته شده برای فریم بوژی در شکل زیر مشهود است.



شکل ۳. ممان اینرسی فریم بوژی

پس از شبیه‌سازی فریم بوژی به شبیه‌سازی سیستم چرخ و محور این بوژی‌ها پرداخته می‌شود. شعاع چرخ این بوژی‌ها ۸۶۰ میلی‌متر بوده است.

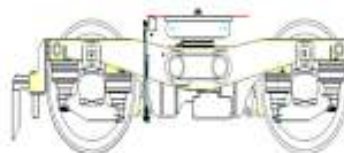
پس از اتمام شبیه‌سازی قطعات اصلی در سیستم چرخ و محور، مونتاژ قطعات مذکور و اسمبل کردن بوژی انجام گردیده است. باتوجه به اینکه در نرم‌افزارهای دینامیکی قابلیت ورود اجزا به صورت مجزا و به صورت اسمبلی وجود دارد، با وارد کردن اجزا به صورت اسمبل فرآیند شبیه‌سازی ناوگان ریلی تسهیل می‌گردد. نمایی از محیط اسمبلی بوژی در شکل زیر مشهود است.



شکل ۴. بوژی واگن متروی تهران در حالت مونتاژ شده

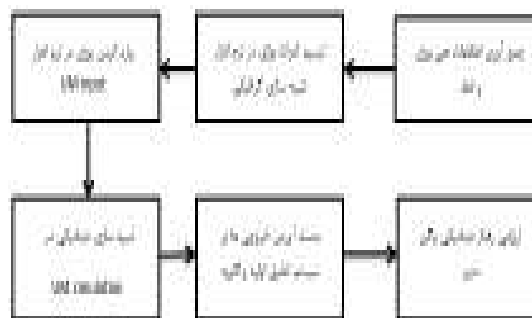
پس از اتمام فرآیند شبیه‌سازی قطعات بوژی، اقدام به وارد کردن قطعات در نرم‌افزار دینامیکی شده است.

مطالعاتی که در ارتباط با شبیه‌سازی واگن مترو صورت گرفته است، شبیه‌سازی واگن مترو با در نظر گرفتن مودهای پیچشی بدنه ی واگن توسط آقای حاصلیان و همکارانشان بوده است. (Haselian and molatefi,2013) ایشان در این شبیه‌سازی با در نظر گرفتن انعطاف پذیری بدنه واگن، به مقایسه آن با واگن صلب پرداخته‌اند. از دیگر مطالعات صورت گرفته در ارتباط با شبیه‌سازی واگن مترو صورت گرفته است، شبیه‌سازی واگن مترو برای به دست آوردن شتاب‌های عرضی سیستم چرخ و محور می‌باشد. این پژوهش برای به دست آوردن اثرات خط بر روی نوبز واگن توسط صادقی و همکارانشان انجام شده است (Sadeghi et al.,2014). از نمونه کارهای بهینه‌سازی صورت گرفته در شبیه‌سازی واگن، بهینه‌سازی سیستم تعلیق اولیه ی بوژی در نرم افزار SIMPACK می‌باشد که توسط آقای بریبوک و همکارانشان صورت گرفته است. (Berbyuk and Enelund,2010). نمایی از بوژی مترو در شکل زیر مشهود است.



شکل ۱. نمایی از بوژی مترو تهران

روند اقدامات که در طول این مقاله صورت خواهد گرفت در این نمودار قابل مشاهده می‌باشد.

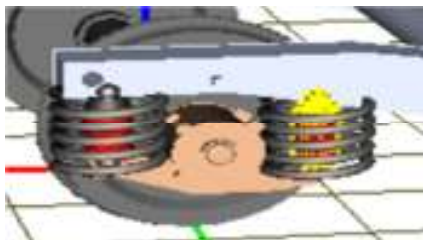


شکل ۲. فرآیند صورت گرفته در شبیه‌سازی

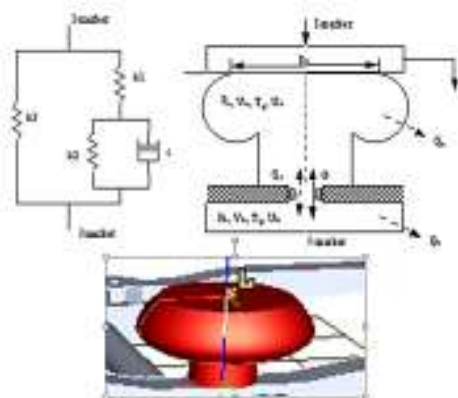
مشهود است.

### ۳- وارد کردن بخش های واگن در نرم افزار دینامیکی

پس از اتمام شبیه سازی قطعات واگن در نرم افزار شبیه سازی، اقدام به شبیه سازی آن در نرم افزار دینامیکی شده است. در نرم افزارهای دینامیکی دو سیستم که نقش مهم در شبیه سازی رفتار واگن دارند، سیستم تعلیق اولیه و دیگری سیستم تعلیق ثانویه می باشد. محل قرارگیری این دو سیستم در مدل سازی در شکل زیر مشهود است.



شکل ۶. جانمایی سیستم تعلیق اولیه



شکل ۷. مدل فنر هوایی نیشیمورا

برای محاسبه مقدار سفتی و دمپر استفاده شده از فرمول های زیر استفاده شده است. در فرمول های زیر  $n$  ضریب پلی تروپیک هوا،  $P_0$  فشار استاتیکی مخزن هوای فنر هوایی،  $P_{atm}$  برابر با فشار محیط،  $V_a, V_b$  برابر با حجم مخزن هوای فنر هوایی،  $G$  ضریب اصلاحی دمپینگ معادل و  $\rho_0$  چگالی هوای به کار رفته می باشد. پس از شبیه سازی سیستم تعلیق ثانویه و اتصال آن با واگن به وارد کردن واگن در نرم افزار دینامیکی پرداخته شده است.

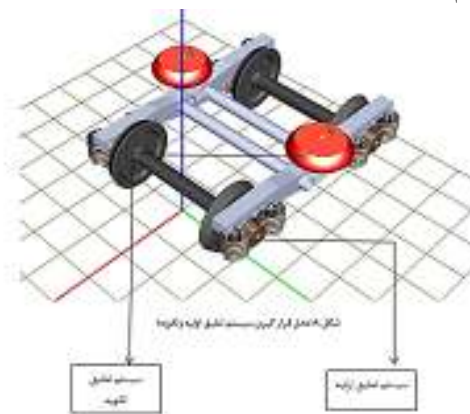
$$K_1 = \frac{nP_0}{V_b} A_e^2 \quad (1)$$

$$K_2 = \frac{nP_0}{V_a} A_e^2 \quad (2)$$

$$K_3 = (P_0 - P_{atm}) \frac{dA_e}{dz} \quad (3)$$

$$C = GA_e^2 \rho_0 \quad (4)$$

فاصله ی مابین این دو بوژی ۱۲/۶ متر می باشد. مشخصات جرمی و ممان اینرسی واگن مد نظر در جدول مشهود است.



شکل ۵. جانمایی سیستم تعلیق اولیه و ثانویه

برای شبیه سازی این فنر لاستیکی سیستم تعلیق اولیه از یک فنر لول و از یک دمپر استفاده شده است. علت استفاده از دمپر این امر می باشد که با توجه به اینکه در این فنرها عملیات استهلاک انرژی توسط لاستیک انجام می شود، با توجه به منحنی هیزترسیس لاستیک مقدار دمپر معادل استخراج می شود. جدول ۱ به بیان مشخصات سفتی فنر سیستم تعلیق اولیه می پردازد.

جدول ۱. پارامترهای سیستم تعلیق ثانویه

پارامتر	مشخصه
Kx	4/5e6(N/m)
Ky	3/5e6(N/m)
Kz	9/3e6(N/m)
Cz	54131(N.s/m)

محل قرارگیری فنر و دمپر در سیستم تعلیق در شکل زیر مشهود است. برای شبیه سازی سیستم تعلیق ثانویه ی مترو، فنر هوایی مابین فریم و بدنه واگن قرار دارد. مقادیر سفتی فنر هوایی مورد استفاده در این بوژی، از مدل نیشیمورا<sup>۱</sup> فنر هوایی استفاده شده است. شکل مدل فنر هوایی در صفحه

با توجه به نوع پروفیل چرخ و ریل، همخوانی و انطباق پروفیل چرخ و ریل در شکل ۸ مشهود است.

به منظور به دست آوردن رفتار دینامیکی سیستم چرخ و محور واگن لازم است تا معادلات دینامیکی سیستم چرخ و محور استخراج گردد. بدین منظور معادلات دینامیکی سیستم چرخ و محور با در جهت عرضی (y) و همچنین در نظر گرفتن زاویه‌ی یاءو (ψ) دوران حول محور z در زیر مشهود است.

$$m\ddot{y} + \frac{2f_{11}}{V} \left[ \dot{y} + r_0 \frac{\lambda}{a} \dot{y} - V\psi \right] + \frac{2f_{12}}{V} \dot{\psi} + W_A \frac{\lambda}{a} y = F_{sy} \quad (5)$$

$$I_{wy}\ddot{\psi} + I_{wy} \frac{V\lambda}{r_0 a} \dot{\psi} + \frac{2af_{33}\lambda}{r_0} y - \frac{2f_{12}}{V} (\dot{y} + r_0 \frac{\lambda}{a} \dot{y} - V\psi) + 2a^2 f_{33} \frac{\dot{\psi}}{V} - aW_A \lambda \psi + 2f_{22} \frac{\dot{\psi}}{V} = M_{sz} \quad (6)$$

در معادلات بالا  $f_{12}$ ،  $f_{11}$ ،  $f_{22}$  و  $f_{33}$  ضرایب اصلاحی کالکر در محاسبه‌ی نیروهای تماسی می‌باشند.  $V$  برابر با سرعت سیستم چرخ و محور در راستای x،  $a$  برابر نیم فاصله‌ی طول سیستم چرخ و محور و  $\lambda$  برابر مخروطیت معادل پروفیل چرخ می‌باشد. همچنین  $W_A$  برابر با نیروی وزن سیستم چرخ و محور و  $F_{sy}$ ،  $M_{sz}$ ، نیرو و گشتاور اعمالی از طریق سیستم تعلیق به سیستم چرخ و محور می‌باشد. برای به دست آوردن سرعت ناپایداری واگن، یک بازه‌ی سرعت مابین ۲۰ الی ۸۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. یکی از روش‌های به دست آوردن سرعت ناپایداری واگن، اعمال یک ناهمواری موضعی به خط هنگام شبیه سازی واگن در خط صاف می‌باشد.

(Polach,2008) به منظور ارزیابی رفتار دینامیکی واگن، پارامتر جابه‌جایی عرضی سیستم چرخ و محور در سرعت‌های مختلف را مورد بررسی قرار داده است. برای شبیه سازی سرعت ناپایداری خط واگن، در بازه‌ی سرعتی ذکر شده، در خط صاف ناهمواری عرضی ۲۰ میلی‌متری شبیه‌سازی شده است. نمایی از ناهمواری خط ذکر شده در شکل ۹ مشهود است.

جدول ۲. مشخصات جرم واگن

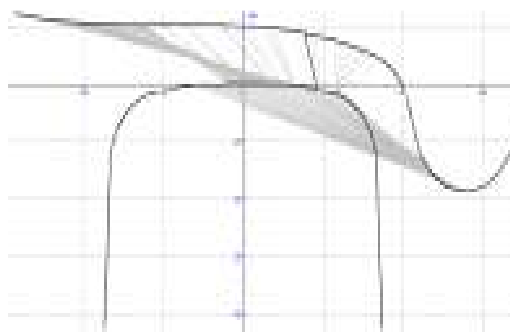
مشخصه	زیر بخش واگن
28 t	جرم واگن
56800(kg/m <sup>2</sup> )	Ixx
1970000(kg/m <sup>2</sup> )	Iyy
1970000(kg/m <sup>2</sup> )	Izz

#### ۴- شبیه‌سازی دینامیکی واگن

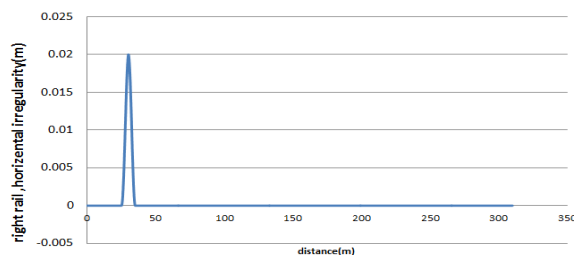
پس از اتمام شبیه‌سازی مشخصات دینامیکی واگن در بخش UM input، در این بخش به شبیه‌سازی رفتار دینامیکی واگن پرداخته شده است. برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی واگن از نرم افزار UM Simulation استفاده شده است. مشخصات هندسی چرخ و ریل در جدول ۳ مشهود است. به منظور حل معادلات تماس چرخ و ریل از تئوری غیر خطی کالکر استفاده شده است که به وسیله‌ی الگوریتم حل‌کننده‌ی FASTSIM به محاسبه‌ی پارامترهای هندسی چرخ و ریل می‌پردازد. پروفیل چرخ مورد بررسی پروفیل S1002 پروفیل ریل مورد نظر UIC54 می‌باشد.

جدول ۳. مشخصات جرم واگن

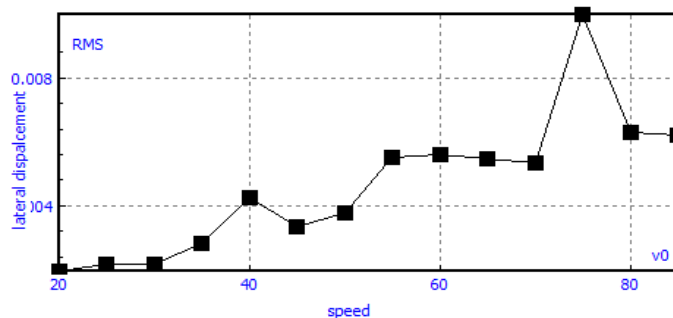
پارامتر	مشخصه
پروفیل چرخ	S1002
پروفیل ریل	UIC60
شیب زیر ریل	۱/۲۰
گیج خط	۱۴۳۵ میلی‌متر
نوع خط	مستقیم



شکل ۸ همخوانی پروفیل چرخ و ریل

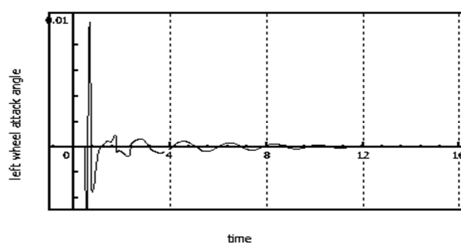


شکل ۹. ناهمواری اعمال شده خط

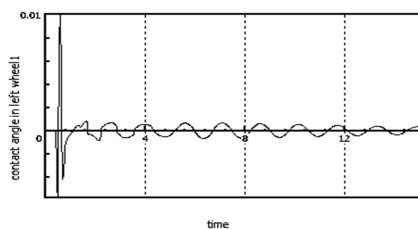


شکل ۱۰. نتایج شتاب عرضی سیستم چرخ و محور با اعمال ناهمواری پله

سرعت ۳۵ متر بر ثانیه که کمتر از سرعت بحرانی می‌باشد، صورت گرفته است. همانطور که در شکل زیر قابل مشاهده می‌باشد، در سرعت ۳۵ متر بر ثانیه، نوسان زاویه‌ی حمله‌ی چرخ چپ اول میرا شده است در حالی که نوسانات آن در سرعت ۴۰ متر بر ثانیه نامیرا می‌باشد. بنابراین، با توجه به پارامتر زاویه‌ی حمله، با افزایش سرعت، ناپایداری سیستم چرخ و محور بیش‌تر شده است.



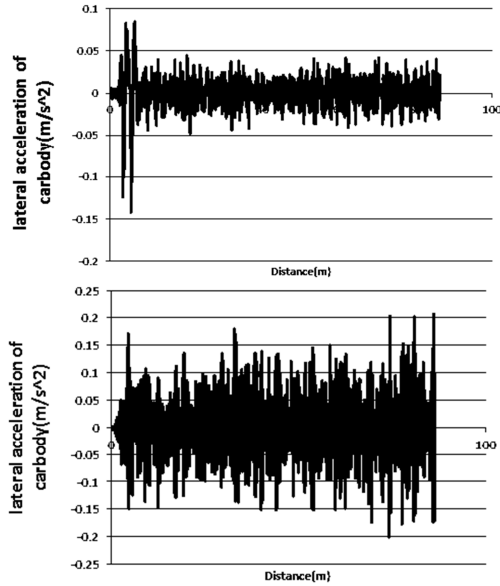
شکل ۱۱. زاویه‌ی حمله‌ی سیستم چرخ و محور در سرعت ۳۵ متر بر ثانیه



شکل ۱۲. زاویه‌ی حمله‌ی سیستم چرخ و محور در سرعت ۴۰ متر بر ثانیه

نتایج حاصل از اعمال این ناهنجاری در تحلیل دینامیکی در بازه‌ی سرعت ۲۰ الی ۸۰ متر بر ثانیه در شکل ۱۰ مشهود است. نمودار زیر بیان‌کننده‌ی جابه‌جایی عرضی سیستم چرخ و محور در بازه‌ی سرعتی ذکر شده در خط‌مورد نظر می‌باشد. طبق نمودار بالا، سرعت ۴۰ متر بر ثانیه با توجه به افزایش دامنه‌ی بیش از حد شتاب به عنوان سرعت بحرانی به دست آمده است. همانطور که در شکل بالا قابل مشاهده می‌باشد در سرعت ۴۰ متر بر ثانیه، مقدار موثر جابه‌جایی عرضی سیستم چرخ و محور در مسیر شبیه‌سازی شده نسبت به سرعت‌های قبل و بعد افزایش چشم‌گیری داشته است که این سرعت به عنوان سرعت بحرانی در نظر گرفته می‌شود. البته سرعت ۳۵ متر بر ثانیه هم دارای افزایش چشم‌گیری در جابجایی عرضی سیستم چرخ و محور داشته است، اما سرعت ۴۰ متر بر ثانیه نسبت به سرعت‌های قبل و بعد از خود دارای افزایش چشم‌گیری در جابه‌جایی عرضی چرخ و محور می‌باشد.

بررسی زاویه‌ی حمله‌ی سیستم چرخ و محور اول قبل و بعد از سرعت بحرانی از پارامترهای مورد توجه در بررسی پایداری واگن می‌باشد. این تحلیل را در خط صاف و طبق ناهمواری در نظر گرفته شده برای سیستم چرخ و محور انجام گرفته است. در راستای این تحلیل مقدار زاویه‌ی حمله چرخ اول در سرعت ۴۰ متر بر ثانیه که برابر با سرعت بحرانی و



شکل ۱۴. شتاب عرضی و عمودی بدنه در شبیه سازی

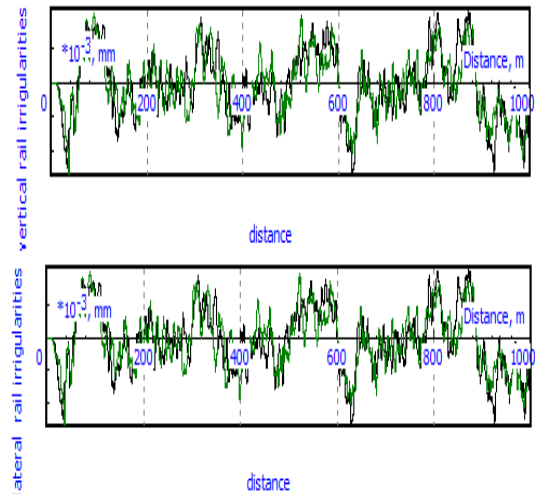
یکی از علل پدید آمدن شتاب‌های بیش‌تر، وجود ناهمواری خط می‌باشد که منجر به افزایش دامنه‌ی شتاب‌ها شده است. یکی از شاخص‌های ارزیابی راحتی مسافران هنگام سوار شدن بر قطار و اعمال شتاب‌های مختلف، پارامتر راحتی سفر می‌باشد. این پارامتر تعیین کننده‌ی راحتی مسافران هنگام اعمال شتاب‌های به وجود آمده هنگام سیر واگن بر مسافر می‌باشد. برای محاسبه‌ی شاخص راحتی سفر در واگن‌های متروی تهران از معیار اسپرلینگ<sup>[3]</sup> استفاده شده است. اسپرلینگ یک دانشمند آلمانی است که با اندازه‌گیری شتاب بر روی بدنه‌ی واگن به معرفی پارامتر راحتی سفر پرداخت. به منظور محاسبه‌ی اندیس راحتی سفر برای یک طیف فرکانسی شتاب از فرمول زیر استفاده می‌شود.

$$W_z = \left( 2 \int_{0.4}^{30} G(f).B^2(f).df \right)^{\frac{1}{6.67}} \quad (5)$$

در فرمول بالا  $G(f)$  بیان کننده‌ی چگالی طیفی توان برای شتاب بدنه‌ی واگن در سه راستای طولی، عرضی و عمودی می‌باشد. همچنین  $B(f)$  بیان کننده‌ی تابع وزن دهی فرکانس می‌باشد. مقدار ضریب فرکانس اثر گذاری در دو راستای عمودی و عرضی با هم متفاوت می‌باشد که تفاوت این دو مقدار توسط آقای دوکیپاتی و همکارش (Garg and Dukkipati, 1982) شرح داده شده است.

### به دست آوردن اندیس راحتی سفر

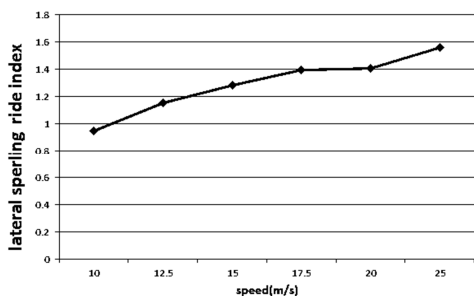
برای بررسی شتاب‌های عمودی بدنه، سرعت شبیه سازی را در بازه‌ی سرعت معمول بهره برداری ناوگان مترو تا بیش‌ترین سرعت سیر ممکن در نظر گرفته شده است. برای اعمال ناهنجاری‌ها خط اعمالی برای شبیه‌سازی از ناهنجاری‌ها معمول و خوب در نرم افزار UM استفاده شده است. شکل ناهنجاری‌های اعمالی بر خط راستای عمودی و عرضی در زیر مشهود است.



شکل ۱۳. ناهنجاری خط بر اساس استاندارد

ناهنجاری خط اعمال شده بیانگر مقدار بی‌نظمی خطوط بهره برداری هنگام عبور سیر ناوگان مترو می‌باشد. این مقدار بیانگر اختلاف ارتفاع و عرض خط در نقاط مختلف نسبت به مقدار مرجع آن می‌باشد. پس از اعمال ناهنجاری اعمال شده، مقدار مقدار شتاب‌های موجود در جهت عرضی و عمودی برای حصول اندیس راحتی سفر مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به اینکه در واگن متروی تهران به جای استفاده از سگ دست و فنر لول از فنر هوایی استفاده شده است ممکن است که مقدار شتاب‌ها با مقادیر سیستم تعلیق فنر لول متفاوت باشد. از مزایای فنر هوایی قابلیت تنظیم ارتفاع آن در شرایط بهره برداری مختلف می‌باشد، اما طبق نظر کارشناسان واگن، فنر هوایی در جهت عرضی دارای سفتی و مقاومت کمتری نسبت به فنر لول می‌باشد. نتایج شتاب‌های بدست آمده بر روی واگن در نرم‌افزار UM برای واگن مترو در شکل ۱۴ مشهود است.

دست آمده در جدول زیر قابل ملاحظه است. (ORE Report, 1978) همانطور که در جدول زیر قابل مشاهده می‌باشد مقادیر استخراج شده طبق معیار اسپرلینگ در حد مطلوب قرار دارد.



شکل ۱۶. اندیس راحتی سفر در جهت عرضی

جدول ۴. معیار راحتی سفر اسپرلینگ

راحتی سفر	اندیس راحتی سفر
خیلی خوب	۱
خوب	۲
راضی	۳
کاملاً راضی	۴

## ۵- نتیجه گیری

نرم افزارهایی چون UM با توان مدل‌سازی چرخ و ریل و ناوگان ریلی ابزاری آسان برای کاهش هزینه‌های آزمایشی شبیه سازی ناوگان ریلی می‌باشند. نرم افزار UM قابلیت ارتباط بیش‌تری با نرم‌افزارهای گرافیکی را دارند. با استفاده از نرم‌افزار ذکر شده مشخصات دینامیکی واگن استخراج شده است. با توجه به اینکه سیستم تعلیق اولیه و ثانویه بوژی مترو نسبت به دیگر سیستم‌های تعلیق رایج در ایران متفاوت است، مقدار سرعت بحرانی ناوگان مسافری استخراج شده است. با توجه به استخراج سرعت بحرانی به دست آمده مقدار سرعت ایمن بهره برداری این واگن مشخص می‌شود. همچنین شاخص راحتی سفر ناوگان مسافری بر اساس محاسبات استخراج می‌گردد تا بتوان ارزیابی بر راحتی سفر ناوگان مترو داشت. طبق محاسبات صورت گرفته مقدار راحتی سفر واگن مترو در محدوده‌ی مجاز قرار داشته و باعث حصول خستگی برای مسافر

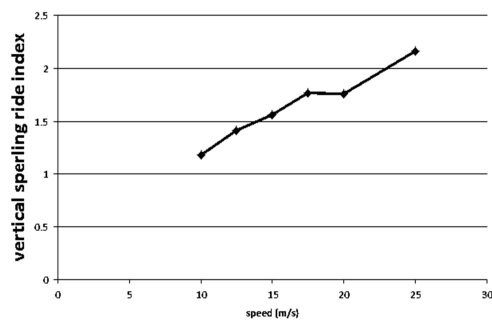
تابع وزن دهی فرکانس مورد بررسی در اندیس راحتی سفر طوری بدست آمده است که ضریب اثر دهی فرکانس آن در فرکانس‌های ۳ الی ۷ هرتز بر روی مسافر بیش تر است. تابع ضریب اثردهی وزن دهی طبق معادله ی زیر مشهود است (Kumaret al, 2017). مقدار ضریب  $k=0.73$  در جهت عرضی و  $k=0.58$  در جهت عمودی می باشد.

$$B(f) = k \left[ \frac{1.91f^2 + (0.25f^2)}{(1-0.27f^2)^2 + (1.56f - 0.036f^3)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

با توجه به خروجی استخراج شده از شبیه‌سازی دینامیکی واگن، شتاب‌های خروجی بر روی بدنه طبق شکل‌های ۱۴ و ۱۵ در جهت عرضی و در جهت عمودی موجود است. با مینا قراردادن فرمول بالا مقدار اندیس راحتی سفر طبق فرمول زیر به دست می‌آید.

$$W_z = 4.42 \cdot (a^{wms})^{0.3} \quad (7)$$

در فرمول بالا  $a^{wms}$  بیانگر جذر میانگین مربعات شتاب فیلتر شده بر اساس فرکانس می‌باشد. حال با توجه به محاسبات انجام شده در نرم افزار UM مقدار اندیس راحتی سفر در جهت عمودی برای واگن مترو در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه برابر با ۱/۵۵ بدست آمده شده است.



شکل ۱۵. اندیس راحتی سفر در جهت عمودی

مقدار اندیس راحتی سفر در جهت عرضی برای واگن مترو در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه در برابر با ۱,۳ بدست آمده است. شکل نمودار راحتی سفر در جهت عرضی در شکل زیر مشهود است. با استفاده از فنر هوایی با توجه به خاصیت تنظیم ارتفاع نه تنها عملکرد خاصیت ذکر شده تامین گردیده است بلکه باعث حصول راحتی سفر در جهت عمودی و ارزی در حد مطلوبی شده است. طبق شاخص بیان شده توسط آقای گاندرهان و همکارانشان مقدار شاخص‌های به

-Changchun Car Company rolling stock technical manual, (CRC).

-Garg, K., Dukkipati, K., (1984), "dynamics of railway vehicle systems", academic press.

-Kumar, V., Rastogi, V. and Pathak, M., (2017), "Simulation for whole-body vibration to assess ride comfort of a low-medium speed railway vehicle", Transactions of the Society for Modeling and Simulation International. Vol. 93, Issue 3.

-ORE reports C116/RP 1-9 /EC 1971-1978, (1978), "Interaction between Vehicle and Track. ORE, Utrecht.

-Polach, O., (2006), "On non-linear methods of bogie stability assessment using computer simulations", J. Rail and Rapid Transit, Vol. 220, Issue 1.

-Presthus, M., (2002), "Derivation of air spring model parameters for train simulation," Master's Thesis, Department of applied physics and mechanical engineering, Division of fluid mechanics, LULEA University.

-Sadeghi, J., Esmaeili, M., Shadfar, M. and Ashari Ghomi, M., (2014), "Influences of Railway Track Geometry Parameters on Ground-Borne Vibration International Journal of Railway Research, Vol.1, No.1, pp.11-18.

نخواهد شد. به علت وجود سفتی سیستم تعلیق اولیه‌ی بیش‌تر در بوژی مترو به خاطر عبور از قوس‌های با شعاع کمتر این بوژی توانایی بیش‌تری در کنترل ناپایداری‌ها دارد.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

1. Nishimura
2. Kalker Coefficient
3. Sperling

## ۷-مراجع

- ملاطفی، ح. و حاصلیان، ا.، (۱۳۹۲)، "بررسی اثرات انعطاف‌پذیری بدنه بر رفتار دینامیکی واگن مترو"، سومین کنفرانس بین‌المللی پیشرفت‌های اخیر در مهندسی راه‌آهن، تهران.

-Ansari, M., Hazrati, A., Esmailzadeh, E. and Azadi, S., (2008), "Wear rate estimation of train wheels using dynamic simulations and field measurements". Vehicle System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility Vol. 46, Issue 8.

-Berbyuk, V. and Enelund, M., (2010), "Pareto optimization of railway bogie suspension damping to enhance safety and comfort", Vehicle System Dynamics International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility Vol. 50, Issue 9.



# Tehran Subway Rolling Stock Dynamic Analysis

*Asghar Nasr, Assistant Professor, Faculty of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Mohammad Mahdi Naseri Taheri, M.Sc., Grad., Faculty of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Asghar Nasr, Assistant Professor, Faculty of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*E-mail: naseri71@alumni.iust.ac.ir*

Received: November 2019-Accepted: February 2020

## **ABSTRACT**

In this article with simulation of Tehran subway second type rolling stock, dynamic performance of this train has been studied. Dynamic simulation of Tehran subway has been simulated in UM (universal mechanism) package. At first train bogie parts has been drawn in 3D software package Solid works and moment of inertia and mass of each part has been extracted. In Solid works software the bogie part has been attached and complete model of bogie imported to Dynamic simulation software. In Dynamic simulation of Tehran subway rolling stock, primary and secondary suspensions were differ from conventional bogies that has been used in Iranian railway and simulation should be done exactly. After this work dynamic simulation has been done for hunting speed of wagon and acceleration of wagon body has been obtained in vertical and lateral directions. with the result that has been extracted from dynamic performance of train, the effect of hunting speed on lateral wheelset lateral displacement and angle of attack in left wheel of first wheelset has been comprised .ride index criteria for calculation of Tehran subway has been explained .for simulation of train, track irregularity inputted in UM software for ride index has been calculated in lateral and vertical directions. According to secondary suspension of Tehran subway train body acceleration and ride comfort of this train simulated. According to ride comfort result of this train , the result of Tehran subway rolling stock has been compared with standard value.

**Keywords:** Subway , Wagon , Bogie , Hunting