

## تحلیل ارتعاشات واگن و بررسی تأثیر ناهمواریهای خط بر راحتی سفر

جعفر عبادی رجلی (مسئول مکاتبات)، دانش آموزخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

حبیب الله ملاطفی، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: jafarebadi@aut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۱۸ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۰۷

### چکیده

هدف این مقاله تحلیل راحتی سفر وسیله نقلیه ریلی در مسیر مستقیم به وسیله روشهای EN و UIC است. برای نیل به این هدف مدل دینامیکی ۹ درجه آزادی راحتی سفر واگن شرح داده شده است. مدل دینامیکی راحتی سفر واگن الگوی ERRI در نرم افزار SIMULINK برای ناهمواریهای خط کلاسهای ۳ و ۶ خطوط ریلی آمریکا شبیه سازی شد. پاسخ دینامیکی واگن برای معادیر مختلف شتابهای طولی شروع حرکت به دست آمد و سپس شاخص راحتی سفر در نرم افزار MATLAB محاسبه شد. نتایج نشان می دهد که افزایش شتاب شروع حرکت باعث افزایش شاخص راحتی سفر (بدتر شدن شرایط)، بویژه در مسافر ایستاده می شود. در ضمن عدد شاخص راحتی سفر برای نقطه B (گوشه اتاقک) نسبت به نقطه A (وسط اتاقک) بیشتر (بدتر) است و این اختلاف در خط با کیفیت بد بسیار محسوس است. دلیل این امر این است که شتابهای ناشی از چرخش اتاقک حول محورهای طولی و عرضی در نقطه B نسبت به نقطه A بسیار بیشتر است. در ضمن محاسبه شاخص راحتی سفر از روش استاندارد به طور قابل توجهی معادیر عددی کمتری (سواری بهتر) را نسبت به روش کامل برای مسافر ایستاده و با شتابهای یکسان به دست می دهد، بنابراین جهت ارزیابی راحتی واگنهای مترو، روش کامل باید مد نظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: ارتعاشات اتاقک، شاخص راحتی سفر، ناهمواری خط، معیارهای راحتی سفر

## ۱. مقدمه

[۱۳۸۵] به بهینه‌سازی سیستم تعلیق خودرو به کمک الگوریتم ژنتیک پرداختند. آنها از مدل دو درجه آزادی برای تحلیل ارتعاشات خودرو استفاده کردند و با صرف نظر کردن از تأثیر شتابهای طولی و عرضی به کاهش مقدار متوسط شتابهای قائم (بدون محاسبه شاخص راحتی سفر) پرداختند.

در این مقاله به شرح روشی برای بیان کمی تأثیر ناهمواریهای خط بر ارتعاشات اطاقک و تحلیل این ارتعاشات به کمک معیارهای بررسی راحتی سفر پرداخته می‌شود. همه افراد فوق از معیار اسپرلینگ برای بررسی راحتی سفر استفاده کردند. در مدل اسپرلینگ شاخص راحتی سفر عمودی و افقی جداگانه در نظر گرفته می‌شود و دو شاخص جداگانه راحتی سفر عمودی و افقی ارائه می‌کند [He and Li, 2014]. در روش بکار گرفته شده در این مقاله، تأثیر متقابل شتابهای طولی و عرضی بر راحتی سفر در یک شاخص در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه ارتعاشات حول محور طولی اطاقک واگن و بوژیها نیز شبیه‌سازی شده و بنابراین تأثیر تفاوت ناهمواری سطح زیر چرخهای سمت راست و چپ و سیل نقلیه بر راحتی سفر در نظر گرفته شده است. برای این کار پس از شبیه‌سازی حرکت اطاقک در مسیر مستقیم دارای ناهمواری عمودی و یافتن پاسخ دینامیکی اطاقک، شاخص راحتی سفر با دو روش ارائه شده در استاندارد EN [EN Code 12299, 2006] محاسبه می‌شود. در ضمن روشی که UIC [UIC Code 513, 1994] برای محاسبه شاخص راحتی سفر ارائه می‌دهد، مشابه روش EN-12299 است.

## ۲. شبیه‌سازی دینامیک حرکت واگن

در این مقاله برای شبیه‌سازی دینامیک حرکت واگن، ابتدا معادلات حرکت برای سیستم ۹ درجه آزادی (۳ درجه آزادی برای اطاقک و ۳ درجه آزادی برای هر یک از دو بوژی، شامل حرکت عمودی و چرخش حول محور طولی و عرضی) نوشته شد. با در نظر گرفتن ناهمواریهای خط به عنوان ورودی، دستگاه معادلات دیفرانسیل در SIMULINK حل شد و شتاب نقاط مورد نظر از واگنی که با پروفیل سرعتهای مختلف در مسیر مستقیم در حرکت است بدست

راحتی مسافر در حین حرکت از عوامل مختلفی شامل ارتعاش، صدا، ویژگیهای صندلی و غیره تأثیر می‌پذیرد. اما در معیارهای دینامیکی بررسی راحتی سفر فقط بخشی از راحتی که از ارتعاشات حرکت وسیله نقلیه تأثیر می‌پذیرد در نظر گرفته می‌شوند. واگن‌های مسافری معمولاً از یک اطاقک (یا کابین) و دو (یا سه) بوژی تشکیل شده‌اند. در راه آهن، اثرگذارترین عوامل در راحتی سفر، سیستم تعلیق مابین اطاقک و بوژی و سیستم تعلیق مابین بوژی و محور چرخها هستند و اثرگذاری انعطاف‌پذیری سازه اطاقک و بوژیها بسیار کمتر از اثرگذاری سیستمهای تعلیق هستند. همچنین چرخها به دلیل فلزی بودن، تقریباً صلب (در مقایسه با سیستم تعلیق) هستند.

افراد مختلفی به مطالعه ارتعاشات وسایل نقلیه و راحتی سفر پرداخته‌اند که در ادامه به گزیده‌ای از آنها اشاره می‌شود.

یونسیان و همکارانش [Younesian and Nankali, 2009, Farah] در تحقیقاتشان به بهینه‌سازی و بررسی عمر سیستم تعلیق واگن، با در نظر گرفتن راحتی سفر به عنوان عامل محدود کننده پرداختند. گانگادهاران و همکارانش نیز تحقیقاتی درباره ارزیابی تحلیلی و آزمایشگاهی راحتی سفر انجام دادند [Gangadharan, Sujatha and Ram amurti, 2004]. گرگا و کلاچیک [Goga and Klůčik 2012] به بهینه‌سازی سیستم تعلیق وسیله نقلیه با استفاده از مدل ۴ درجه آزادی پرداختند. آنها از ارتعاشات حول محور طولی بدنه وسیله نقلیه صرف‌نظر کردند. گونگ و همکارانش [Gong et al. 2012] به تحلیل ارتعاشات عمودی واگن - با هدف مطالعه راحتی سفر و فرکانسهای طبیعی - پرداختند. آنها از مدلی انعطاف پذیر برای اطاقک واگن استفاده کردند و از ارتعاشات حول محور طولی اطاقک واگن و بوژیها صرف‌نظر کردند. سان و همکارانش [Sun et al. 2011] به بررسی تأثیر سیستم تعلیق اطاقک واگن بر روی راحتی سفر قطارهای پرسرعت پرداختند. سوآرز و همکارانش [Suarez et al. 2013] [Suarez et al. 2013] به تحلیل تأثیر متقابل کیفیت خط، ویژگیهای تماسی چرخ و ریل و ویژگیهای الاستیک سیستم تعلیق قطار بر روی ایمنی، راحتی سفر و خستگی ریل پرداختند. علیزاده و همکارانش [علیزاده و همکاران،

## تحلیل ارتعاشات واگن و بررسی تأثیر ناهمواریهای خط بر راحتی سفر

## ۲-۱ مشخصات فنی اتاقک و بوژی

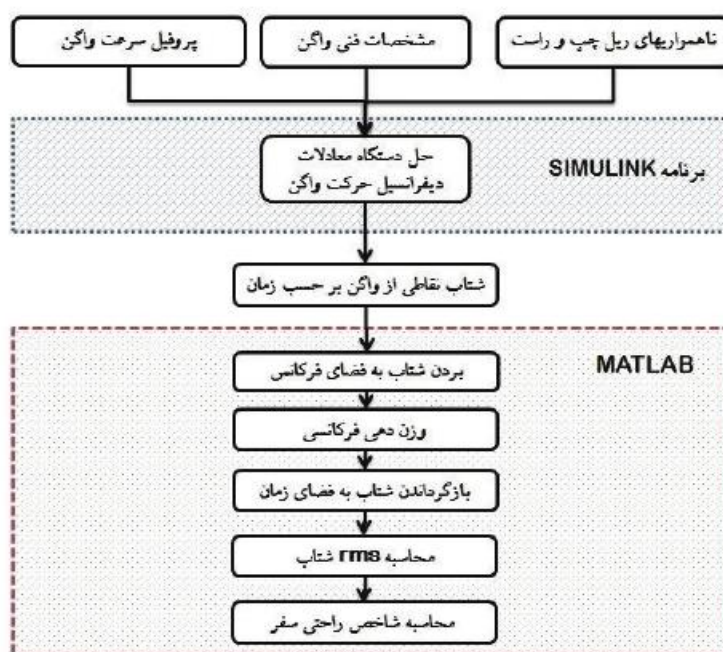
در این مقاله از مشخصات اتاقک و بوژی وسیله نقلیه الگوری ERRI B176 [Manchester Benchmarks, 1998]، استفاده شده است.

مطابق شکل (۲)، a فاصله طولی بین مراکز بوژی و اتاقک، 2b فاصله بین مراکز دو چرخ یک بوژی، c فاصله عرضی فنر دمپرها، d فاصله عرضی فنرهای تعلیق ثانویه تا مرکز بوژی و e فاصله عرضی دمپرها تا مرکز بوژی است. در جداول ۱ و ۲ مشخصات فنی واگن آمده است.

اندیس ۱ به اتاقک و اندیس ۲ به بوژی اشاره دارد، m جرم،  $\dot{z}$  ممان اینرسی حول محور طولی،  $\dot{z}$  ممان اینرسی حول محور عرضی و k ضریب سختی فنر است.

آمد. در نرم‌افزار MATLAB نیز برنامه‌ای نوشته شد که به محاسبه شاخص راحتی سفر می‌پردازد. همانطور که گفته شد در شبیه‌سازی صورت گرفته در این مقاله حرکت‌های قائم و چرخش حول محورهای طولی و عرضی در نظر گرفته شده و چرخش حول محور عمودی در نظر گرفته نشده است. در ضمن فقط فنرها و دمپرها قائم در نظر گرفته شده‌اند و فرض شده عمل نیروهای فنرها و دمپرها در راستای قائم باقی می‌ماند. در ضمن فرض شده که چرخها صلب بوده و از روی ریل بلند نمی‌شوند و در نتیجه ناهمواری خط عیناً به چرخها منتقل می‌شوند. فرضهای صورت گرفته برای بررسی راحتی سفر متداول بوده و از دقت بررسی نمی‌کاهند.

در شکل (۱) فلوچارت روند ارائه شده در این مقاله برای محاسبه شاخص راحتی سفر نشان داده شده است.



شکل ۱. روند محاسبه شاخص راحتی سفر

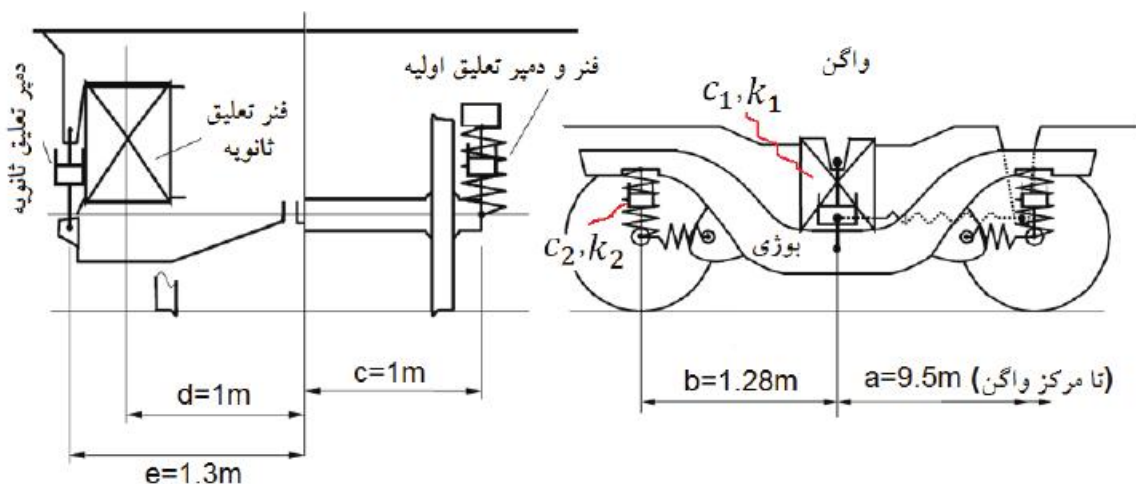
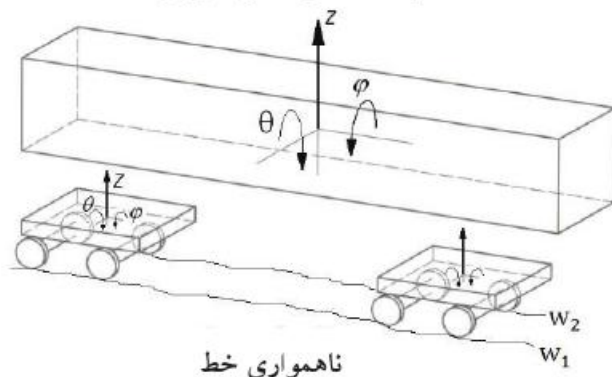
جدول ۱ - مقادیر جرمها و ممانهای اینرسی [Manchester Benchmarks, 1998]

$m_1$ (kg)	$m_2$ (kg)	$j_{r1}$ (kg.m <sup>2</sup> )	$j_{r2}$ (kg.m <sup>2</sup> )	$j_{p1}$ (kg.m <sup>2</sup> )	$j_{p2}$ (kg.m <sup>2</sup> )
32000	2615	56800	1467	1970000	1722

جدول ۲ - مشخصات سیستم تعلیق [Manchester Benchmarks, 1998]

$c_1$ (kN.s/m <sup>2</sup> )	$c_2$ (kN.s/m <sup>2</sup> )	$k_1$ (kN/m)	$k_2$ (kN/m)
20	4	430	1220

درجات آزادی واگن و بوژی



شکل ۳. وسیله نقلیه الگوی ERRI B176 و نمای روبرو و نمای از کنار بوژی [Manchester Benchmarks, 1998]

معادله حرکت قائم بوژی عقب:

$$m_2 \ddot{y}_3 = -k_2' \ddot{e} 4y_3 + w_1(t+t_2) + \dots \quad (3)$$

$$w_1(t+t_3) + w_2(t+t_2) + w_2(t+t_3) \dot{u} \\ - c_2' \ddot{e} 4y_3 + w_1(t+t_2) + w_1(t+t_3) + \\ w_2(t+t_2) + w_2(t+t_3) \dot{u} \\ + k_1' [2y_1 - 2y_3 - 2aq_1] + \\ c_1' [2\dot{y}_1 - 2\dot{y}_3 - 2a\dot{q}_1]$$

معادله حرکت چرخشی اطافک حول محور عرضی:

$$j_{P_1} \ddot{q}_1 = a' k_1' [2y_2 - 2y_3 - 4aq_1] \quad (4) \\ + a' c_1' [2\dot{y}_2 - 2\dot{y}_3 - 4a\dot{q}_1]$$

۲ ۲ معادلات دینامیکی واگن (اطافک و دو بوژی)

در این قسمت معادلات ارتعاشات حرکت اطافک و دو بوژی واگن آورده شده است.

معادله حرکت قائم اطافک:

$$m_1 \ddot{y}_1 = k_1' [-4y_1 + 2y_2 + 2y_3] + \dots \quad (1) \\ c_1' [-4\dot{y}_1 + 2\dot{y}_2 + 2\dot{y}_3]$$

معادله تخرکت قائم بوژی جلو:

$$m_2 \ddot{y}_2 = -k_2' \ddot{e} - 4y_2 + w_1(t) + w_1(t+t_1) \quad (2) \\ + w_2(t) + w_2(t+t_1) \dot{u} - c_2' \ddot{e} - 4\dot{y}_2 + w_1(t) + \\ w_1(t+t_1) + w_2(t) + w_2(t+t_1) \dot{u} + \\ k_1' [2y_1 - 2y_2 + 2aq_1] + c_1' [2\dot{y}_1 - 2\dot{y}_2 + 2a\dot{q}_1]$$

تحلیل ارتعاشات واگن و بررسی تأثیر ناهمواریهای خط بر راحتی سفر

ناهمواریهای خط از فضای فرکانسی خارج شده و بر حسب فاصله به عنوان ورودی به ریل چپ ( $w_2$ ) و ریل راست ( $w_1$ ) داده می‌شوند. ناهمواری ابتدا به چرخ اول وارد شده و سپس با تاخیر زمانی به ترتیب به چرخهای بعدی می‌رسند. که مقدار این تاخیرهای زمانی برابرند با:

$$t_1 = V/b; t_2 = V/a; t_3 = V/(a+b) \quad (11)$$

که  $\Omega_1 = 23 \times 10^3$ ,  $\Omega_2 = 13.1 \times 10^2$  و A برای خط کلاس ۶،  $10^8 \times 0.98$  و برای خط کلاس ۳،  $10^8 \times 4.92$  می‌باشد. V سرعت حرکت قطار است و مقادیر a و b هم که در بالا آورده شده است. در شکل زیر دامنه ناهمواری تولید شده برای خط کلاس ۶ مشاهده می‌شود. این دامنه ناهمواری بر حسب فاصله از ابتدای شروع خط بیان شده است.

دامنه ناهمواری برای خط کلاس ۳، در حدود ۸ میلیمتر و برای خط کلاس ۶، در حدود ۳/۵ میلیمتر است.

۳. محاسبه شاخص راحتی سفر

برای محاسبه شاخص راحتی سفر ابتدا در نقاطی که در استاندارد اشاره شده (در مرکز و دو انتهای اطاقک) شتاب در سه جهت ( $\ddot{x}^*$  و  $\ddot{y}^*$  و  $\ddot{z}^*$ ) در SIMULINK محاسبه شده و به عنوان ورودی به برنامه MATLAB داده می‌شود، سپس شتاب به فضای فرکانسی برده می‌شود. مقدار شتاب در فضای فرکانسی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A_{XP} = \text{fft}(\ddot{x}^*), \quad (12)$$

$$A_{YP} = \text{fft}(\ddot{y}^*)$$

$$A_{ZP} = \text{fft}(\ddot{z}^*)$$

در مرحله بعد وزن دهی ۱ فرکانسی صورت می‌گیرد:

$$A_{XP}^W = H(f)' A_{XP} \quad (13)$$

$A_{XP}^W$  مقدار شتاب وزن‌دهی شده در فضای فرکانسی می‌باشد. توجه کنید که باید از  $H(f)$  مربوط به  $W_i$  باید استفاده شود. که  $W_i$  به تابع وزن دهی فرکانسی طبق منحنی وزن دهی i اشاره دارد (i=b,c,d) (b: جهت عمودی (تکیه‌گاه)، c: جهت طولی، d: جهت طولی/عرضی)

معادله حرکت چرخشی بزرگی جلو حول محور عرضی:

$$j_{p_2} \ddot{q}_2 = bk_1' \dot{\xi} - 4bq_2 - w_1(t) - w_2(t) \quad (5)$$

$$+ w_1(t+t_1) + w_2(t+t_1) \ddot{\xi} + bc_2' [-4b\dot{q}_2 - w_2(t) + w_1(t+t_1) + w_2(t+t_1)]$$

معادله حرکت چرخشی بزرگی عقب حول محور عرضی:

$$j_{p_2} \ddot{q}_3 = bk_2' \dot{\xi} - 4bq_3 - w_1(t+t_2) - w_2(t+t_2) + w_1(t+t_3) + w_2(t+t_3) \ddot{\xi} + bc_2' [-4b\dot{q}_3 - w_1(t+t_2) - w_2(t+t_2) + w_1(t+t_3) + w_2(t+t_3)] \quad (6)$$

معادله حرکت چرخشی اطاقک حول محور طولی:

$$j_{r_1} \ddot{j}_1 = -4k_1 d^2 j_1 - 4c_1 e^2 j_1' \quad (7)$$

معادله حرکت چرخشی بزرگی جلو حول محور طولی:

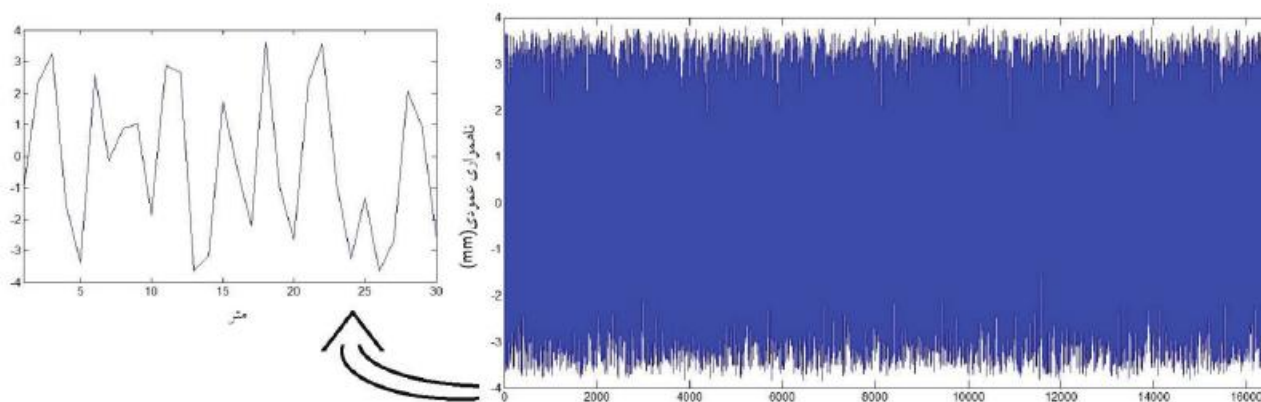
$$j_{r_1} \ddot{j}_2 = ck_2' [-4cj_2 + w_2(t) + w_2(t+t_1) - w_1(t) - w_1(t+t_1)] + cc_2' [-4cj_2 + w_2(t) + w_2(t+t_1) - w_1(t) - w_1(t+t_1)] + 2k_1 d^2 j_1 + 2c_1 e^2 j_1' \quad (8)$$

معادله حرکت چرخشی بزرگی عقب حول محور طولی:

$$j_{r_1} \ddot{j}_2 = ck_2' [-4cj_3 + w_2(t+t_2) + w_2(t+t_3) - w_1(t+t_2) - w_1(t+t_3)] + cc_2' [-4cj_3 + w_2(t+t_2) + w_2(t+t_3) - w_1(t+t_2) - w_1(t+t_3)] + 2k_1 d^2 j_1 + 2c_1 e^2 j_1' \quad (9)$$

برای شبیه سازی ناهمواریهای خط از تابع PSD زیر استفاده شده است که برای کلاسهای ۱ تا ۶ خط راه آهن آمریکا ارائه شده است [Fryba, 1996].

$$G(W) = \frac{A W_2^2 (W^2 + W_2^2)}{W^2 (W^2 + W_2^2)} \quad (10)$$



شکل ۳. ناهمواری خط کلاس ۶، خط با کیفیت خوب

۳ ۱ روابط EN و UIC برای محاسبه شاخص راحتی سفر استاندارد EN [EN Code 12299, 2006] برای ارزیابی متوسط راحتی، با در نظر گرفتن تأثیر شتابها در کف اتاقک، دو رابطه دارد، یکی روش استاندارد ( $N_{MV}$ ) و دیگری روش کامل برای مسافر ایستاده ( $N_{VD}$ ) که در این مقاله نتایج این دو روش با هم مقایسه می شود. در ضمن استاندارد UIC [UIC Code 513, 1994] نیز عیناً همین روابط را ارائه می دهد.

$$N_{MV} = 6\sqrt{(a_{XP95}^W)^2 + (a_{YP95}^W)^2 + (a_{ZP95}^W)^2} \quad (16)$$

و

$$(17)$$

$$N_{VD} = 3\sqrt{16.(a_{XP50}^W)^2 + 4.(a_{YP50}^W)^2 + (a_{ZP50}^W)^2} + 5.(a_{YP95}^W)$$

که  $a_{XP95}^W$  صدک ۹۵ ام  $a_{XP}^W$  است. صدک ۹۵ ام تعداد مشخصی داده، مقداری است که ۹۵٪ از داده ها کمتر از آن مقدار هستند. به همین ترتیب  $a_{YP95}^W$  و  $a_{ZP95}^W$  هم به دست می آیند.

### ۳ ۲ توابع وزن دهی

راحتی انسان تا حد زیادی تحت تأثیر شتابهای وارده بر بدن و همچنین فرکانس ارتعاشی است که بدن درک می کند. تحقیقات نشان می دهد که بدن انسان فرکانسهای زیر ۵ هرتز و بالای ۱۰

مولفه های شتاب وزن دهی شده ( $\ddot{x}_{W_i}^*$  و  $\ddot{y}_{W_i}^*$  و  $\ddot{z}_{W_i}^*$ ) محاسبه می شود. تابع وزن دهی ( $H(f)$ ) وابسته به جهت شتاب و نقطه اندازه گیری شتاب (کف، تشک صندلی، پشت صندلی) است.

$$\ddot{x}_{W_i}^* = \text{ifft}(A_{XP}^W) \quad (14)$$

$$\ddot{y}_{W_i}^* = \text{ifft}(A_{YP}^W)$$

$$\ddot{z}_{W_i}^* = \text{ifft}(A_{ZP}^W)$$

$\ddot{x}_{W_i}^*$  مقدار شتاب وزن دهی شده در فضای زمان می باشد. سپس میانگین مربع مجذورات (rms) اندازه ی مولفه های شتاب وزن دهی شده در هر ۵ ثانیه محاسبه می شود. علامت  $\ddot{x}_{W_i}^*$  به شتاب خام و  $a$  به rms شتاب اشاره دارد:

$$a_{Xj}^W = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t |\ddot{x}_{W_i}^*(t)|^2 dt} \quad (15)$$

$$a_{Yj}^W = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t |\ddot{y}_{W_i}^*(t)|^2 dt}$$

$$a_{Zj}^W = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t |\ddot{z}_{W_i}^*(t)|^2 dt}$$

$T=5s$  و  $t$  مضربی از ۵s است و زبه موقعیت اندازه گیری شتاب اشاره دارد (P: سطح کف، A: سطح تشک صندلی، D: سطح پشت صندلی)

تحلیل ارتعاشات واگن و بررسی تأثیر ناهمواریهای خط بر راحتی سفر

جدول ۴. مقیاس ارزیابی شاخص راحتی متوسط  $N_{MV}$  در استاندارد EN [EN Code 12299, 2006]

$N_{MV} < 1.5$	بسیار راحت
$1.5 \leq N_{MV} < 2.5$	راحت
$2.5 \leq N_{MV} < 3.5$	متوسط
$3.5 \leq N_{MV} < 4.5$	ناخوشایند
$4.5 \leq N_{MV}$	بسیار ناخوشایند

جدول ۵. مقیاس ارزیابی شاخص راحتی بر اساس استاندارد UIC [UIC Code 513, 1994]

$N < 1$	بسیار راحت
$1 \leq N < 2$	راحت
$2 \leq N < 4$	متوسط
$4 \leq N < 5$	ناخوشایند
$5 \leq N$	بسیار ناخوشایند

۵. نتایج

در این قسمت نتایج محاسبه شاخص راحتی سفر برای نقاط A (مرکز اطاقک) و B (گوشه اطاقک) بر طبق روش استاندارد  $(N_{MV})$  و روش کامل برای مسافر ایستاده  $(N_{VD})$  آورده شده است. شاخص راحتی سفر برای کلاس خط ۳ و ۶ راه آهن آمریکا و حالات مختلف حرکت اطاقک محاسبه شده است. این حالات عبارتند از حرکت اطاقک با شتاب ثابت (شتابهای ثابت مختلف) تا حداکثر سرعت مجازش و سپس ادامه حرکت با سرعت ثابت. شتابهای شروع حرکت که به ازای آنها شبیه سازی انجام شده عبارتند از 0.3، 0.5، 0.7، 0.9 و 1.1 متر بر مجذور ثانیه. در استاندارد گفته شده که کل زمان

جدول ۳. پارامترهای استفاده شده در توابع وزن دهی [EN Code 12299, 2006]

تابع وزن دهی	$f_1(\text{Hz})$	$f_2(\text{Hz})$	$Q_1$	$f_3(\text{Hz})$	$f_4(\text{Hz})$	$Q_2$	$f_5(\text{Hz})$	$f_6(\text{Hz})$	$Q_3$	$Q_4$	$K$
$W_b$	0.4	100	$1/\sqrt{2}$	16	16	0.63	2.5	4	0.8	0.8	0.4
$W_c$	0.4	100	$1/\sqrt{2}$	8	8	0.63	-	-	-	-	1
$W_d$	0.4	100	$1/\sqrt{2}$	2	2	0.63	-	-	-	-	1

هرگز را بهتر تحمل می کند، از این رو توابع وزن دهی نوشته شده اند که شتابهای با فرکانسهای ذکر شده را فیلتر می کند و بنابراین در تحلیل ارتعاشات فقط فرکانسهایی در نظر گرفته می شوند که تأثیر مخرب بر راحتی انسان دارند.

تابع وزن دهی کلی برای  $W_b$  برابر با:

$$H(f) = H_h(f)' H_i(f)' H_t(f)' H_s(f) \quad (18)$$

و برای  $W_c$  و  $W_d$  برابرست با:

$$H(f) = H_h(f)' H_i(f)' H_t(f) \quad (19)$$

که

$$(20 \text{ و } 21)$$

$$H_h(f) = \frac{1}{1 - \frac{f_1^2}{f^2} - i \frac{f_1}{Q_1 f}}$$

$$H_i(f) = \frac{1}{1 - \frac{f^2}{f_2^2} + i \frac{f}{Q_2 f_2}}$$

و

$$(22 \text{ و } 23)$$

$$H_t(f) = \frac{1 + i \frac{f}{f_3} K}{1 - \frac{f^2}{f_4^2} + i \frac{f}{Q_4 f_4}}$$

$$H_s(f) = \frac{1 - \frac{f^2}{f_5^2} + i \frac{f}{Q_5 f_5}}{1 - \frac{f^2}{f_6^2} + i \frac{f}{Q_6 f_6}}$$

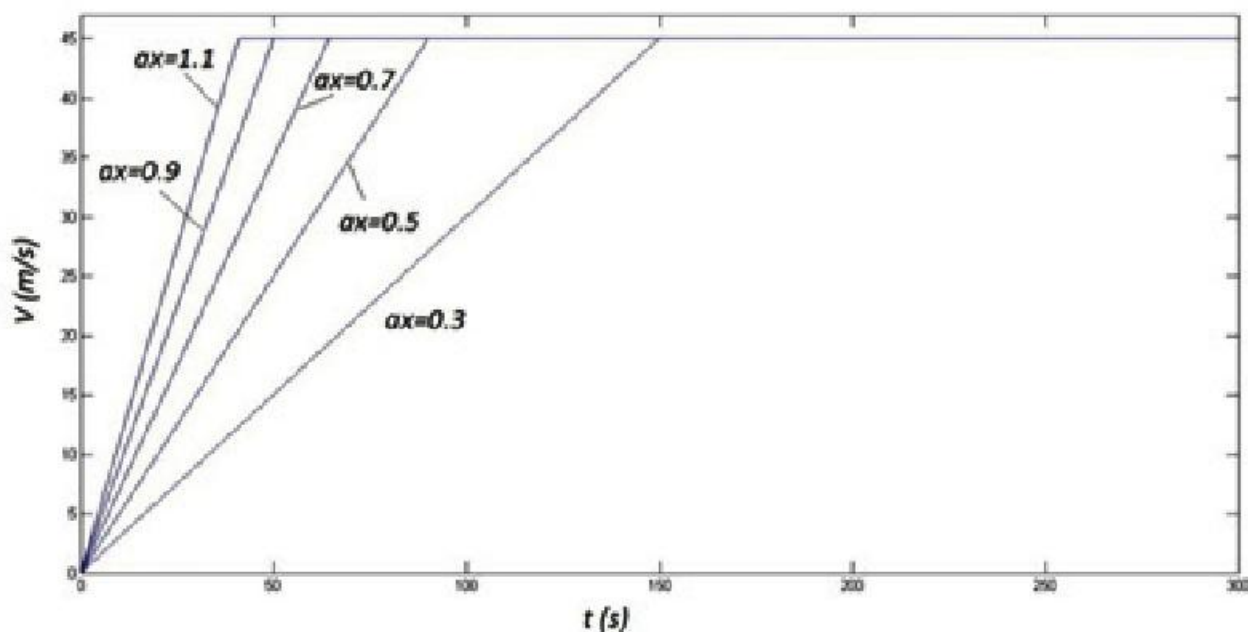
۴. تفسیر نتایج

جداول ۴ و ۵ معیارهایی برای ارزیابی راحتی سفر بر اساس استانداردهای EN و UIC به دست می دهند.

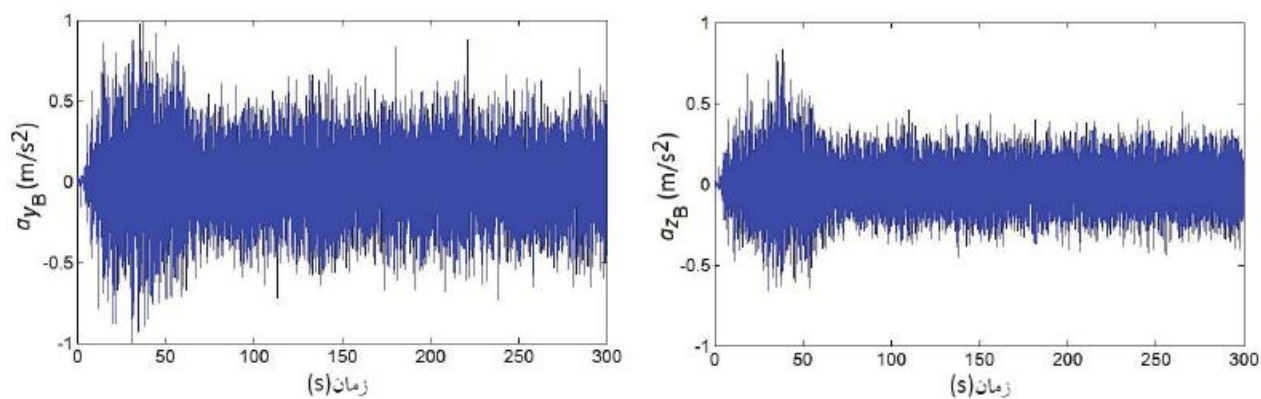
مورد استفاده قرار داد زیرا تنها دامنه شتاب نیست که بر روی راحتی سفر موثر است بلکه عامل مهم‌تر، فرکانس شتاب وارده به بدن انسان است، همان‌طور که در قسمت ۲-۳ نیز گفته شد بدن انسان نسبت به بعضی فرکانسهای شتاب حساس‌تر است. بنابراین شتابهای به‌دست آمده را باید به فضای زمان برده و پس از وزن دهی فرکانسی و بازگرداندن شتابها به فضای زمان، از آنها برای محاسبه شاخص راحتی سفر استفاده می‌کنیم. در ادامه نتایج محاسبه شاخص راحتی سفر برای نقاط A و B مشاهده می‌شود.

اندازه گیری شتاب باید ۳۰۰ ثانیه باشد، بنابراین شبیه سازی در همین مدت انجام شده است. در شکل ۴ پروفیل سرعتهای مختلفی که شبیه‌سازی به ازای آنها انجام شده است مشاهده می‌شود.

در ادامه، منحنی‌های شتاب نقطه B در فضای زمان و فرکانس برای کلاس خط ۳ و شتاب شروع حرکت ۰.۵ مشاهده می‌شود. این شتابها از حل دستگاه معادلات دیفرانسیل حرکت واگن به‌دست آمدند. از آنجا که این شتابها بر حسب زمان هستند نمی‌توان آنها را برای تحلیل کمی ارتعاشات خط مستقیماً



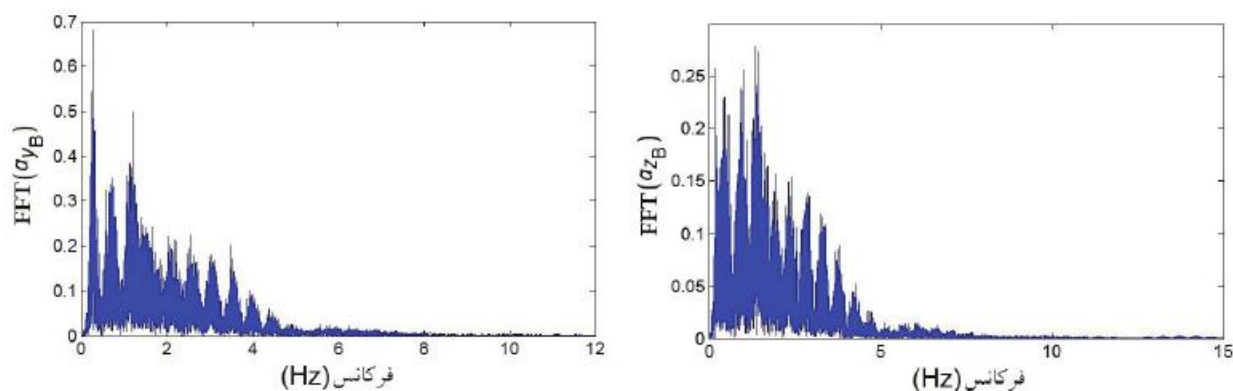
شکل ۴. پروفیل سرعت اطلاق به ازای شتابهای مختلف شروع حرکت



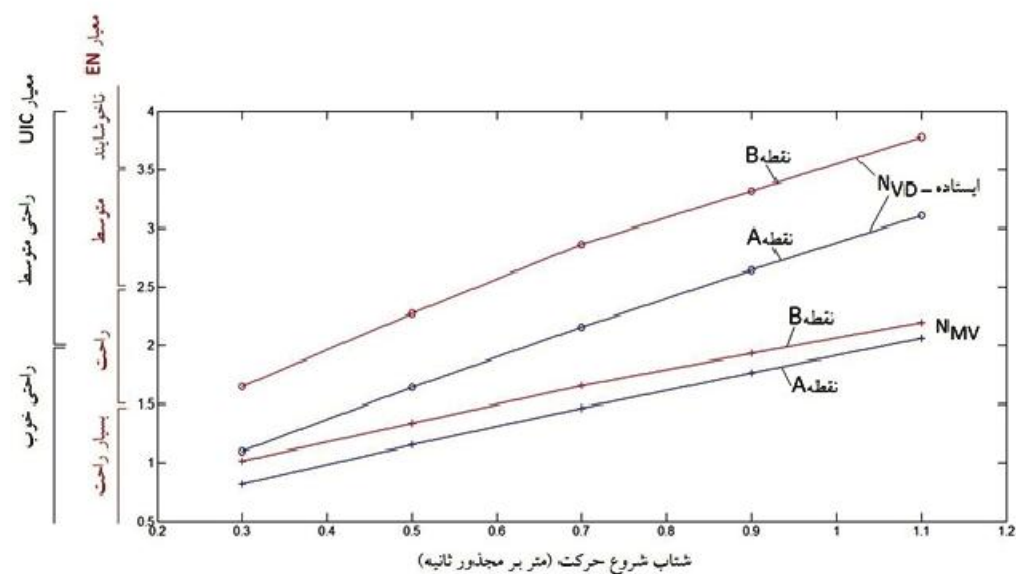
شکل ۵. شتاب نقطه B در جهات عرضی و عمودی بر حسب زمان، کلاس خط ۳، شتاب شروع حرکت ۰.۵ متر بر مجذور ثانیه



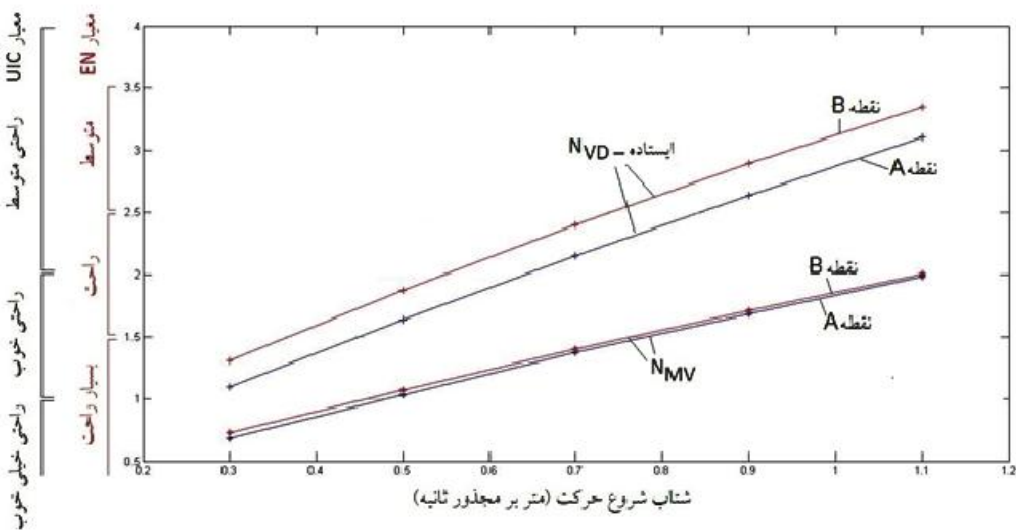
تحلیل ارتعاشات واگن و بررسی تأثیر ناهمواریهای خط بر راحتی سفر



شکل ۶. شتاب نقطه B در جهات عرضی و عمودی در فضای فرکانسی، کلاس خط ۳، شتاب شروع حرکت 0.5 متر بر مجذور ثانیه



شکل ۷. شاخص راحتی سفر برای کلاس خط ۳



شکل ۸. شاخص راحتی سفر برای کلاس خط ۶

- EN 12299, European Standard. (2006) "Railway applications - Ride comfort for passengers - Measurement and evaluation", English Version, July 2006

- Farahpour, H., Younesian, D. and Esmailzadeh, E. (2006) "Ride quality of high-speed trains traveling over the corrugated rails", ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers, pp. 145-152.

- Fryba, Ladislav (1996) "Dynamics of railway bridge", Academia Praha.

- Gangadharan, K. V., Sujatha, C. and Ramamurti, V. (2004) "experimental and analytical ride comfort evaluation of a railway coach", Conference & Exposition On Structural Dynamics, IMAC-XXII 2004

- Goga, V. and Klůčik, M. (2012) "Optimization of vehicle suspension parameters with use of evolutionary computation", Procedia Engineering, Vol. 48, pp. 174-179.

- Gong, D., Sun, W., Jinsong, Z. and Xiaobo, X. (2011) "Analysis on the vertical coupled vibration between bogies and metro car body", Procedia Engineering, Vol. 16, pp. 825-831.

- He, Y. and Li Z. (2014) "Analysis of the influence of track quality for new and existing urban railway lines on train operation", Computers in Railways XIV: Railway Engineering Design and Optimization. pp.135- 291

- ISO 2631-1. (1997) "International Standard, 2nd edition, Mechanical vibration and shock, Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General requirements", ISO.

- Sun, X., Chu, Y., Jiuchen, F. and Qiuxiao, Y. (2012) "Research of simulation on the effect of suspension damping on vehicle ride", Energy Procedia, Vol. 17A, pp. 145-151

- Suarez, B and Felez, J. (2013) "Influence of the track quality and of the properties of the wheel-rail rolling contact on vehicle dynamics." Vehicle System Dynamics, Vol. 51, No. 2, pp. 301-320.

## ۶. نتیجه گیری

شاخص راحتی روش استاندارد ( $N_{MV}$ ) مقادیر کمتری (بهتر) نسبت به روش کامل برای مسافر ایستاده ( $N_{VP}$ ) نشان می‌دهد و این به دلیل این است که در رابطه  $N_{MV}$  مسافر ایستاده مد نظر قرار نگرفته است. بنابراین در متروها که مسافران ایستاده بسیار بیشتر از قطارهای بین شهری هستند، باید شاخص راحتی برای مسافر ایستاده ( $N_{VP}$ ) در نظر گرفته شود. در ضمن در قطارهای بین شهری مدل‌های راحتی سفر که تأثیر مدت زمان حرکت را در نظر می‌گیرند نیز باید استفاده شوند [ISO Code 2631-1. 1997].

شاخص راحتی سفر نقطه B (گوشه اطاقک) نسبت به نقطه A (وسط اطاقک) بیشتر (بدتر) است و این به خاطر این است که تأثیر شتابهای ناشی از چرخش اطاقک حول محورهای طولی و عرضی در نقطه B نسبت به نقطه A بسیار بیشتر است. هر چند در خط کلاس ۶ (بهترین کیفیت خط)، برای مسافر نشسته شاخص راحتی سفر برای هر دو نقطه تقریباً یکسان است و برای مسافر ایستاده نیز اختلاف زیادی بین این دو نقطه مشاهده نمی‌شود. اما در کلاس خط ۳ این اختلاف خصوصاً برای مسافر ایستاده بسیار محسوس‌تر است.

در انتها، نتایج نشان می‌دهند که شتاب شروع حرکت تأثیر زیادی بر شاخصهای راحتی سفر دارند و با افزایش شتاب شروع حرکت شاخص راحتی سفر بیشتر می‌شود (شرایط بدتر می‌شود). افزایش شتاب شروع حرکت خصوصاً برای مسافر ایستاده اثر مخرب بسیار بیشتری دارد.

## ۷. پی‌نوشت‌ها

1. Weighting
2. 95<sup>th</sup> percentile of  $a_{XP}^W$

## ۸. مراجع

- علیزاده، قاسم، وکیل باغمیشه، محمد تقی، میرزایی، مهدی و حسن‌نژاد، رضا (۱۳۸۵) "استفاده از الگوریتم ژنتیکی برای بهینه‌سازی سیستم تعلیق غیرفعال خودرو تحت اثر تحریکات اتفاقی جاده"، چهاردهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک، اردیبهشت ۱۳۸۵، دانشگاه صنعتی اصفهان

تحلیل ارتعاشات واگن و بررسی تأثیر ناهمواریهای خط بر راحتی سفر

- Suarez, B., Mera, J. M., Martinez, M. L. and Chover, J. A. (2013) "Assessment of the influence of the elastic properties of rail vehicle suspensions on safety, ride quality and track fatigue", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 51, No. 2, pp. 280-300.

- The Manchester Benchmarks for rail vehicle simulation (1998), Manchester Metropolitan University, March 1998

- UIC 513, International Union of Railways (1994) "Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicle", 1st edition, 1.7.1994

- Younesian, D. and Nankali, A. (2009) "Spectral Optimization of the Suspension System of High-speed Trains." *Int. J. Vehicle Structures & Systems*, Vol. 1, No. 4, pp. 98-103.