توسعه یک روش جهت تحلیل ارتعاشی و ارتجاعی (عملکردی) سیستم جرم و فنر روسازی قطارهای سبک شهری*

سیدجواد میرمحمد صادقی، استادیار، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
ماهان یلداشخان، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
E-mail:javad_sadeghi@iust.ac.ir

چکیده:

استفاده از سیستم‌های جرم و فنر در روسازی راه‌آهن کاربردهای گسترده‌ای دارد. در تمامی مواردی که مشکلات و معضلات ارتعاشی ناشی از عبور قطار در مناطق مسکونی یا سایر مناطق حساس به ارتعاش مطرح می‌شود، طراحی سیستم روسازی حمل و نقل ریلی به صورت یک سیستم دینامیکی فنربندی شده (سیستم جرم و فنر) همواره به عنوان گزینه‌ای ارجح مطرح است. تحلیل سازه‌ای دال سیستم‌های جرم و فنر با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود رایج در مسایل تحلیل و طراحی سازه‌ها با دقت قابل قبولی امکان‌پذیر است. با این حال همواره بهره‌گیری از یک روش ساده و در عین حال دقیق آیین‌نامه‌ای جهت تحلیل ارتعاشی و ارتجاعی انواع سیستم‌های جرم و فنر روسازی موضوع بحث بوده است. افزون بر این ایجاد سازگاری بین معیارهای عملکردی و ارتعاشی روسازی بتنی خطوط ریلی در راستای نیل به خطی بادوام و پایدار، تحت نیروهای دینامیکی بهره‌برداری، موضوع حائز اهمیتی است که در طراحی سازه تمامی خطوط ریلی که در مناطق شهری و پرترافیک به ارائه خدمت می‌پردازند، باید مد نظر قرار گیرد.در این تحقیق روشی ساده و در عین حال کارآمد جهت تحلیل سیستم‌های جرم و فنر روسازی راه‌آهن ارایه می‌شود و کاربرد آن در تحلیل روسازی یک خط ریلی سبک شهری نشان داده می‌شود.

واژه های کلیدی: روسازی، LRT، جرم و فنر (MSS)، تحلیل، میرایی، ارتعاش، تغییرمکان، خط مدفون

۱. مقدمه

روسازی خطوط ریلی بسته به نوع کاربری دارای انواع بسیار متنوع است[1]. تمامی سیستم‌های روسازی خطوط ریلی خصوصاً خطوط بدون بالاست دارای دال بتنی به صورت جرم و فنر قابل طراحی است. در سیستم‌های جرم و فنر با بهره‌گیری از یک لایه ارتجاعی (معمولا از جنس لاستیک یا پلی‌اورتان) قسمتی از جرم سازه روسازی به صورت یک سیستم دینامیکی با جرم فنربندی شده طراحی می‌شود. المان فنری به صورت ریل پد، پد زینچه، پد تراورس، پد بالاست و لایه ارتجاعی زیر دال بتنی قابل طراحی است. سیستم سازه‌ای خط ارایه شده در این تحقیق خط بدون بالاست با دال بتنی درجاست و لایه ارتجاعی آن در زیر دال بتنی پیش‌بینی شده است. لایه ارتجاعی مورد استفاده از جنس پلی‌اورتان (PU) مجوف بوده و مجموعه جرم فنربندی شده شامل دال بتن مسلح خط، تراورس دو بلوکه، سیستم پابند و ریل است[2].

عملکرد میرایی ارتعاشی سیستم‌های جرم و فنر بسیار زیاد است. به این جهت هنگام عبور از نواحی حساس به ارتعاش، سیستم‌های

Archive of SID
www.SID.ir

جرم و فنر به عنوان سیستم سازه‌ای برتر روسازی خط انتخاب می‌شوند. سختی دینامیک لایه ارتجاعی مورد استفاده در این سیستم‌ها با توجه به نوع کاربرد قابل تنظیم است و به همین دلیل گستره کاربرد سیستم‌های سازه‌ای نامبرده بسیار زیاد است[4 و3].
احداث قطارهای سبک شهری در مراکز استان‌های مهم در کشور مطرح بوده و اولویت‌های اول خطوط مذکور در مراکز مهم استان‌های کشور(مشهد، تبریز، شیراز، اصفهان و غیره) در دست اجراست. در بیشتر خطوط ریلی شهری، بیم آن می‌رود که سازه‌های مجاور ارتعاش، آسیب دیده و کاربری زمین‌های مجاور خطوط ریلی مختل شود و به همین دلیل طراحی سیستم سازه‌ای روسازی به صورت جرم و فنر در این خطوط به عنوان گزینه‌ای برتر مطرح است. به این علت ارایه روشی استاندارد و در عین حال ساده، سریع و دقیق، برای تحلیل ارتعاشی و ارتجاعی سیستم‌های جرم و فنر دارای اهمیت است. سیستم‌های جرم و فنر از دیدگاه‌های مختلف طبقه‌بندی شده‌اند. طبقه‌بندی مورد استفاده در این تحقیق از نتایج پژوهش‌های قبلی این مؤلفین[4] اقتباس شده است:

- سیستم جرم و فنر سبک $m \le 4t/m,\ f_1 \ge 15Hz$
- سیستم جرم و فنر متوسط $m \le 8t/m,\ f_1 \ge 10Hz$
- سیستم جرم و فنر سنگین $m \ge 8t/m,\ f_1 < 10\ Hz$

حالت سبک برای قطار شهری، نوع متوسط در خطوط مترو است و سیستم جرم و فنر سنگین، در روسازی راه‌آهن‌های بین شهری کاربرد دارد[۵].
در این تحقیق روشی دقیق و در عین حال ساده برای تحلیل ارتعاشی و ارتجاعی سیستم‌های جرم و فنر روسازی خطوط ریلی ارایه می‌شود. منظور از تحلیل ارتجاعی سیستم جرم و فنر، برآورد میزان تغییرمکان، مدول بستر و شکل منحنی تغییرمکان این سازه‌ها و منظور از تحلیل ارتعاشی، محاسبه فرکانس طبیعی و میرایی ارتعاشی سیستم‌های مذکور است. سازگاری بین معیارهای ارتعاشی و ارتجاعی سیستم جرم و فنر نیز در روش ارائه شده مورد توجه قرار گرفته و از جمله معیارهای کنترلی روش به شمار می‌رود. خروجی این روش، کفایت میرایی ارتعاشی روسازی و کنترل بزرگی تغییرمکان کل سیستم است. در ادامه نیز روش ارایه شده جهت تحلیل روسازی، قطار شهری اصفهان مورد استفاده قرار گرفته و ضمن ارایه نتایج تحلیل، تناسب روش با روسازی قطارهای سبک شهری نمایش داده می‌شود.

۲. روش‌های جاری

روش‌های جاری تحلیل ارتجاعی و ارتعاشی به همراه معیارهای استاندارد به صورت مجزا در ادامه ارایه می‌شوند.

۲-۱ تحلیل خواص ارتجاعی سیستم

سیستم‌های سازه‌ای با دال بتنی روسازی خطوط ریلی، با استفاده از روش‌های اجزای محدود، قابل تحلیل و طراحی هستند. برای استفاده از روش‌های مذکور و در راستای ملاحظات اقتصادی انجام تحلیل، معمولا ساده‌سازی‌هایی در تشکیل مدل فرض می‌شوند که دقت نتایج را با تردید روبه رو می‌کند. به این جهت اخیرا در چند دستورالعمل طراحی بین‌المللی خطوط ریلی، روش‌هایی استاندارد برای تحلیل ارتجاعی روسازی بدون بالاست خطوط ریلی ارایه شده و دقت نتایج آنها با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی تایید شده است [6].
در این تحقیق جهت تحلیل ارتعاشی سیستم روسازی جرم و فنر، یک روش معیار اصلاح شده توسعه یافته و مورد استفاده قرار می‌گیرد.
روش استاندارد تحلیل سیستم‌های جرم و فنر تمام مقطع، در خطوطی که فاصله بین پابندها (تراورسها) کمتر از ۱۰۲۰ میلیمتر باشد، مدل تیر بر بستر ارتجاعی زیمرمن است[6]. با استفاده از این روش، محاسبه تغییرمکان در نقاط مختلف خط و خواص منحنی تغییرمکان به آسانی امکان‌پذیر است. اساس این روش بر استفاده از روابط (۳ و ۲ و ۱) استوار است. استفاده از این روش جهت تحلیل روسازی‌های بتنی راه‌آهن که دارای تکیه‌گاه کشسان به صورت لایه‌های ارتجاعی در زیر دال بتنی هستند، در مراجع مختلف توصیه شده است و به عنوان روش آیین‌نامه‌ای مورد استفاده طراحان روسازی راه‌آهن قرار می‌گیرد [6 و۵]. در این روش خط بتنی (مجموعه ریل، تراورس مدفون و دال) به صورت یک تیر با سختی خمشی EI بر روی لایه‌ای ارتجاعی (ترکیبی از فنر و میراگر) مدل می‌شود. خواص ارتجاعی لایه کشسان مورد استفاده (مدول ارتجاعی، ابعاد هندسی، مساحت مؤثر بارگذاری و...) در مدل در قالب ضریب فنریت k (N/m) یا مدول بستر C (N/mm^3) وارد می‌شود.

Archive of SID
www.SID.ir

$$P(x) = \frac{Q}{2L}\eta(x) \qquad (۱)$$

$$w(x) = \frac{Q}{2KL}\eta(x) \qquad (۲)$$

$$M(x) = \frac{QL}{4}(x) \qquad (۳)$$

در رابطه بالا $\eta(x) = e^{-x/L}\left[\cos\frac{x}{L} + \sin\frac{x}{L}\right]$ و $\mu(x) = e^{-x/L}\left[\cos\frac{x}{L} - \sin\frac{x}{L}\right]$ است. w(x) تغییرمکان ریل (مثبت به سمت پایین) به میلیمتر، L طول مشخصه ریل (متر) $L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} = \sqrt[4]{\frac{4EIa}{CA}}$ ، a فاصله بین تراورس‌ها (میلیمتر)، Q بار یک چرخ (نیوتن)، k مدول خط (N/mm/mm)، C مدول بستر لایه کشسان زیر دال بتنی (N/mm^3)، A سطح تماس مؤثر خط که برابر حاصلضرب نصف پهنای دال بتنی در فاصله بین پابندها فرض می‌شود (mm^2)، I ممان اینرسی مقطع خمشی (mm^4) و x فاصله در راستای ریل و از نقطه قرارگیری بار متمرکز چرخ (mm) است.

در مدل تیر بر بستر ارتجاعی زیمرمن، محاسبه با چندین بار متمرکز (برای مثال یک بوژی یا واگن) نیز امکان‌پذیر است. از آنجا که وجود بیش از یک بار متمرکز اثر تعدیل‌کننده بر نتایج تغییرمکان و لنگر محاسبه شده در مقطع دارند، بنابراین پیشنهاد شده است که تمامی محاسبات با درنظرگرفتن یک واگن (چهار بار متمرکز) انجام پذیرد[6 و۵]. با استفاده از اصل برهم‌نهی، نتیجه نهایی مطابق روابط (٤،٥،٦) قابل محاسبه است.

$$w_0 = \frac{1}{2kL}\sum_i Q_i \eta(l_i) \qquad (٤)$$

$$P_0 = kw_0 \qquad (٥)$$

$$M_0 = \frac{L}{4}\sum_i Q_i \mu(l_i) \qquad (٦)$$

که در آن:

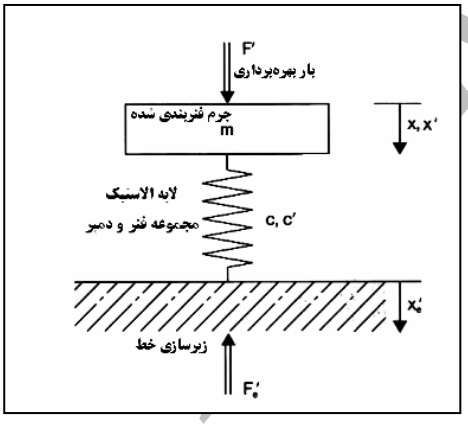
l_i فاصله چرخ Q_i از نقطه x=0 است.

اثر تعدیل کننده‌ای که در نظر گرفتن بیش از یک بار متمرکز هنگام محاسبات لنگر در مواردی که فاصله بین دو محور بوژی کمتر از طول مشخصه خط (L) باشد دارد، حدود ۲۰٪ است[6].

۲-۲ تحلیل خواص ارتعاشی سیستم

در تحلیل روسازی راه‌آهن، هنگامی که میرایی ارتعاش به عنوان یک معیار طراحی مطرح می‌شود، همواره با نوعی تناقص در صورت مساله روبه‌رو می‌شویم، به این صورت که از سویی باید نرم‌ترین تکیه‌گاه ممکن را در راستای حصول به میرایی پیش‌بینی شده، انتخاب کنیم و از سوی دیگر ملزم به رعایت معیارهای پایداری خط در قالب معیار تغییرمکان هستیم که خود سختی سیستم را محدود می‌کند. بنابراین در طراحی سیستم‌های جرم و فنر تمام مقطع از سویی باید ۱) همواره معیار تغییرمکان و شیب منحنی تغییرمکان مجاز تحت بار مرده و بارهای بهره‌برداری حفظ شود و ۲) بزرگی کمیت ارتعاش سیستم نباید از مقادیر مجاز از پیش تعریف شده، فراتر رود[7].

رفتار ارتعاشی سیستم‌های جرم و فنر تمام مقطع توسط سیستم یک‌درجه آزادی فنر و دمپر تحت بارگذاری دینامیکی قابل محاسبه است.



شکل ۱. مدل یک درجه آزادی فنر و دمپر پ تحت بارگذاری دینامیکی[۸]

نمایی از این مدل در شکل ۱ ارایه شده است. در این شکل F بار دینامیکی خارجی اعمال شده بر سیستم (N)، m جرم فنربندی شده (kg)، x و x' بزرگی دامنه دینامیکی و استاتیکی (m)، c و c' مدول دینامیک الاستیک (N/m)، F_e' نیروی عکس‌العمل

Archive of SID
www.SID.ir

تکیه‌گاهی دینامیک (N) و x_e تغییرمکان زیرسازه خط تحت بارگذاری دینامیک می‌باشد. در صورت اجرای این سیستم بر روی ابنیه فنی سنگین (تونل یا پل) تغییرمکان $x'_e=0$ فرض می‌شود.

کارآیی ارتعاشی سیستم‌های جرم و فنر معمولا توسط دو کمیت بیان می‌شود:

۱) فرکانس طبیعی ارتعاشی سیستم

۲) کاهش ارتعاش که خود توسط کمیت میرایی انتقال توان یا عامل میرایی عایق‌ارتعاش بیان می‌شود، تناسب کمیت فرکانس با کاربری روسازی مورد نظر (قطار شهری، مترو یا راه‌آهن بین شهری) با توجه به نوع سیستم مشخص می‌شود که در مقدمه این تحقیق به آن اشاره شد.

هنگام انجام تحلیل نسبی ارتعاشی سیستم‌های جرم و فنر تمام مقطع متوسط، ابتدا فرکانس طبیعی سیستم برآورد می شود. فرکانس طبیعی در این سیستم‌ها با استفاده از رابطه (۷) قابل برآورد است [۸]

$$f_0 = \frac{1}{2\Pi}\sqrt{\frac{c'}{m}} \qquad (۷)$$

که در آن:

c' مدول دینامیک بستر (N/mm) بوده و از رابطه $c'=\frac{E'.A}{d}$ به دست می‌آید. سایر پارامترهای رابطه عبارتند از: m جرم فنربندی شده (kg)، E' مدول کشسانی دینامیک (N/mm^2)، A سطح بارگذاری(mm^2)، و d ضخامت لایه ارتجاعی مورد استفاده (mm). کمیت میرایی انتقال توان یا میرایی عایق‌ارتعاش از روابط (۸،۹) قابل محاسبه‌اند[8]:

$$K = 20\log\left[\frac{1+\eta^2}{\sqrt{\left(1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2+\eta^2}}\right] \qquad (۸)$$

$$I = 100\left[1-\frac{1+\eta^2}{\sqrt{\left(1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2+\eta^2}}\right] \qquad (۹)$$

در رابطه فوق K میرایی ارتعاشی نسبی خط به دسی‌بل و I میرایی ارتعاشی خط به درصد است. میرایی ارتعاش در روسازی‌های جرم و فنر تمام مقطع، بستگی به خصوصیات میرایی مصالح کشسان دارد. در کاربرد قطار سبک شهری عامل میرایی درونی مصالح مورد استفاده بین ۰/۱ تا ۰/۳ [9] متغیر است. در عامل میرایی درونی مصالح پولی اورتان بکار رفته در این تحقیق برابر ۰/۲ فرض می‌شود.

۲-۳ معیارهای عملکرد ارتجاعی روسازی خطوط ریلی

کاهش ارتعاش، در صورت انجام تحلیل نسبی، معیار به صورت ΔdB یا به شکل ساده‌تر % و در صورت تحلیل مطلق به (V_{PPV}) یا VdB بیان می‌شود[10]. در جدول (۱)، سطوح ارتعاشی مجاز به صورت کمیت نسبی دسی‌بل برای انواع کاربری‌های حساس به ارتعاشی زمین ارایه شده است. علاوه بر سطوح مجاز ارتعاشی، سطوح مجاز صوتی نیز در مجاورت کاربری‌های مشابه ارایه شده است. همان گونه که مشخص است، با افزایش تواتر (سرفاصله) عبور قطارها از مجاورت کاربری‌های حساس به ارتعاش، سطوح صوت و ارتعاش مجاز کاهش می‌یابد. سیستم‌های قطار سبک شهری، در زمره رویدادهای با تکرار زیاد قرار می‌گیرند. در خصوص معیار مورد استفاده در تحلیل نسبی در سیستم‌های جرم و فنر با جرم فنربندی شده متوسط، نیز معیار 20ΔdB یا ۸۵٪ در فرکانس عملکردی سیستم پیشنهاد می‌شود. به این صورت روسازی طراحی شده (در مورد کاربرد قطارهای سبک شهری) باید قادر به کاهش حداقل ۲۰ دسی‌بل در فرکانس‌های بیش از ۵۰ هرتز باشد. این معیار جهت اجرای خطوط سبک شهری در مجاورت ساختمان‌های تاریخی و جلوگیری از انتقال ارتعاشات مخرب به سازه‌های مذکور کفایت می‌کند. در دستورالعمل‌های کشورهای اسکاندیناوی [10] نیز میرایی ۲۰ دسی‌بل در فرکانس عملکردی (۵۰-۸۰ هرتز) روسازی جرم و فنر تصریح شده است.

به عنوان یک معیار ارتعاشی دیگر باید همواره سازگاری معیار ارتعاشی با معیارهای عملکردی سیستم روسازی را مورد نظر قرار داد. پس از انجام تحلیل ارتعاشی سیستم، نتایج تحلیل در قالب سختی دینامیک و تغییرمکان سیستم، باید با معیارهای عملکردی سیستم مقایسه شود. به این ترتیب از پیشنهاد یک سیستم نرم (مدول بستر بسیار کوچک، اندیس طول خمشی کم و تغییرمکان بزرگ) خودداری می‌شود. عمر خستگی قطعات خط (دال بتنی، سیستم پابند و ریل) در سیستم‌های نرم به شدت کاهش می‌یابند و

Archive of SID
www.SID.ir

به همین علت از دیدگاه هزینهٔ طول عمر، خطوط دارای مدول بستر کوچک اقتصادی نیستند.

جدول ۱. معیار صدا و ارتعاش زمینی با توجه به نوع کاربری [12 و 11]

سطح کاربری زمین	سطوح ارتعاش زمینی		سطوح صدای زمینی	
	رویدادهای با تکرار زیاد[1]	رویدادهای با تکرار کم[2]	رویدادهای با تکرار زیاد[1]	رویدادهای با تکرار کم[2]
سالن‌های کنسرت	65 VdB	65 VdB	25 VdB	25 VdB
استودیوی فیلم‌برداری	65 VdB	65 VdB	25 VdB	25 VdB
استودیوی ضبط	65 VdB	65 VdB	25 VdB	25 VdB
مراکز پخش صدا	72 VdB	80 VdB	30 VdB	38 VdB
تئاتر	72 VdB	80 VdB	35 VdB	73 VdB

در جدول (۱):

۱) اصطلاح رویداد با تکرار زیاد به ارتعاشات با تکرار بیش از ۷۰ بار در روز اطلاق می‌شود. بیشتر پروژه‌های ریلی سریع در این گروه قرار دارند.

۲) اصطلاح رویداد با تکرار کم به ارتعاشاتی با تکرار کمتر از ۷۰ بار در روز اطلاق می‌گردد. بیشتر راه‌آهن‌های مسافری درون شهری در این زمره قرار می‌گیرند.

۳) اگر ساختمان در هنگام عبور قطار، خالی از سکنه باشد ،نیازی به در نظرگیری معیارهای فوق نیست، به عنوان مثال ، قرارگیری یک خط مسافری در مجاورت سالن کنسرت را در نظر بگیرید. در صورتی که از این خط بعد از ساعت ۷ شب بهره‌برداری نشود ، معمولا نباید عملیات قطار باعث خلل در عملیات سالن کنسرت شود، و بنابراین می‌توان معیارهای مذکور را تخفیف بخشید.

۳. روش پیشنهادی در این تحقیق

نمودار جریان ارایه شده در شکل ۲، روش تحلیل مورد استفاده در این تحقیق را نمایش می‌دهد. جهت انجام تحلیل، باید تمامی ورودی‌های مربوط به آلات‌ناقله و خط ریلی گردآوری شوند.

نمودار جریان اشاره شده در شکل ۲ دارای دو شاخه است که با پیشروی در هر یک از آنها قادر به محاسبه خواص سیستم (ارتعاشی یا ارتجاعی) هستیم. عاملی که از اهمیت بسیاری برخوردار است، مدول بستر است که باید قبل از تحلیل ارتعاشی (یا ارتجاعی) سیستم مشخص شود. از آنجا که بیشتر سیستم‌های جرم و فنر در درون تونل‌ها اجرا می‌شوند، مدول بستر وابستگی زیادی به مدول لایه ارتجاعی دارد. در واقع سختی خط، تابعی از مدول ارتجاعی لایه پلی‌اورتان مورد استفاده در زیر دال بتنی است و میزان تغییرمکان سیستم خط ریلی تحت بارگذاری قطار، با تغییر مدول ارتجاعی این لایه دستخوش تغییر می‌شود. مدول ارتجاعی مصالح پلی‌اورتان تابعی از بارگذاری و فرکانس است. برای کاربردهای قطار سبک شهری مدول بستر لایه‌های ارتجاعی در حدود $۳/٦\times۱۰^{-۳}$ نیوتن بر میلیمتر مربع و ثابت فنریت آنها برابر $۲/٦\times۱۰^{+۳}$ نیوتن بر میلیمتر است [13].

پس از مشخص شدن مدول بستر و محاسبه تنش ناشی از بار مرده و بار زنده با پیشروی در زیرشاخه تحلیل ارتعاشی، قادر به محاسبه فرکانس طبیعی خط (رابطه ۷) و به تبع آن میزان میرایی ارتعاش به صورت تابعی از فرکانس عملکردی هستیم (روابط ۸ و۹).

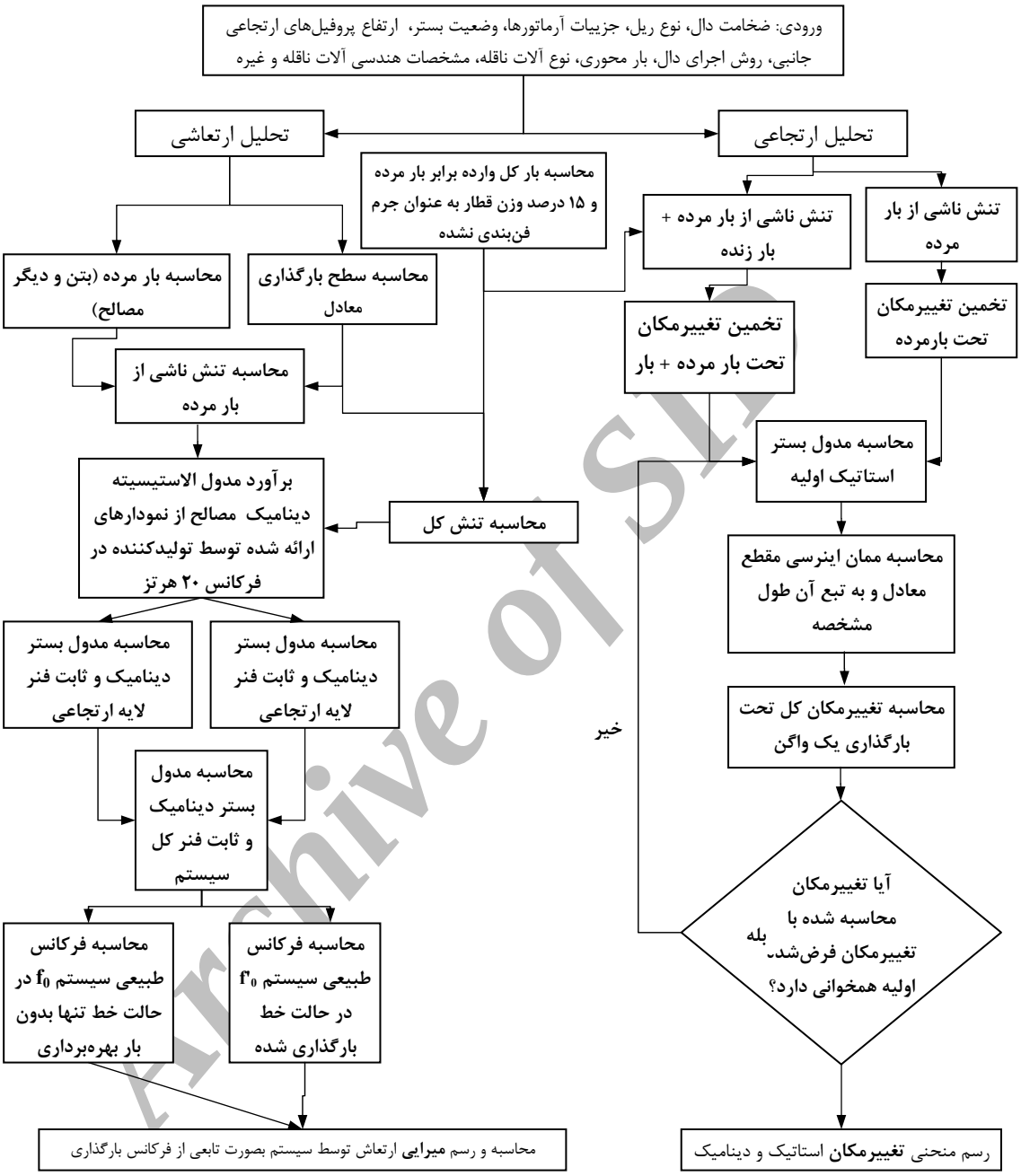
در خصوص محاسبه تغییرمکان تحت بار مرده نیز (شاخه تحلیل ارتجاعی) نیاز به مدول بستر دینامیک داریم. به این منظور ابتدا یک تغییرمکان اولیه برای خط فرض شده و طی یک روال، تکرار تغییرمکان خط نهایی خط تحت بارگذاری دینامیک در راستای نیل به همگرایی در محاسبات برآورد می‌شود. جهت انجام محاسبات می‌توان از روابط (٤و٧) استفاده کرد.

همواره باید خروجی تحلیل ارتعاشی (به صورت مدول بستر) در شاخه تحلیل ارتعاشی کنترل شده و اطمینان حاصل شود که تغییرمکان حاصل از تغییرمکان مجاز سیستم کوچکتر است. هنگام تحلیل سیستم‌های جرم و فنر در ابتدا باید نسبت به تعیین مدول خط اقدام شود.

به منظور تعیین مدول خط نیز به علت ماهیت دینامیکی المان فنری مورد استفاده نیاز به برآورد بار استاتیکی مرده خط و فرکانس بارگذاری (که در کاربرد ریلی به صورت پیش‌فرض برابر ۲۰ هرتز فرض می‌گردد)، خواهیم داشت.

نتایج تحلیل با نتایج محاسبات آزمایشگاهی[14] ارایه شده توسط تولیدکننده لایه‌های ارتجاعی مذکور مقایسه و همخوانی قابل قبولی بین روش تحلیل پیشنهادی و گراف‌های ارایه شده توسط تولیدکننده مشاهده شد.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲. نمودار جریان تحلیل ارتعاشی و ارتجاعی سیستم‌های جرم و فنر روسازی راه‌آهن

www.SID.ir

٤. مثال کاربردی روش پیشنهادی در تحلیل یک خط قطار شهری

در راستای نمایش تناسب کاربرد روش پیشنهادی در تحلیل روسازی قطار سبک شهری، روش پیشنهادی در این تحقیق جهت تحلیل ارتعاشی و ارتجاعی روسازی قطار شهری اصفهان مورد استفاده قرار گرفت. لایه ارتجاعی مورد استفاده از جنس پلی‌اورتان به ضخامت ۲۵ میلیمتر در زیر دال بتنی و دو لایه جانبی ارتجاعی از مصالح مشابه به ضخامت ۱۲ میلیمتر در قسمت جانبی دال بتنی انتخاب شدند. تنش ناشی از بار زنده با توجه به بار محوری آلات‌ناقله قطار شهری از ۰ تا ۰/۰۲۵ نیوتن بر میلیمتر مربع در نظرگرفته شد. با توجه به عرض مؤثر باربر دال (۲/٦ متر) و مشخصات ارایه شده توسط تولیدکننده مصالح پلی‌اورتان، امکان بارگذاری مقطعی تا ۰/۷۵ نیوتن بر میلیمتر مربع در زمان بهره‌برداری بر لایه ارتجاعی مورد استفاده نیز وجود دارد [13].

٤-۱ مشخصات روسازی قطار شهری اصفهان

سیستم روسازی مذکور از نوع جرم و فنر تمام مقطع است و در درون تونل‌های عمیق یک خطه و نیمه عمیق دوخطه اجرا می‌شود. سیستم روسازی از نوع تکیه‌گاه مجزا، تراورس دی‌بلوک مدفون با المان‌های خرپایی میانی، سیستم پابند الاستیک (فاقد عملکرد ارتعاشی)، عمق دال تقریبا برابر ٤۰ سانتیمتر، فاصله بین تراورس‌ها برابر ۷۰ سانتیمتر، نوع ریل S49، حداکثر شیب مسیر ۳۰ در هزار و حداقل قوس واقع در مسیر ۳۰۰ است. در طول خط قطار شهری اصفهان، کاربری‌های متعددی که به ارتعاش حساس‌اند قرار دارند، که مهم‌ترین آنها در حدفاصل ایستگاه‌های تختی و سی و سه پل اصفهان (محدوده چهارباغ قدیم و پل سی و سه پل) هستند. با توجه به اهمیت بناهای تاریخی واقع در طول مسیر، تصمیم بر طراحی سیستم جرم و فنر سبک (یا متوسط) گرفته شد. معیارهای ارتعاشی مورد استفاده در طراحی، در بخش ۲ همین تحقیق ارایه شده‌اند. واریانت‌های متعددی در طراحی سیستم جرم و فنر روسازی خط قطار شهری اصفهان مد نظر قرار گرفته‌اند که نهایتا سیستم جرم و فنر تمام مقطع با جرم فنربندی شده متوسط، به عنوان گزینه ارجح انتخاب شد[14 و13].

٤-۲ روش مدل‌سازی و تحلیل

نمودار جریان ارایه شده در شکل ۲، جهت تحلیل روسازی قطار شهری فوق مورد استفاده قرار گرفت. جهت تحلیل، مدول استاتیک لایه‌های ارتجاعی تحت بار مرده، از گراف‌های ارایه شده توسط تولیدکننده برابر ۰/۰۱۲ نیوتن بر میلیمتر مربع برآورد شد و به منظور برآورد مدول دینامیک فرکانس معیار ۲۰ هرتز مورد استفاده قرار گرفت.

چگالی مصالح لایه ارتجاعی در ابتدا ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب فرض شد و در حین تحلیل به گونه‌ای تنظیم شد که تغییرمکان دینامیک خط همواره به ۳ میلیمتر و تغییرمکان استاتیک خط به ٤ میلیمتر محدود شود.

مدول ارتجاعی برشی پروفیل‌های الاستیک جانبی نیز بر بزرگی تغییرمکان و فرکانس طبیعی خط مؤثر است. به این جهت دو حالت تحلیل مد نظر قرار گرفتند:

در حالت اول، ارتفاع پروفیل‌های ارتجاعی جانبی برابر ۲۵۰ میلیمتر (که در تونل‌های عمیق مصداق دارد) و در حالت دوم ارتفاع پروفیل‌های ارتجاعی جانبی برابر ۳٦۰ میلیمتر [14] (که در تونل‌های نیمه عمیق حفر و پوشش دارای کاربرد است) مد نظر قرار گرفت. نتایج برای هر دو سناریوی تحلیل ذیلا ارایه می‌شود.

٤-۳ نتایج تحلیل

نتایج تحلیل ارتجاعی و ارتعاشی سیستم در جداول ۲ الی ٦ آمده‌اند.

جداول ۲ و ۳ نتایج تحلیل ارتجاعی (عملکردی) سیستم را نمایش می‌دهند. با افزایش ضخامت دال از ٤۰ به ٤۵ سانتیمتر، تغییرمکان استاتیک و دینامیک سیستم کاهش می‌یابد.

کاهش تغییرمکان به دو علت حاصل می‌شود. دلیل اول افزایش لنگر ماند سیستم (ارتفاع تیر به میزان ۵ سانتیمتر افزایش یافته است) و علت دوم افزایش ثابت فنریت استاتیک (به جداول ۲ و ۳ رجوع شود) مصالح ارتجاعی پلی اورتان مورد استفاده است.

از خواص مهم مصالح پلی‌اورتان وابستگی مدول ارتجاعی آنها به بزرگی و فرکانس بارگذاری است. این امر از نتایج تحلیل انجام شده کاملا مشخص است.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲. تغییرمکان خط و سایر خواص عملکردی روسازی در تونل‌های عمیق- ضخامت لایه ارتجاعی زیرین مورد استفاده ۲۵ میلیمتر است

بار محوری (تن)	فشار استاتیک بر روی لایه ارتجاعی (P) (N/mm^2)		تغییرمکان ریل (mm) w		اندیس خمش پایه (mm) L		ثابت فنریت استاتیک (kN/mm) k_d	مدول بستر استاتیک (N/mm^3) C_{stat}	ثابت فنریت لایه الاستیک جانبی (kN/mm) k_{side}	ضخامت دال فوقانی(cm)
	خط تنها	بار بهره‌برداری	استاتیک	دینامیک	استاتیک	دینامیک				
۱۲/۵	۰/۰۱۲	۰/۰۲۴۳	۳/۳۹	۲/۹٤	۳٦۳۹	۳٤۷٦	۲/۸۵	۳/٦٥E-۳	۱/٤۳۳	٤۰
۱۲/۵	۰/۰۱۲	۰/۰۲۳۷	۳/۰۸	۲/٦٥	۳۹۳۷	۳۷٦۲	۲/۹٦	۳/۷۹E-۳	۱/٤۳۳	٤٥
۱٤	۰/۰۱۲	۰/۰۲٥۷	۳/۹۳	۳/٤۱	۳٦۷۹	۳٥۱٥	۲/۷۳	۳/٥E-۳	۱/٤۳۳	٤۰
۱٤	۰/۰۱۲	۰/۰۲٥	۳/٦٥	۳/۱۳	٤۰۰۲	۳۸۲٤	۲/۷۷	۳/٥٥E-۳	۱/٤۳۳	٤٥

جدول ۳. تغییرمکان خط و سایر خواص عملکردی روسازی در تونل‌های نیمه عمیق- ضخامت لایه ارتجاعی زیرین مورد استفاده ۲۵ میلیمتر است

بار محوری (تن)	فشار استاتیک بر روی لایه ارتجاعی(P) (N/mm^2)		تغییرمکان ریل (mm) w		اندیس خمش پایه (mm) L		ثابت فنریت استاتیک (kN/mm) k_d	مدول بستر استاتیک (N/mm^3) C_{stat}	ثابت فنریت لایه الاستیک جانبی (kN/mm) k_{side}	ضخامت دال فوقانی (cm)
	خط تنها	بار بهره‌برداری	استاتیک	دینامیک	استاتیک	دینامیک				
۱۲/۵	۰/۰۱۲	۰/۰۲٤۳	۳/۳۹	۲/۹٤	۳٦۳۹	۳٤۷٦	۲/۸۵	۳/٦٥E-۳	۲/۰۰٦	٤۰
۱۲/۵	۰/۰۱۲	۰/۰۲٥	۳/۱۳	۲/٥٥	۳۹۹٥	۳۷٤۲	۲/۹۱	۳/٦E-۳	۲/۰۰٦	٤٥
۱٤	۰/۰۱۲	۰/۰۲٥۷	۳/۹۳	۳/٤۱	۳٦۷۹	۳٥۱٥	۲/۷۳	۳/٥E-۳	۲/۰۰٦	٤۰
۱٤	۰/۰۱۲	۰/۰۲٥	۳/٦٥	۳/۱۳	٤۰۰۲	۳۸۲٤	۲/۷۷	۳/٥٥E-۳	۲/۰۰٦	٤٥

جدول ٤. فرکانس طبیعی و میزان میرایی ارتعاش در محدوده فرکانس ٦۰ هرتز

بار محوری (تن)	تغییرمکان ریل (میلیمتر)		فرکانس طبیعی (هرتز)		کاهش ارتعاش	ملاحظات*
	استاتیک	دینامیک	قطار متوقف	قطار در حال حرکت	dB_v	
۱۲/۵	۳/۰۸	۲/٦٥	۲۰/۸	۱۷/۷	-۲۰/۲	ارتفاع پروفیل جانبی برابر ۳۵۰ میلیمتر
	۳/۰۸	۲/٦٥	۲۰/٤	۱۷/۲	-۲۰/٦	ارتفاع پروفیل جانبی برابر ۲۵۰ میلیمتر
۱٤/۰	۳/٦٥	۳/۱۳	۲۰/۸	۱۷/۹	-۲۰/۰	ارتفاع پروفیل جانبی برابر ۳۵۰ میلیمتر
	۳/٦٥	۳/۱۳	۲۰/٤	۱۷/٦	-۲۰/۲	ارتفاع پروفیل جانبی برابر ۲۵۰ میلیمتر

* در سیستم‌های جرم و فنر علاوه بر زیر دال بتنی، لایه ارتجاعی بصورت قائم در دو طرف دال خط نیز تعبیه می‌شود که در این جدول به عنوان پروفیل جانبی درج گردیده است.

نتایج محاسبه فرکانس طبیعی خط در جدول ٤ ارایه شده است. دو عامل تعیین‌کننده در محاسبه فرکانس طبیعی خط، مدول دینامیک لایه ارتجاعی و جرم فنربندی شده است. با افزایش جرم فنربندی شده، فرکانس طبیعی خط کاهش می‌یابد. به همین دلیل فرکانس طبیعی خط در حالت وجود قطار، پایین‌تر از خط به تنهایی می‌باشد. به عنوان یک معیار پذیرش، پیشنهاد می‌شود که خواص دینامیکی لایه‌های ارتجاعی به گونه‌ای تنظیم شود که فرکانس طبیعی خط کمتر از ۱۸ هرتز شود. از سویی افزایش ارتفاع پروفیل جانبی نیز فرکانس طبیعی خط را اندکی افزایش می‌دهد که دلیل آن نیز افزایش مدول بستر دینامیک مؤثر سیستم می‌باشد. نتایج ارائه شده در جدول ٤ نشان می‌دهند که افزایش بار محوری از ۱۲/۵ به ۱٤ تن، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در فرکانس طبیعی خط ندارد. میرایی ارتعاش در فرکانس عملکردی ٦۰ هرتز نیز در جدول ٤ ارایه شده است. معیار میرایی ارتعاش در مجاورت کاربری‌های حساس به ارتعاش (برای قطار شهری اصفهان محدوده تاریخی چهارباغ) ۲۰ دسی‌بل است. نتایج تحلیل تناسب خواص میرایی ارتعاش لایه ارتجاعی منتخب را برای کاربری انتخاب شده را نشان می‌دهد.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول۵. فرکانس طبیعی و کاهش ارتعاش بصورت تابعی از فرکانس- تونل‌های عمیق و ارتفاع پروفیل جانبی برابر ۲۵۰ میلیمتر

بار محوری ۱۲/۵ تن				
فرکانس طبیعی سیستم		فرکانس	K(dB) (رابطه۸)	IL(%) (رابطه ۹)
خط تنها	باربهره‌برداری	۱۲/۵	٦/۱	-۱۰۱
۲۰/٤	۱۷/۲	۱٦	۱۲/۰	-۲۹۹
		۲۰	۷/۵	-۱۳۷
		۲۵	-۰/۹	۹
		۳۱/۵	-۷/۰	۵۵
		٤۰	-۱۲/۲	۷۵
		۵۰	-۱٦/۵	۸۵
		٦۳	-۲۰/٦	۹۱
		۸۰	-۲٤/۵	۹٤
		۱۰۰	-۲۸/۰	۹٦
		۱۲۵	-۳۱/۳	۹۷
		۲۵۰	-٤۰/۸	۹۹
بار محور ١٤ تن				
فرکانس طبیعی سیستم		فرکانس	K(dB)	IL(%)
خط تنها	خط تنها	۱۲/۵	٦/۲	-۱۰۳
۲۰/٤	۱۷/٦	۱٦	۱۲/۲	-۳۰٦
		۲۰	۷/۲	-۱۳۰
		۲۵	-۱/۰	۱۱
		۳۱/۵	-۷/۱	۵٦
		٤۰	-۱۲/۳	۷٦
		۵۰	-۱٦/٦	۸۵
		٦۳	-۲۰/۷	۹۱
		۸۰	-۲۰/٦	۹٤
		۱۰۰	-۲۸/۱	۹٦
		۱۲۵	-۳۱/٤	۹۷
		۲۵۰	-٤۰/۸	۹۹

جدول ٦. فرکانس طبیعی و کاهش ارتعاش بصورت تابعی از فرکانس- تونل‌های نیمه‌عمیق و پروفیل جانبی برابر ۳٦۰ میلیمتر

بار محوری ۱۲/۵ تن				
فرکانس طبیعی سیستم		فرکانس	K(dB)	IL(%)
خط تنها	باربهره‌برداری	۱۲/۵	۵/۷	-۹۳
۲۰/٤	۱۷/۲	۱٦	۱۱/٤	-۲۷۱
		۲۰	۸/۵	-۱٦۷
		۲۵	-۰/۱	۲
		۳۱/۵	-٦/۵	۵۲
		٤۰	-۱۱/۷	۷٤
		۵۰	-۱٦/۱	۸٤
		٦۳	-۲۰/۲	۹۰
		۸۰	-۲٤/۱	۹٤
		۱۰۰	-۲۷/۷	۹٦
		۱۲۵	-۳۱/۰	۹۷
		۲۵۰	-٤۰/۵	۹۹
بار محوری ١٤ تن				
فرکانس طبیعی سیستم		فرکانس	K(dB)	IL(%)
خط تنها	خط تنها	۱۲/۵	۵/۸	-۹۵
۲۰/٤	۱۷/٦	۱٦	۱۱/۵	-۲۷۸
		۲۰	۸/۳	-۱۵۹
		۲۵	-۰/۳	٤
		۳۱/۵	-٦/٦	۵۳
		٤۰	-۱۱/۸	۷٤
		۵۰	-۱٦/۲	۸٤
		٦۳	-۲۰/۳	۹۰
		۸۰	-۲٤/۲	۹٤
		۱۰۰	-۲۷/۷	۹٦
		۱۲۵	-۳۱/۱	۹۷
		۲۵۰	-٤۰/۵	۹۹

جداول ۵ و ٦، میرایی ارتعاش سیستم را در محدوده فرکانس عملکردی ۰ الی ۲۰۰ هرتز نمایش می‌دهد. میرایی ارتعاش بر حسب کمیت "میرایی عایق‌ارتعاش" و با استفاده از رابطه ۹ محاسبه شده است. با افزایش فرکانس، میرایی ارتعاش نیز افزایش می‌یابد. در محدود فرکانس طبیعی خط بارگذاری شده توسط بار زنده قطار، افزایش دامنه ارتعاشی ملاحظه می‌شود. پدیده مذکور که در واقع رزونانس ارتعاشی خط است تا فرکانس برابر $\sqrt{2}f_0$ تداوم می‌یابد و سپس میرایی ارتعاشی سیستم آغاز می‌شود.

اهمیت انتخاب صحیح فرکانس طبیعی خط در این مقوله از آنجا مشخص می‌شود که همواره باید از همپوشانی فرکانس‌های ناحیه تشدید و فرکانس عملکردی خط پرهیز شود.

بر اساس نتایج ارایه شده در جداول ۵ و ٦ پیشنهاد می‌شود که در کاربرد قطار سبک شهری فرکانس طبیعی ارتعاش روسازی در بدترین حالت به ۱۸ هرتز محدود شود.

پیشنهاد فرکانس طبیعی ۱۸ برای روسازی‌های قطار شهری بر این حقیقت استوار است که در سیستم‌های جرم و فنر تمام مقطع (لایه ارتجاعی بصورت تمام مقطع پیش‌بینی می‌شود)، میرایی ارتعاش از فرکانس $\sqrt{2}f_0$ آغاز می‌شود.

از آنجا که فرکانس عملکردی خطوط قطار شهری از حدود ۲۵ هرتز آغاز می‌شود، در خطوط سبک شهری جرم و خواص لایه ارتجاعی باید طوری انتخاب شود که فرکانس طبیعی خط از ۱۸ هرتز فراتر نرود. کاهش فرکانس طبیعی در این سیستم‌های جرم و فنر متوسط تا ۱۵ هرتز نیز امکان‌پذیر است.

همان گونه که مشخص است، سازگاری کاملی بین معیارهای عملکردی (تغییرمکان، تنش در دال بتنی و غیره) و معیارهای ارتعاشی (فرکانس طبیعی و میرایی ارتعاش در فرکانس عملکردی) در صورت استفاده از مصالح ارتجاعی تمام مقطع پلی‌اورتان، قابل مشاهده است.

پیشنهاد می‌شود در مناطق با کاربری‌های حساس به ارتعاش، ضخامت لایه ارتجاعی به ۳۷ میلیمتر افزایش داده شود تا از انتقال نیافتن ارتعاشات مخرب به سازه‌های مجاور اطمینان حاصل شود.

Archive of SID
www.SID.ir

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق روشی برای تحلیل سیستم‌های جرم و فنر روسازی خطوط قطار سبک شهری ارایه شد. دو مقوله تحلیلی در ارتباط با خصوصیات عملکردی (ارتجاعی) و ارتعاشی در سیستم‌های مذکور به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند و پس از تعریف روابط و عواملی تعیین‌کننده، نمودار جریانی جهت محاسبه و رسم نمودارهای تغییرمکان بر حسب فاصله (w=f(s)) و میرایی ارتعاش بر حسب فرکانس عملکردی (I or K=f(f(Hz)) ارائه گردید و کاربرد روش پیشنهادی در تحلیل روسازی قطار شهری اصفهان نشان داده شد.

در انتها نیز نتایج کامل تحلیل ارتعاشی و ارتجاعی خط قطار شهری اصفهان که دارای معارضات و مستحدثات حساس به ارتعاش متعددی در طول خط است، و چگونگی تناسب المان ارتجاعی مورد استفاده با معیارهای ارتجاعی و ارتعاشی مفروض برای کاربرد قطار سبک شهری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله مبین کارآیی و قابلیت تطابق سیستم‌های جرم و فنر تمام مقطع در روسازی‌های قطار شهری و مترو است.

سازگاری دو معیار متناقض پایداری خط (تغییرمکان کنترل شده خط) و رفتار ارتعاشی سیستم (ایجاد بستر نرم خط و میرایی) در صورت بهره‌گیری از سیستم جرم و فنر تمام مقطع و انتخاب مصالح پلی‌اورتان به عنوان لایه ارتجاعی به آسانی قابل کسب می‌باشد و به این ترتیب بحث گذر خطوط ریلی از مجاورت ساختمان‌های تاریخی و میراث فرهنگی و مناطق مسکونی متراکم شهری و انتقال ارتعاشات تخریب‌کننده به سازه‌های مذکور با طراحی ارتعاشی سیستم جرم و فنر روسازی، برطرف می‌شود.

بر اساس نتایج این تحقیق پیشنهاد می‌شود که در کاربرد قطار سبک شهری، در صورت بکارگیری سیستم‌های جرم و فنر سبک یا متوسط با جرم فنربندی شده کمتر از ۸ تن بر متر، فرکانس طبیعی سیستم کمتر از ۱۸ هرتز طراحی شود.

از سوی دیگر بر اساس نتایج تحلیل ارتعاشی انجام گرفته (جدول ۵و٦) پیشنهاد می‌شود که به عنوان یک معیار طراحی ارتعاشی کاهش ارتعاش بیش از ۲۰ VdB در فرکانس عملکردی بیش از ۵۰ هرتز در سیستم‌های جرم و فنر روسازی مد نظر قرار گیرد.

٦. مراجع

1. Quante, F. (2001) "Innovative track systems technical construction report", Competitive and Sustainable Growth Program, European Community

2. Pichler, D. (1998) "Concrete based floating track slab systems, modeling and reality", In R. De Borst, N. Bicanic, H. Mang & G. Meschke (eds), Computational Modeling of Concrete Structures, 665-6871, Rotterdam, Balkema.

3. Wettschureck, R. (1999) "Installation of highly effective vibration mitigation measures in a railway tunnel, 6th International Congress on Sound and Vibration, 5-8 July 1999, CSV6, Copenhagen, Denmark.

4. Sadeghi J.M., Yoldashkhan M. (2005) "Development of a light mass-spring system for ground-borne vibration mitigation in Shiraz LRT line", First International Congress on Lightweight Material Construction and Earthquake Retrofitting, Ghom, 2005.

۵. میرمحمد صادقی، ج. ، یلداشخان، م. (۱۳۸٤) "استفاده از لایه‌های ارتجاعی سبک در سیستم روسازی راه‌آهن برای مقابله با انتقال ارتعاشات" ، کنفرانس بین‌المللی سبک‌سازی سازه‌ها، دانشگاه فنی مهندسی قم.

6. Transportation Research Program (1999) "Transit cooperative research, performance of direct-fixation track structures, design guidelines. Transportation Research Board.

7. Buda, R. (1996) "Elasticity in modern superstructures, system design aspects and typical components", Austria, Getzner Werkstoffe GmbH.

8. Pichler, D. (1997) "Reduction measures for railway lines", Report for RENVIB II Phase 1 to ERRI, Vienna Consulting Engineers.

Archive of SID
www.SID.ir

9. Wettschureck, R. (1995) "Vibration and structure-borne noise insulation by means of cellular polyurethane (PUR) elastomers in railway track applications", Rail Engineering International, No. 2: pp.7-14.

10. Bahrekazemi, M. and Bodare, A. (2002) "En Vib Report II, Parameters to be considered for a model developed for prediction of train-induced ground vibration", Div. of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

11. Bahrekazemi, M. and Hildebrand, R. (2000) "Ground vibration from railway traffic, a literature survey", KTH, Stockholm.

12. Clough R. W. and Penzien, J. (1993) "Dynamics of structures", Second International Edition, McGraw-Hill.

۱۳. یلداشخان، م. (۱۳۸۳) " اصول برآورد ارتعاش زمینی ناشی از قطارهای شهری و راهکارهای کاهش ارتعاش (جلد دوم گزارش بررسی ارتعاشی قطار شهری شیراز)"- مهندسین مشاورایمر- آبان.

۱٤- یلداشخان، م. (۱۳۸۳) "گزارش ارزیابی مقدماتی ارتعاشی محدوده چهار باغ اصفهان (جلد سوم گزارش بررسی ارتعاشی قطار شهری شیراز)"، مهندسین مشاور ایمر- آبان.

Archive of SID

www.SID.ir