

تحلیل عددی و فنی کفایت ریل و اثرگذاری لایه‌های الاستیک در زیرسازی بتنی قطارهای شهری (مطالعه موردی: خط قطار شهری شیراز)

مقاله علمی – پژوهشی

محمدرضا خاکباز^{*}، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
مرتضی نوروزی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
ندا کامبوزیا، استادیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
ماهان یلداشخان، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
^{*}پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Khakbaz9090@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷ – پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

صفحه ۴۸-۳۳

چکیده

بحث تحلیل و طراحی سازه‌های با دال بتنی در راه‌آهن، مترو و قطار شهری و تاثیر المان‌های مختلف در رفتار ارتعاشی و ارتعاشی این خطوط از اهمیت بالایی برخوردار است و به عنوان یک موضوع کلی در زمینه‌ی مهندسی راه‌آهن و سازه مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا در سال‌های اخیر، رویکردها و راهکارهای متعددی در جهت رسیدن به یک روش مطمئن و ساده از تحلیل و طراحی در این حوزه توسط بسیاری از محققین ارائه شده است. استفاده از روش سیستم‌های جرم و فنر در راه‌آهن، مترو و قطار شهری کاربردهای گسترده‌ای در این حوزه دارند. همچنین یکی از مباحث حائز اهمیت در تحلیل و طراحی خطوط ریلی، بحث انتخاب پروفیل ریل و بررسی کفایت سازه‌ای (مقاومتی) آن تحت بارهای وارده می‌باشد. ضمن اینکه ایجاد سازگاری بین معیارهای عملکردی و ارتعاشی روسازی بتنی خطوط ریلی در راستای رسیدن به خطی با دوام و پایدار، تحت نیروهای دینامیکی بهره‌برداری موضوع بسیار مهمی است. در این مقاله ضمن معرفی روش‌های متداول در تحلیل و کنترل پروفیل ریل در خطوط با دال بتنی، به ارائه نتایج تحلیل ریل در خط قطار شهری شیراز و نمایش تاثیر استفاده از لایه‌های ارتعاشی بر روی آن پرداخته می‌شود. بر اساس نتایج تحلیل ارتعاشی انجام گرفته در این تحقیق، پیشنهاد می‌گردد که کاهش ارتعاش بیش از ۲۰ دسی‌بل در فرکانس عمکردی بیش از ۵۰ هرتز در سیستم‌های جرم و فنر خطوط ریلی در قطار شهری در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: قطار شهری، ریل، تحلیل زیمرمن، سیستم جرم و فنر، ارتعاش

۱- مقدمه

جانبی (نیروی افقی و عمود بر راستای خط) و نیروهای طولی (نیروی افقی و در راستای خط) قرار می‌گیرند. علاوه بر آن می‌توان نیروهای وارده بر خط را به دو بخش استاتیکی و دینامیکی تقسیم‌بندی نمود و باید توجه داشت که ماهیت نیروهای قائم و جانبی وارده بر خط‌آهن، دینامیکی است

یافتن شرایط بارگذاری و تدوین مدلی برای آن، پیش‌نیاز تحلیل و طراحی هر سازه‌ای از جمله خطوط راه‌آهن است. طبقه‌بندی نیروهای وارده بر خطوط راه‌آهن از نظر راستا و جهت اعمال نیرو متداول‌ترین شیوه‌ای است که بر اساس آن نیروهای مختلف وارد بر خطوط راه‌آهن در سه دسته نیروهای قائم،

(میرمحمدصادقی، ۱۴۰۰). تحلیل خطوط ریلی همواره با عدم قطعیت‌های بسیاری روبرو بوده است (نادران و همکاران، ۱۴۰۱). ارائه یک مدل جهت تخمین دقیق رفتار خطوط ریلی در سیستم‌های سازه‌ای بالاستی و بدون بالاست همواره با صعوبت بسیار همراه می‌باشد. این موضوع در خطوط بالاستی به علت وجود یک لایه سنگ‌دانه‌ای به ضخامت حداقل ۳۰ سانتی‌متر در زیر تراورس از صعوبت بیشتری برخوردار می‌باشد. در خطوط بدون بالاست، با عنایت به استفاده از مصالح صلب با رفتار روشن‌تر، تخمین رفتار آسان‌تر به نظر می‌رسد، با این حال مدل‌سازی دینامیکی این سیستم‌های سازه‌ای نیز مشکلات مخصوص به خود را دارد. روسازی‌های بدون بالاست قطارهای شهری بر خلاف روسازی بالاستی قطارهای سنگین بین‌شهری بصورت تیپ نبوده و سیستم روسازی مذکور به عنوان یک سازه با عملکردهای الاستیک و ارتعاش خاص طراحی می‌شوند. در این مقاله تحلیل سیستم خط بدون بالاست به دو منظور انجام خواهد پذیرفت. در وهله اول هدف تعیین تنش درون ریل‌های مورد استفاده ناشی از اعمال بارهای محوری ۱۰ الی ۱۴/۵ تن می‌باشد. در وهله دوم هدف بررسی ارتعاشی و ارتجاعی سیستم، و بررسی فنی و اقتصادی استفاده از لایه‌های ارتجاعی در قسمت تحتانی دال بتنی مورد استفاده در سیستم سازه‌ای خط قطار شهری شیراز می‌باشد (میرمحمدصادقی و یلداشخان، ۱۳۸۵؛ لم و همکاران، ۱۳۹۹). بطورکلی در این گونه مسائل دو روش برخورد متصور می‌باشد. در روش برخورد آکادمیک، معمولاً با استفاده از مدل‌های رایانه‌ای اجزای محدوده یا اجزای مجزا کل سیستم سازه‌ای خط به همراه اثر متقابل با وسیله نقلیه مدل شده و نتایج حاصل از تحلیل مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روش بسیار پیچیده، هزینه‌بر و زمان‌بر است و معمولاً انحراف زیادی از روش دیگر مورد استفاده (روش عملی) معمولاً از روش‌های استاندارد شده استفاده می‌گردد (میرمحمدصادقی، یلداشخان و هیرماس، ۱۳۸۴).

یکی از رایج‌ترین شیوه‌های مدل‌سازی و آنالیز شمع‌ها، شالوده‌ها و روسازی راه و راه‌آهن، استفاده از تئوری فنرهای ارتجاعی وینکلر و زیمرمن می‌باشد که این تئوری، خاک را به صورت مجموعه‌ای از فنرهای مجزا در نظر گرفته و بدین صورت تغییر مکان نقطه اثر بار را متناسب با بار اعمالی در نظر

می‌گیرد. استفاده از فرضیه تکیه‌گاه‌های پیوسته اگرچه به عنوان فرضیه‌ای ساده بوده و دور از واقعیت نیست اما در عمل ریل‌ها در فواصل مشخصی بر روی تراورس‌ها قرار می‌گیرند. لذا لزوم بررسی فرضیه تیر بر روی بستر ارتجاعی مجزا و مقایسه آن با حالت پیوسته اجتناب ناپذیر می‌باشد. نخستین گام در زمینه تحلیل ریل، انتخاب مدل مناسبی است که با دقت کافی قادر به شبیه‌سازی شرایط تکیه‌گاهی و مرزی این عضو باشد. مدل تیر بر روی بستر ارجاعی پیوسته، معروف‌ترین و کاربردی‌ترین مدل تحلیل ریل بشمار می‌آید (میرمحمدصادقی، ۱۴۰۰؛ کارمان، ۱۳۹۱؛ یلس و دیگران، ۱۴۰۲؛ پراکوسو، ۱۳۹۰؛ پیندا و کانولی، ۱۴۰۱). مدل‌های عملی مدل‌های ساده‌ای می‌باشند که از نتایج تحلیل‌های گسترده و مقایسه نتایج با اندازه‌گیری‌های میدانی حاصل می‌گردند. این مدل‌های در تحلیل سازه‌های فولادی و بتنی به علت سادگی و سرعت در تحلیل نتایج از مقبولیت بسیاری برخوردار می‌باشند و در دستورالعمل‌های طراحی یافت می‌شوند. در خصوص مدل عملی مورد استفاده در این مقاله به راهنمای طراحی سیستم‌های بدون بالاست با اتصال مستقیم استفاده خواهد شد. در این دستورالعمل طراحی جهت تخمین تنش، تغییر مکان و دوران ریل از مدل تیر بر بستر ارتجاعی زیمرمن استفاده گردیده است. به تبعیت از این دستورالعمل، در این مقاله نیز از مدل تیر بر بستر ارتجاعی جهت تحلیل خط استفاده خواهد گردید (نوروزی، یلداشخان و خاکباز، ۱۴۰۱). هدف از این مقاله، تحلیل سیستم زیرسازی بتنی قطار شهری شیراز به منظور تعیین تنش درون ریل‌های مورد استفاده ناشی از اعمال بارهای محوری موردنظر و همچنین بررسی ارتعاشی و ارتجاعی سیستم، و بررسی فنی استفاده از لایه‌های ارتجاعی پلی‌اورتان در قسمت تحتانی دال بتنی در سیستم سازه‌ای خط قطار شهری شیراز می‌باشد. بدین ترتیب در ابتدا مروری بر انواع مدل‌های ارائه شده برای خط با استفاده از تیر بر بستر ارتجاعی خواهد گردید و سپس مدل برگزیده و نتایج تحلیل و پیشنهادات در خصوص پروفیل ریل و لایه‌های ارتجاعی در خط قطار شهری شیراز ارائه خواهد گردید و نهایتاً نتایج مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

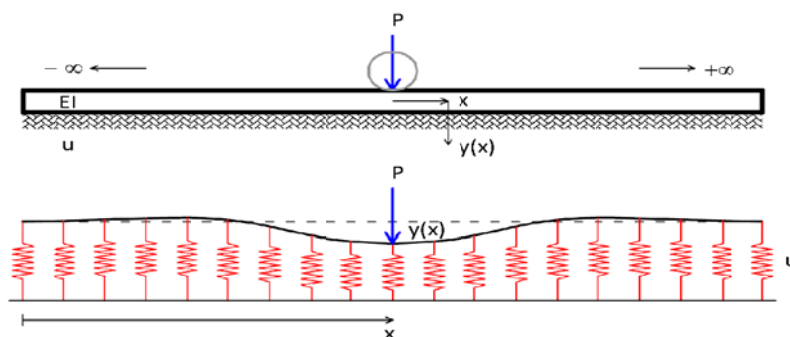
۲- انواع مدل‌های تیر بر بستر ارتجاعی

در توسعه معادلات حاکم بر روش تحلیل تیر بر روی بستر ارتجاعی پیوسته، بکار می‌رود (میرمحمدصادقی، ۱۴۰۰).

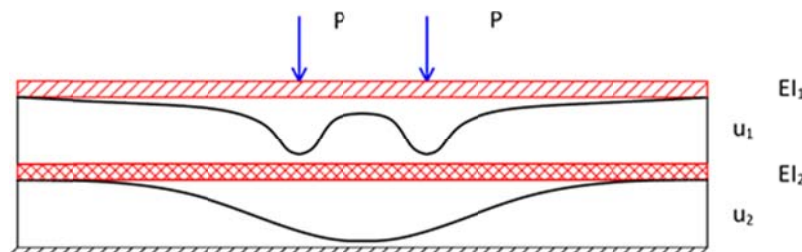
با وجود آن که مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی پیوسته، جهت درک رفتار عمومی سازه خط‌آهن کافی به نظر می‌رسد، اما مواردی را نیز می‌توان مثال زد که در آنها شرایط خاص سازه‌های خط و یا حتی نوع مجهولی که یافتن مقدار آن مدنظر است، کاربرد مدلی با دقت و سازگاری بیشتر با شرایط خاص یک مسأله را ضروری می‌سازد. به عنوان نمونه، زمانی که هدف طراح، بررسی رفتار هر یک از صفحات لاستیکی زیر ریل و یا بستر بتنی خط آهن در خطوط بدون بالاست می‌باشد، دیگر شکل ساده‌ای که تاکنون از مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی پیوسته معرفی گردید، نمی‌تواند جوابگوی چنین مسأله‌ای باشد. در این مواقع می‌توان از یک مدل دو لایه که به مدل تیر دوگانه شهرت دارد، استفاده نمود (میرمحمدصادقی، ۱۴۰۰).

بطور کلی پنج مدل استاتیکی و دینامیکی تیر بر بستر ارتجاعی متصور می‌باشد. مدل‌های مذکور در نمودار جریان شکل ۳ نمایش داده شده‌اند. در این مقاله تنها تیر استاتیکی ساده مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که این روش به عنوان روش استاندارد در تحلیل خطوط بدون بالاستی مطرح می‌باشد.

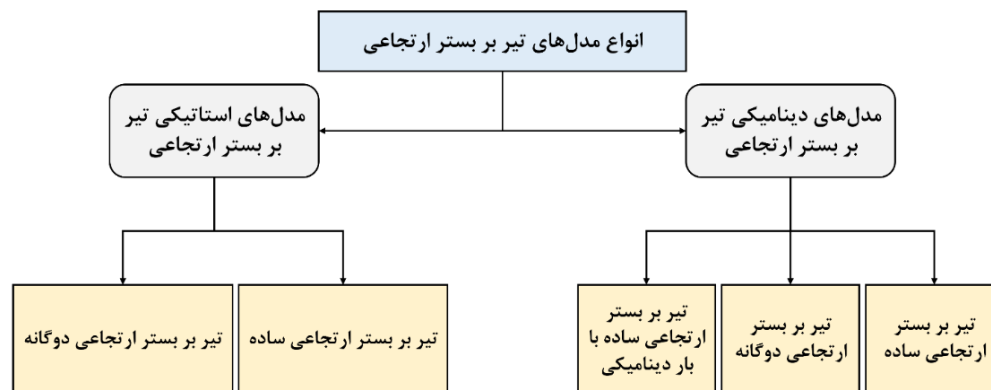
شاید بتوان نخستین گام در زمینه تحلیل ریل را انتخاب مدل مناسبی دانست که با دقت کافی قادر به شبیه‌سازی شرایط تکیه‌گاهی و مرزی این عضو باشد. مدل تیر بر بستر ارتجاعی پیوسته به عنوان معروف‌ترین و کاربردی‌ترین مدل تحلیل ریل می‌باشد. روش تحلیل تیر بر روی بستر ارتجاعی پیوسته نخستین بار توسط وینکلر در سال ۱۸۶۷ ارائه گردید و سپس در سال ۱۸۸۷ توسط زیمرمن توسعه یافت. همانگونه که در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده، بررسی رفتار ارتجاعی و محاسبه تغییر مکان قائم در روش تحلیل تیر بر روی بستر ارتجاعی پیوسته، بر این فرض اساسی استوار است که میزان تغییر شکل در هر نقطه از تیر (ریل) متناسب با میزان فشار تماسی وارد از بستر ارتجاعی زیر تیر در همان نقطه خواهد بود. معمولاً به منظور بیان ریاضی این تناسب، از پارامتری به عنوان ضریب تکیه‌گاهی بستر ارتجاعی استفاده می‌شود. تاکنون سه شیوه متفاوت و در عین حال وابسته به یکدیگر برای تعریف ضریب تکیه‌گاهی بستر ارتجاعی در مراجع مهندسی راه‌آهن ارائه شده است. بطوریکه یکی از سه مفهوم سختی بستر ریل بر حسب نیوتون بر میلی‌متر، مدول بستر ریل بر حسب نیوتون بر میلی‌متر مربع و ضریب واکنش بستر بر حسب نیوتون بر میلی‌متر مکعب



شکل ۱. مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی پیوسته (میرمحمدصادقی، ۱۴۰۰)



شکل ۲. مدل ریل بر روی تکیه‌گاه پیوسته (میرمحمدصادقی، ۱۴۰۰)



شکل ۳. انواع مدل‌های تیر بر بستر ارتجاعی مورد استفاده در تحلیل روسازی خطوط ریلی (نوروزی، یلداشخان و خاکباز، ۱۴۰۱)

مدل استاتیکی تیر بر بستر ارتجاعی ساده

که در آن:

$$\eta(x) = e^{-\frac{x}{L}} \left[\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right] \quad (5)$$

$$\mu(x) = e^{-\frac{x}{L}} \left[\cos \frac{x}{L} - \sin \frac{x}{L} \right] \quad (6)$$

و $w(x)$ تغییر مکان ریل به میلی‌متر (مثبت به سمت پایین) و L طول مشخصه ریل به میلی‌متر می‌باشد که از رابطه

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} = \sqrt[4]{\frac{4EIa}{CA}}$$

مورد استفاده عبارتند از a : فاصله بین تراورس‌ها (میلی‌متر)، C :

مدول بستر (نیوتون بر میلی‌متر مکعب)، k مدول خط $(N/mm/mm)$ ، سطح تماسی معادل خط با دال بتنی برابر نصف عرض خط (میلی‌متر مربع)، EI سختی خمشی ریل و دال بتنی (نیوتون بر میلی‌متر مربع)، و Q بار یک چرخ به نیوتن می‌باشد. شکل ۴ مقادیر کلیدی نمودار لنگر و تغییر مکان تحت بار منفرد را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، مقادیر بیشینه لنگر و تغییر مکان دقیقاً در زیر بار متمرکز وجود می‌آیند. اثر سایر بارها بصورت منفی با مقادیر بدست آمده جمع جبری می‌شوند و معمولاً اثرکاهنده دارند.

در این مدل یک تیر به طول بینهایت با سختی خمشی EI بر روی یک بستر ارتجاعی با مدول بستر k فرض می‌گردد. این روش به عنوان روش استاندارد در دستورالعمل طراحی خطوط بدون بالاست با اتصال مستقیم مطرح گردیده است. معادله دیفرانسیل این روش به شرح زیر می‌باشد:

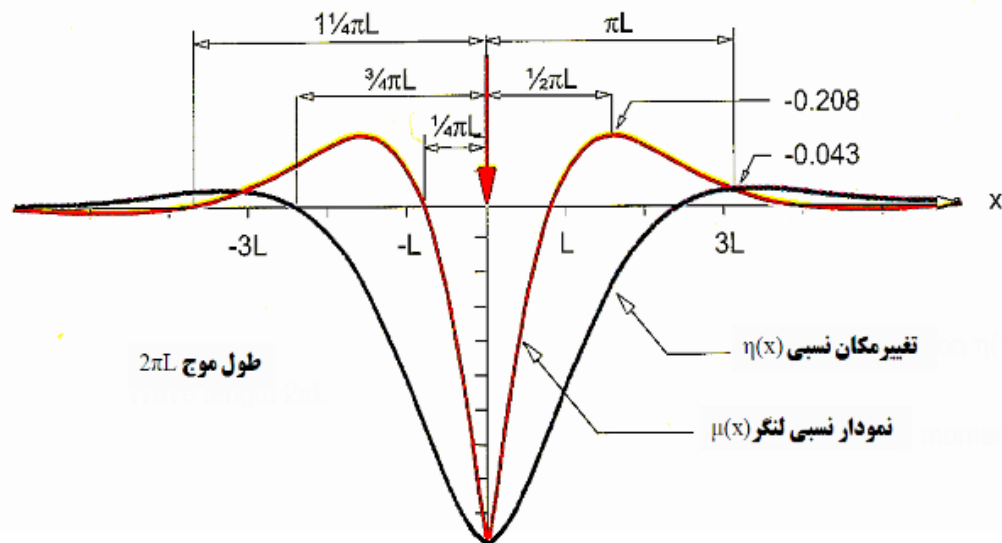
$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + kw = q(x) \quad (1)$$

حل تحلیلی رابطه دیفرانسیل (۱) به آسانی قابل محاسبه می‌باشد. توابع نیرو، تغییر مکان و لنگر خمشی (جواب عمومی رابطه (۱)) به شرح زیر می‌باشد:

$$p(x) = \frac{Q}{2L} \eta(x) \quad (2)$$

$$M(x) = \frac{QL}{4} \mu(x) \quad (3)$$

$$w(x) = \frac{Q}{2kL} \eta(x) \quad (4)$$



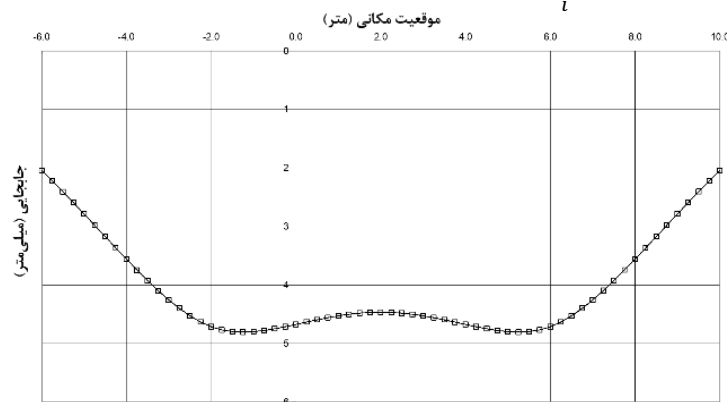
شکل ۴. تغییر مکان نسبی و لنگرهای خمشی در مدل تیر بر بستر ارتجاعی ساده (نوروزی و دیگران، ۱۴۰۱، نوروزی، یلداشخان و خاکباز، ۱۴۰۱)

شکل ۵ نیز نمایی از تغییر مکان خط تحت دو بار متمرکز، نمودار برش و نمودار لنگر را در سیستم روسازی بتنی دارای تکیه‌گاه‌های ارتجاعی تمام مقطع را نمایش می‌دهد. در شکل ۳ بار محوری ۱۲/۵ تن، مدول بستر برابر ۰/۰۰۳۵۵ مگانیوتن بر متر مکعب، فاصله محورهای وسیله نقلیه برابر ۸/۰ متر، ضخامت دال برابر ۴۵ سانتی‌متر و عرض مؤثر برابر ۱۳۰۰ میلی‌متر فرض گردیده است. در گراف‌های ارائه شده در شکل‌های ۵ الی ۷، محور افقی فاصله (متر) و محور قائم کمیت (تغییر مکان، برش یا لنگر) می‌باشد.

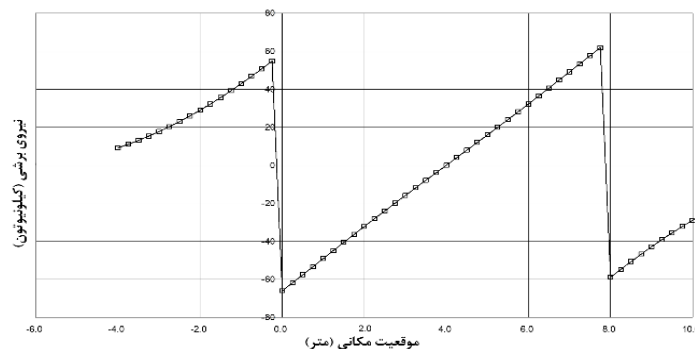
روابط اشاره شده فوق مربوط به یک بار منفرد می‌باشد. تخمین بزرگی لنگر و تغییر مکان بر اساس اصل برهم‌نهی حاصل می‌گردد. در این صورت مقادیر تغییر مکان و لنگر خمشی در فاصله l_i از مبدا مختصات (که معمولاً در زیر یک چرخ یا در فاصله وسط دو چرخ انتخاب می‌گردد)، از روابط زیر حاصل می‌گردند.

$$M_o = \frac{L}{4} \sum_i Q_i \mu(l_i) \quad (7)$$

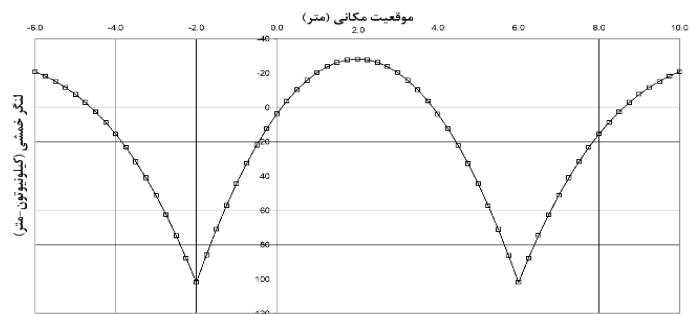
$$w_o = \frac{1}{2kL} \sum_i Q_i \eta(l_i) \quad (8)$$



شکل ۵. نمودار تغییر مکان دال بتنی قطارهای شهری دارای تکیه‌گاه الاستیک تمام مقطع



شکل ۶. نمودار برش دال بتنی قطارهای شهری دارای تکیه‌گاه الاستیک تمام مقطع



شکل ۷. نمودار لنگر خمشی دال بتنی قطارهای شهری دارای تکیه‌گاه الاستیک تمام مقطع

قطار شهری شیراز در گروه خطوط با دال بتنی یکپارچه و تراورس‌های مدفون با تکیه‌گاه‌های ریل مجزا قرار دارد. از لحاظ تکیه‌گاه ارتجاعی زیر دال خط نیز، قطار شهری شیراز در گروه خطوط با تکیه‌گاه ارتجاعی تمام مقطع قرار دارد (نوروزی، یلداشخان و خاکباز، ۱۴۰۱).

۴- مشخصات ریل‌های مورد استفاده

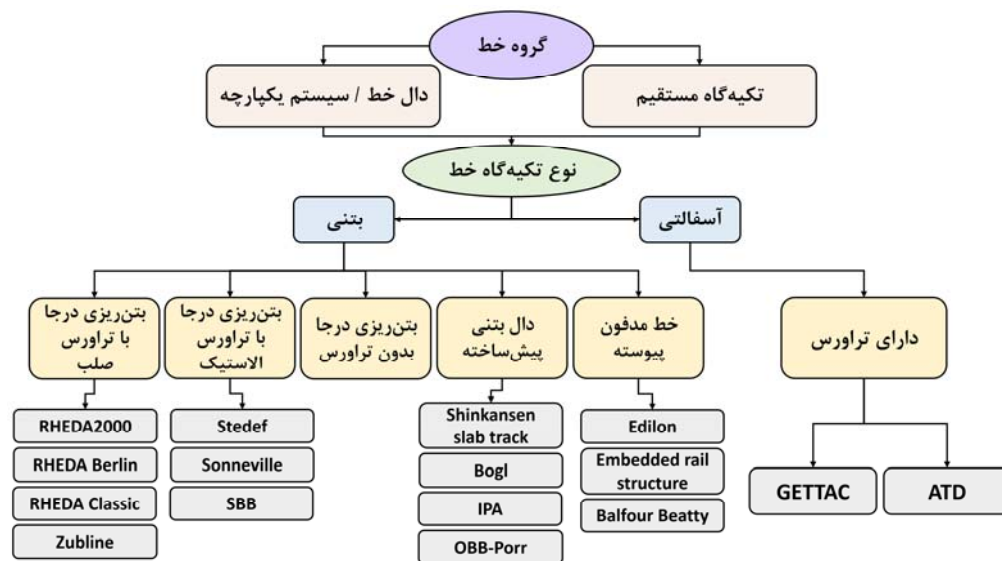
۴-۱- مشخصات هندسی

در این مقاله جهت نمایش کفایت باربری ریل‌های سبک S49، به مقایسه خواص مقاومتی و تغییر مکان سه پروفیل متداول ریل در خطوط ریلی پرداخته می‌شود. جدول ۱ خلاصه‌ای از مشخصات هندسی ریل‌های UIC60، UIC54 و S49 مورد استفاده در تحلیل را نمایش می‌دهد. مشخصات هندسی ریل شامل مقطع ریل، ارتفاع مقطع، عرض قارچ ریل، عرض نشیمنگاه، مساحت، جرم واحد طول، ممان اینرسی حول محور قوی، ممان اینرسی حول محور ضعیف، مدول مقطع نسبت به تار خنثی، مدول مقطع نسبت به تار پایین نشیمنگاه و مدول مقطع حول محور ضعیف می‌گردد.

استفاده از این روش، آسان می‌باشد و نتایج حاصل از تحلیل آن نیز به مقادیر واقعی بدست آمده از آزمایشات میدانی نزدیک می‌باشد. با عنایت به سهولت استفاده و دقت مناسب آیین‌نامه‌های طراحی خطوط بدون بالاست این روش را به عنوان روشی استاندارد مطرح نموده‌اند. مدل تحلیلی اشاره شده، برای تمامی سیستم‌های روسازی بتنی مناسب نمی‌باشد. تناسب فرضیات سیستم مذکور در مواردی قابل توجه می‌باشد که یک لایه ارتجاعی بصورت تمامی مقطع در زیر دال خط پیش‌بینی گردد. استفاده از این مدل تیر بر بستر ارتجاعی (بدون انجام اصلاحات بر روی مدل) در سیستم‌های دارای تکیه‌گاه‌های الاستیک مجزا یا خطی پیشنهاد نمی‌شود.

۳- نوع روسازی بتنی قطارهای شهری شیراز

روسازی خطوط ریلی بسته به نوع کاربری، دارای تنوع بسیاری است (میرمحمدصادقی و یلداشخان، ۱۳۸۵؛ کوانت، ۱۳۸۰). شکل ۸ نمایی از انواع سیستم‌های روسازی بتنی مورد استفاده در خطوط ریلی را نمایش می‌دهد (میرمحمدصادقی، اسماعیلی و اکبری، ۱۳۹۷؛ فرناندز و دیگران، ۱۴۰۱؛ ایدجک و دیگران، ۱۴۰۱؛ کامبوزیا و خاکباز، ۱۴۰۲). سیستم روسازی



شکل ۸. انواع سیستم‌های روسازی بتنی مورد استفاده در خطوط ریلی (میرمحمدصادقی، اسماعیلی و اکبری، ۱۳۹۷؛ فرناندز و دیگران، ۱۴۰۱؛

ایدجک و دیگران، ۱۴۰۱؛ کامبوزیا و خاکباز، ۱۴۰۲)

جدول ۱. مشخصات اصلی هندسی پروفیل‌های ریل (میرمحمدصادقی، ۱۴۰۰)

مقطع ریل	واحد	S49	UIC 54	UIC60
ارتفاع مقطع	mm	۱۴۹	۱۵۹	۱۷۲
عرض قارچ ریل	mm	۶۷	۷۰	۷۲
عرض نشیمنگاه	mm	۱۲۵	۱۴۰	۱۵۰
مساحت	cm ²	۶۳	۶۹/۳	۷۶/۹
جرم واحد طول	kg/m	۴۹/۴	۵۴/۴	۶۰/۳
ممان اینرسی حول محور قوی	cm ⁴	۱۸۱۹	۲۳۴۶	۳۰۵۵
ممان اینرسی حول محور ضعیف	cm ⁴	۳۲۰	۴۱۸	۵۱۳
مدول مقطع نسبت به تار خنثی	cm ³	۲۴۰	۲۷۹	۳۳۶
مدول مقطع نسبت به تار پایین نشیمنگاه	cm ³	۲۴۸	۳۱۳	۳۷۷
مدول مقطع حول محور ضعیف	cm ³	۵۱/۲	۶۰	۶۸

۴-۲- مشخصات مکانیکی

نمونه‌های آزمایشی تعریف می‌شود. اعداد جدول ۲ از داده‌های ارائه شده توسط تولیدکنندگان ریل اقتباس گردیده است.

۴-۳- سایر مشخصات

جدول ۳، سایر مشخصات مکانیکی و فیزیکی مورد استفاده در تحلیل و مربوط به فولاد ریل را نمایش می‌دهد. این مشخصات شامل مدول الاستیسیته، ثابت پواسون، ثابت انبساط حرارتی و چگالی است.

جدول ۲ مشخصات مکانیکی را در دو گرید ریل ۷۰۰ و ۹۰۰ نمایش می‌دهد. ریل‌های مورد استفاده در قطار شهری شیراز از گرید ۹۰۰ انتخاب می‌باشند. در خصوص تنش مجاز خستگی نیز رویکردهای زیادی متصور می‌باشد. ستون مربوط به تنش‌های خستگی جدول ۲ با عنایت به دیاگرام Smith درج گردیده‌اند. از آنکه که ریل‌ها در زمره فولادهای با مقاومت بالا می‌باشند، تنش تسلیم فولاد ریل معادل با کرنش مشخص در

جدول ۲. مشخصات مکانیکی ریل‌های گرید ۷۰۰ و ۹۰۰ (میرمحمدصادقی، ۱۴۰۰)

تنش خستگی بارهای تکراری (نیوتون بر میلی‌متر مربع)	تنش خستگی بارهای اتفاقی (نیوتون بر میلی‌متر مربع)	تنش‌های ثابت موجود در پروفیل ریل (نیوتون بر میلی‌متر مربع)		مقاومت تسلیم (نیوتون بر میلی‌متر مربع)	مقاومت کششی (نیوتون بر میلی‌متر مربع)
		تنش حرارتی	تنش پسماند		
۵۵	۴۵۰	۱۰۰	۲۲۰	۴۵۰	۷۰۰
۲۲۰	۵۸۰	۱۰۰	۲۲۰	۵۸۰	۹۰۰

جدول ۳. سایر مشخصات مکانیکی و فیزیکی فولاد ریل (میرمحمدصادقی، ۱۴۰۰)

مقدار	واحد	شاخص
۲۱۰	کیلوگرم بر میلی‌متر مربع	مدول الاستیسیته
۰/۳	-	ثابت پواسون
۰/۰۰۰۰۱۱۵	بر درجه سانتی‌گراد	ثابت انبساط حرارتی
۷۸۵۰	کیلوگرم بر متر مکعب	چگالی

جدول ۴. مقادیر تغییر مکان و سایر اندیس‌های حاصل از تحلیل تیر بر بستر ارتجاعی

ثابت فنریت لایه الاستیک جانبی (کیلو نیوتون بر میلی‌متر)	ثابت فنریت استاتیک (نیوتون بر میلی‌متر مکعب)	نرخ فنر استاتیک (کیلو نیوتون بر میلی‌متر)	اندیس خمش پایه (میلی‌متر)		تغییر مکان ریل (میلی‌متر)		فشار استاتیک بر روی لایه ارتجاعی (نیوتون بر میلی‌متر مربع)		بار محوری (تن)
			استاتیک	دینامیک	استاتیک	دینامیک	بار بهره‌برداری	فقط خط	
۱/۴۳۳	۰/۰۰۴۶۷	۳/۶۵	۳۶۵۵	۳۴۹۲	۱/۸۲	۲/۱۰	۰/۰۲۱۹	۰/۰۱۲	۱۰
۱/۴۳۳	۰/۰۰۳۸۴	۳/۴۹	۳۸۴۰	۳۶۶۹	۲/۶۶	۳/۰۷	۰/۰۲۳۷	۰/۰۱۲	۱۲/۵
۱/۴۳۳	۰/۰۰۴۷۳	۴/۳	۳۶۴۵	۳۴۸۳	۲/۵۳	۲/۹۲	۰/۰۲۱۹	۰/۰۱۲	۱۴
توضیح: ارتفاع پروفیل ارتجاعی جانبی برابر ۲۵۰ میلی‌متر (تونل‌های عمیق) می‌باشد.									

جدول ۵. مقادیر تغییر مکان و سایر اندیس‌های حاصل از تحلیل تیر بر بستر ارتجاعی

بار محوری (تن)	فشار استاتیک بر روی لایه ارتجاعی (نیوتون بر میلی متر مربع)		تغییر مکان ریل (میلی متر)		اندیس خمش پایه (میلی متر)		نرخ فنر استاتیک (کیلو نیوتون بر میلی متر)	ثابت فنریت استاتیک (نیوتون بر میلی متر مکعب)	ثابت فنریت لایه الاستیک جانبی (کیلو نیوتون بر میلی متر)
	فقط خط	بار بهره‌برداری	استاتیک	دینامیک	استاتیک	دینامیک			
۱۰	۰/۰۱۲	۰/۰۲۱۹	۲/۱۰	۱/۸۲	۳۶۵۵	۳۴۹۲	۳/۶۵	۰/۰۰۴۶۷	۲/۰۶۳
۱۲/۵	۰/۰۱۲	۰/۰۲۳۳	۲/۹۹	۲/۵۹	۳۸۰۷	۳۶۳۷	۳/۶۲	۰/۰۰۳۹۷	۲/۰۶۳
۱۴	۰/۰۱۲	۰/۰۲۲	۲/۹۵	۲/۵۶	۳۶۵۷	۳۴۹۴	۴/۲۴	۰/۰۰۴۶۶	۲/۰۶۳

توضیح: ارتفاع پروفیل ارتجاعی جانبی برابر ۲۵۰ میلی متر (تونل‌های عمیق) می‌باشد.

۵- نتایج تحلیل

۵-۱- تنش و تغییر مکان ریل

جدول‌های ۴ و ۵ خلاصه‌ای از مقادیر بدست آمده پس از تحلیل تحت بارهای محوری ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۴ تن با تغییر مشخصات روسازی را نمایش می‌دهد.

در خصوص دو جدول شماره ۴ و ۵ موارد زیر را متذکر می‌شود:

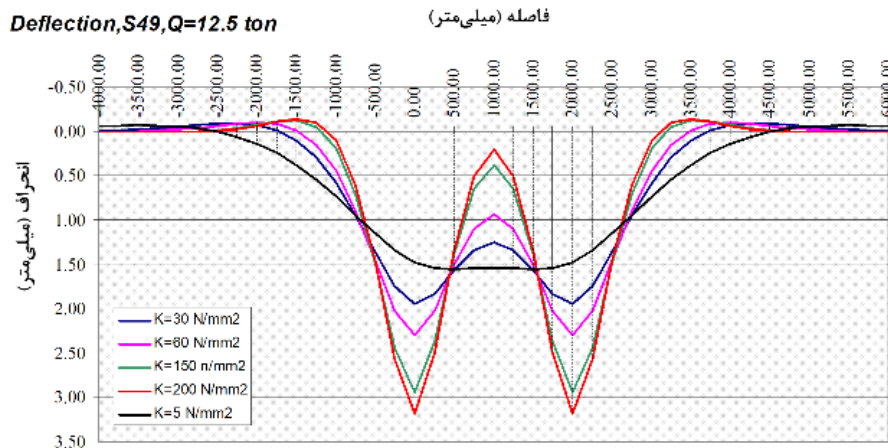
- در زیر ریل از پدهای لاستیکی استفاده می‌گردد و فرض می‌گردد به خاصیت ارتجاعی و ارتعاشی آنها قابل چشم‌پوشی می‌باشد و بنابراین ثابت فنر آنها در محاسبات مد نظر قرار نگرفته است. در صورت استفاده از پدهای نرم، پیشنهاد می‌شود از مدل تیر بر بستر ارتجاعی دوگانه استفاده نمود.

- تغییر مکان ارائه شده در فوق، برابر تغییر مکان کل سیستم می‌باشد و تنها تغییر مکان ریل را شامل نمی‌شود.

- مقدار پایه برای طول خمشی ریل‌ها (L) برابر ۰/۲۵ طول کل خط خمش تحت بار می‌باشد. این شاخص نمایانگر تنش در ریل (قسمت بعدی مقاله) می‌باشد. بدین صورت که تنش در ریل بستگی به بزرگی طول خمش دارد نه حداکثر تغییر مکان قائم بر روی سیستم. به عنوان مثال حالتی را فرض می‌شود که برابر ۵۰۰ میلی‌متر باشد، این بدان معنا است که طول خط خمشی برابر ۲۰۰۰ میلی‌متر بوده و سیستم سخت می‌باشد. حال حالتی در نظر گرفته می‌شود که مقدار پایه خط خمش برابر ۱۰۰۰ میلی‌متر شود. در این حالت طول کل خط خمش برابر

۴۰۰۰ میلی‌متر حاصل می‌گردد و سیستم نرم می‌باشد. به علاوه فرض می‌شود که تغییر مکان ریل در هر دو حالت برابر ۳ میلی‌متر شود. حال از آنجا که طول خط خمش در حالت دوم (سیستم نرم) دو برابر حالت اول (سیستم نرم) می‌باشد، تنش ریل در حالت دوم برابر نصف حالت اول می‌باشد. این مورد یکی از توجیحات مهم بکارگیری سیستم‌های نرم در روسازی بدون بالاست (دال بتنی) می‌باشد. متذکر می‌شود که در صورت استفاده از پروفیل‌های ریل S49 ملزم به استفاده از سیستم نرم خواهیم بود و از آنجا که سیستم پابند سخت (پدهای معمولی لاستیکی) انتخاب گردیده‌اند، ملزم به استفاده از لایه‌های ارتجاعی در زیر دال خط جهت جلوگیری از افزایش تنش در پروفیل‌های ریل خواهیم بود (علاوه بر کاربری میرایی ارتعاش لایه‌های ارتجاعی که در ادامه ارائه می‌گردد).

در محاسبه تنش و تغییر مکان ریل، یکی از پارامترهای بسیار تاثیرگذار، مدول خط می‌باشد. مدول خط علاوه بر کنترل بزرگی تغییر مکان بر شکل منحنی تغییر مکان نیز موثر می‌باشد. همانطور که در شکل زیر نیز مشخص می‌باشد، منحنی نشست در خطوط بدون بالاست کاسه‌ای می‌باشند، که خود از تمرکز تنش ریل و پخش تنش در طول ریل نقش شایان توجهی دارد. بدین منظور، مدول خط (با استفاده از لایه ارتجاعی زیرین دال) باید به گونه‌ای تنظیم گردد که علاوه بر کنترل تغییر مکان و میرایی ارتعاش شکل کاسه‌ای تغییر مکان را حفظ نماید.



شکل ۹. نمایی از منحنی تغییر مکان با تغییر سختی خط

۵-۱-۱- تنش ریل

بر اساس رابطه ارائه توسط زیمرمن، تنش ریل از رابطه زیر قابل حصول می‌باشد:

$$S = 1 + \frac{V+40}{140}, \quad (V \geq 60 \text{ Km/h}) \quad (9)$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{K}} \quad (10)$$

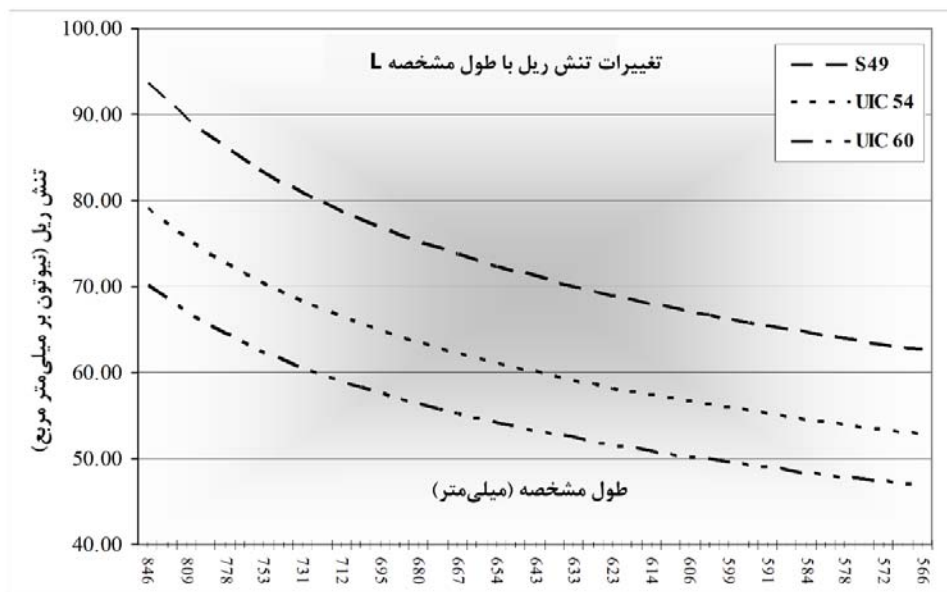
$$\sigma_{mean} = \frac{QL}{4W_{yf}} \quad (11)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{mean}[1 + t \times S] \quad (12)$$

که در آن K مدول خط، E مدول الاستیسیته فولاد، I ممان اینرسی مقطع ریل، L طول مشخصه، W مدول مقطع ریل نسبت به تار کششی نشیمنگاه ریل، t ضریب افزایش که به منظور ایمنی حمل و نقل ریلی به کار می‌رود و S ضریب تغییرات تنش تئوری نسبت به تنش واقعی. در این مقاله با عنایت به نوع سیستم روسازی و ترافیک مسافری خط ضریب افزایش دینامیکی را برابر ۲ در نظر می‌گیریم و خواهیم داشت:

$$\sigma_{max} = 2 \sigma_{mean} \quad (13)$$

شکل ۱۰ نمایی از تنش ریل را بر حسب نوع پروفیل ریل و طول مشخصه L نمایش می‌دهد.



شکل ۱۰. تنش ریل σ_{mean} بر حسب نوع پروفیل ریل و تغییر سختی خط (نوروزی، یلداشخان و خاکباز، ۱۴۰۱)

۵-۲- میرایی ارتعاش

استفاده از لایه‌های ارتجاعی در زیر دال بتنی، علاوه بر ایجاد خاصیت الاستیک و ارتجاعی برای خط ریلی، میرایی ارتعاش نیز فراهم خواهد نمود.

در واقع دلیل اصلی استفاده از لایه‌های ارتجاعی در زیر دال خط، فراهم‌آوری میرایی ارتعاش در فرکانس‌های مختلف (خصوصاً فرکانس‌های بین ۵۰ تا ۱۰۰ هرتز) می‌باشد.

جدول ۶ خصوصیات جذب ارتعاش سیستم در تونل‌های حفر و پوشش را در صورت استفاده از لایه‌های ارتجاعی در نمایش می‌دهند.

در این خصوص دو معیار اصلی متصور می‌باشد. در ابتدا باید توجه داشت که فرکانس طبیعی خط با در نظرگیری جرم فنربندی نشده قطار (چرخ و محور) باید کمتر از ۲۰ هرتز و ترجیحاً حدود ۱۷ هرتز باشد. به عنوان معیار دوم باید در نظر داشت که میرایی ارتعاش روسازی باید حداقل برابر ۲۰ دسی‌بل در فرکانس عملکردی سیستم باشد. باید توجه داشت که فرکانس طبیعی سیستم در حالت قطار در حال حرکت، با افزایش بار محوری به میزان ناچیزی کاهش می‌یابد که این موضوع به رفتار ارتجاعی سیستم و تأثیرات بار محوری در سیستم جرم و فنر و عملکرد میرایی آن مربوط می‌شود.

در صورت استفاده از لایه‌های ارتجاعی پلی‌اورتان مجوف (سیلومر)، معیارهای نام برده برآورده می‌شوند. باید توجه نمود که همواره باید تعادلی بین خواص میرایی ارتعاش (سیستم نرم) و خواص عملکردی و تنش خستگی (سیستم سخت) ایجاد نمود. در صورت استفاده از لایه‌های ارتجاعی پلی‌اورتان این خواص به بهترین نحو قابل برآورده‌سازی می‌باشند.

در شکل فوق مقادیر مدول خط بین ۵۰ (سیستم نرم) تا ۲۵۰ نیوتون بر میلی‌متر مربع انتخاب گردیده‌اند. همانطور که مشخص می‌باشد با افزایش سختی خط به بیش از مقدار ۲۵۰ میلی‌متر، تنش ریل به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد یافت. در خصوص معیارهای کنترل ریل نیز به دو مطلب اشاره می‌شود.

۵-۱-۲- معیار تنش تسلیم

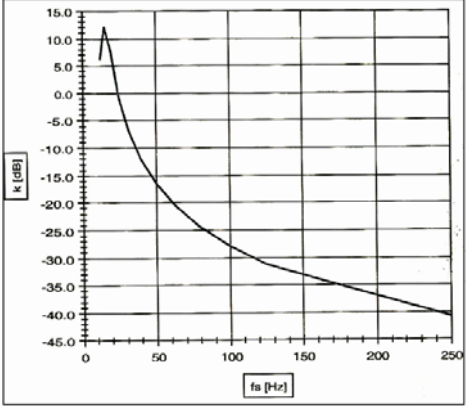
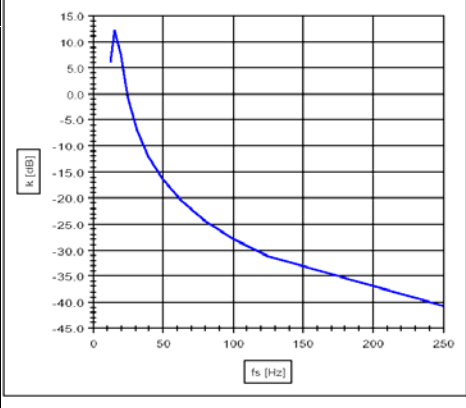
این معیار معمولاً ۰/۶ تنش تسلیم ریل یا برابر ۳۴۸ نیوتن بر میلی‌متر مربع در نظر گرفته می‌شود. از این معیار، جهت اهداف کنترل، باید تنش پسماند موجود در نشیمنگاه ریل و تنش حرارتی نیز کسر گردد. مقادیر بیشینه دو تنش مذکور در جدول ۲ گنجانده گردیده‌اند.

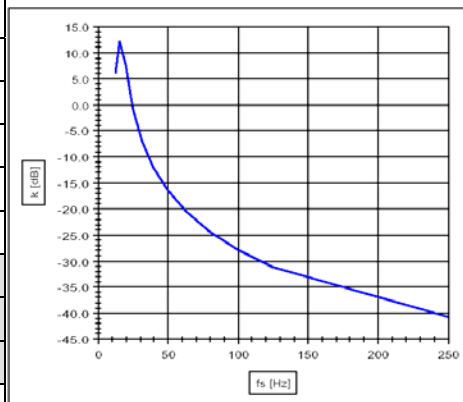
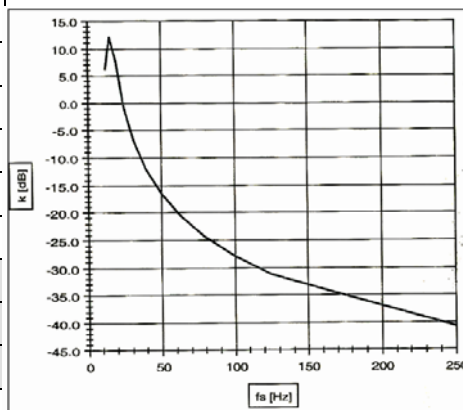
برای خط قطارشهری جمع تنش حرارتی و تنش پسماند را برابر ۲۲۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع در نظر می‌گیریم. بدین ترتیب ۱۲۸ نیوتن بر میلی‌متر مربع مقاومت خالص در ریل باقی می‌ماند که باید با مقادیر درج شده در شکل ۳ مقایسه گردد. همانطور که در شکل نیز مشخص می‌باشد، تنش موجود در ریل (در بستر بسیار نرم) کمتر از ۱۰۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع قرار دارد. بدین ترتیب معیار تنش تسلیم برآورده می‌گردد.

۵-۱-۳- معیار تنش خستگی

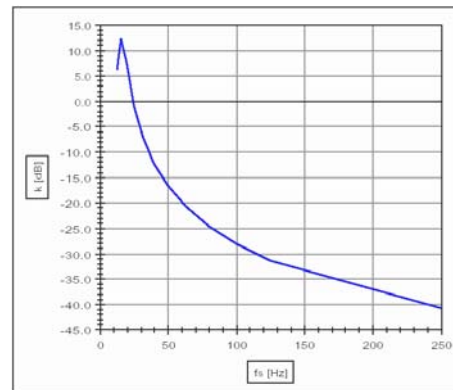
همانطور که از شکل نیز مشخص می‌باشد، در تمامی مقادیر سختی محتمل برای خط، تنش ریل با نظریه $DAF=2$ همواره زیر ۲۲۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع (آستانه تنش خستگی) قرار دارد. لذا ریل‌های S49 قابلیت باربری کافی را دارند. ضمناً متذکر می‌شود که مدول خط در دال بتنی مورد نظر در قطار شهری شیراز کمتر از ۵۰ $N/mm/mm$ می‌باشد، و لذا ریل در محدوده ایمن تنش قرار دارد.

جدول ۶. خواص میرایی ارتعاش سازه خط قطار شهری شیراز
(ارتفاع پروفیل جانبی برابر ۲۵۰ میلی‌متر (تونل‌های حفر و پوش) می‌باشد)

بار محوری ۱۰ تن				
فرکانس طبیعی سیستم (هرتز)		فرکانس (هرتز)	شدت (دسی‌بل)	IL(%)
قطار متوقف	قطار در حال حرکت	۱۲/۵	۶/۱	-۱۰۱
۲۰/۴	۱۷/۲	۱۶	۱۲/۰	-۲۹۹
		۲۰	۷/۵	-۱۳۷
		۲۵	-۰/۹	-۹
		۳۱/۵	-۰/۷	۵۵
		۴۰	-۱۲/۲	۷۵
		۵۰	-۱۶/۵	۸۵
		۶۳	-۲۰/۶	۹۱
		۸۰	-۲۴/۵	۹۴
		۱۰۰	-۲۸/۰	۹۶
		۱۲۵	-۳۱/۳	۹۷
		۲۵۰	-۴۰/۸	۹۹
				
بار محوری ۱۲/۵ تن				
فرکانس طبیعی سیستم (هرتز)		فرکانس (هرتز)	شدت (دسی‌بل)	IL(%)
قطار متوقف	قطار در حال حرکت	۱۲/۵	۶/۱	-۱۰۱
۲۰/۳	۱۷/۲	۱۶	۱۲/۰	-۲۹۹
		۲۰	۷/۵	-۱۳۷
		۲۵	-۰/۹	-۹
		۳۱/۵	-۰/۷	۵۵
		۴۰	-۱۲/۲	۷۵
		۵۰	-۱۶/۵	۸۵
		۶۳	-۲۰/۶	۹۱
		۸۰	-۲۴/۵	۹۴
		۱۰۰	-۲۸/۰	۹۶
		۱۲۵	-۳۱/۳	۹۷
		۲۵۰	-۴۰/۸	۹۹
				
بار محوری ۱۴ تن				



فرکانس طبیعی سیستم (هرتز)		فرکانس (هرتز)	شدت (دسی بل)	IL(%)
قطار متوقف	قطار در حال حرکت	۱۲/۵	۶/۲	-۱۰۳
۲۰/۳	۱۷/۱	۱۶	۱۲/۲	-۳۰۶
		۲۰	۷/۲	-۱۳۰
		۲۵	-۱/۰	۱۱
		۳۱/۵	-۷/۱	۵۶
		۴۰	-۱۲/۳	۷۶
		۵۰	-۱۶/۶	۸۵
		۶۳	-۲۰/۷	۹۱
		۸۰	-۲۰/۶	۹۴
		۱۰۰	-۲۸/۱	۹۶
		۱۲۵	-۳۱/۴	۹۷
		۲۵۰	-۴۰/۸	۹۹



۶- نتیجه گیری

رسید. بدین ترتیب تراز ارتفاعی سیستم روسازی و پروفیل ریل تحت بار ۱۴ تن تغییری نخواهد نمود. در اینجا متذکر می‌شود که با عنایت به حساسیت موضوع و موارد اشاره شده در مقاله، باید نرمی کافی جهت افزایش اندیس طول خمش را برای خط ایجاد نمود و ملزم به استفاده از لایه‌های ارتجاعی خواهیم بود. در صورت افزایش سختی خط، علاوه بر تمرکز تنش در ریل خواص میرایی ارتعاش نیز کاهش می‌یابد.

۶-۲- لایه‌های ارتجاعی

همانطور که پیشتر نیز اشاره گردید، لایه‌های ارتجاعی دارای دو وظیفه مهم می‌باشند. در وهله اول این لایه‌ها وظیفه ایجاد نرمی خط را بر عهده دارند. با این کار ضمن افزایش طول خط خمش خط، منجر به کاهش تنش در ریل می‌گردند. در وهله دوم وظیفه اصلی این لایه‌ها ایجاد خاصیت میرایی ارتعاش زمینی برای خط می‌باشد. بنابراین مهندسین مشاور استفاده از این لایه‌های ارتجاعی را در سیستم روسازی قویا پیشنهاد می‌نماید. در خصوص مباحث اقتصادی نیز، این لایه‌های ارتعاشی از جنس پلی‌اورتان ارزان‌ترین لایه ارتعاشی محسوب می‌گردد. یکی از روشهای موثر جهت مقابله با ارتعاش و آلودگی صوتی ناشی از سیستم حمل و نقل ریلی استفاده از لایه ارتجاعی پلی‌اورتان تمام مقطع فرش الاستیک در زیربستر بتنی روسازی راه آهن می‌باشد. ساختار خطوط بتنی الاستیک با

در این تحقیق به تحلیل عددی و فنی کفایت ریل و اثرگذاری لایه‌های الاستیک در زیرسازی بتنی قطارهای شهری شیراز پرداخته شد و نتایج کامل تحلیل ارتعاشی و ارتجاعی خط قطار شهری شیراز که دارای معارضات حساس به ارتعاش متعددی در طول خط است، مورد بررسی قرار گرفت. سازگاری دو معیار رفتار ارتعاشی سیستم (ایجاد بستر نرم خط و میرایی) و پایداری خط (تغییر مکان کنترل‌شده خط) در صورت استفاده از سیستم جرم و فنر و انتخاب مصالح پلی‌اورتان به عنوان لایه ارتجاعی به آسانی قابل کسب می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج تحلیل ارتعاشی انجام گرفته، پیشنهاد می‌گردد که به عنوان یک معیار مناسب طراحی ارتعاشی، کاهش ارتعاش بیش از ۲۰ دسی‌بل در فرکانس عمکردی بیش از ۵۰ هرتز در سیستم‌های جرم و فنر خطوط ریلی در قطار شهری در نظر گرفته شود.

۶-۱- پروفیل ریل

مطابق محاسبه انجام شده و در نظرگیری ضریب اطمینان ۲، پروفیل ریل S49 کفایت باربری تا بار محوری ۱۴ تن را دارد. در این حالت سختی دال بتنی زیرین باید افزایش داده شود و از آنجا که میلگردهای تقویتی مورد استفاده در دال بتنی موجود اسمی هستند، نیازی به افزایش ضخامت دال نمی‌باشد و تنها با افزایش AS می‌توان به سختی و مقاومت خمشی مورد نظر

-میرمحمدصادقی، سید جواد (۱۴۰۰) اصول و مبانی تحلیل و طراحی خطوط بالاستی راه آهن، تهران، انتشارات دانشگاه علم و صنعت/ایران.

-نوروزی، مرتضی، یلداشخان، ماهان، خاکباز، محمدرضا (۲۰۲۲). بررسی تحلیلی کفایت ریل و تاثیر لایه های الاستیک در روسازی بتنی قطارهای شهری، دومین کنفرانس بین المللی معماری، عمران، شهرسازی، محیط زیست و افق های هنر اسلامی در بیانیه گام دوم انقلاب، دانشگاه هنر تبریز.

-Kamboozia, N., & Khakbaz, M., (2023). Application of asphalt concrete as sub-ballast in railway lines with a sustainable development approach. *Road*, 31(116), 1-12.

-Sadeghi, J. M., Yoldashkhan, M., & Hirmus, S., (2005). Development of a Light Mass-Spring System for Ground-Borne Vibration Mitigation in Shiraz LRT Line. In *First International Congress on Lightweight Material Construction and Earthquake Retrofitting*, Ghom, Iran.

-Hirmas, S., & Yoldashkhan, M., (2006). Application of Cellular Polyurethane (PU) Materials for Increasing Track Elasticity and Vibration Mitigation in Railway Track System.

-Carman, R., (2012). Floating Track Slab Systems for Reducing Ground-Borne Noise and Vibration From Rail Vehicles.

-Sadeghi, J., Esmaeili, M. H., & Akbari, M., (2019). Reliability of FTA general vibration assessment model in prediction of subway induced ground borne vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117, 300-311.

خطوط بتنی معمولی غیرالاستیک کاملاً متفاوت بوده و باعث تغییرات قابل توجه در مقادیر لنگرهای خمشی تنش ها تغییر مکان قائم دال می شود (گاسالا، ۱۳۹۹). این لایه ها ضمن برآورد تمامی معیارها و مقتضیات فوق الذکر، در مقایسه با سایر مصالح مورد استفاده، ارزان ترین مصالح محسوب می شوند.

۷- مراجع

- نادران، علی، نوروزی، مرتضی، ذاکری، جبارعلی، رحیم اف، کامران (۲۰۲۲). روش های تعیین مدول مکانیکی خط، به منظور طراحی بهینه خطوط ریلی و نقش آن، بر کمینه سازی شاخص هزینه و اولویت بندی طرح های توسعه راه آهن. *مجله پژوهش و کاربرد در مکانیک*، ۱۲(۲)، ۱-۱۴.

- نادران، علی، نوروزی، مرتضی، ذاکری، جبارعلی، رحیم اف، کامران (۲۰۲۲). یک مدل بهینه سازی برای اولویت بندی طرح های توسعه راه آهن، براساس شاخص های تاثیرگذار و مبتنی بر توسعه پایدار، با در نظر گرفتن جنبه های اقتصادی، زیست محیطی و مکانیکی. *مجله پژوهش و کاربرد در مکانیک*، ۱۲(۱)، ۵۸-۴۳.

- نوروزی، مرتضی، نادران، علی، ذاکری، جبارعلی، رحیم اف، کامران (۲۰۲۲). ارائه یک رویکرد تصمیم گیری چندمعیاره فازی سناریومحور در شرایط عدم قطعیت، با در نظر گرفتن مبحث پایداری، جهت ارزیابی و اولویت بندی پروژه های ساخت و توسعه حمل و نقل ریلی با روش Stochastic FBWM و VIKOR. *مجله پژوهش و کاربرد در مکانیک*، ۱۲(۳)، ۳۹-۱۵.

-میرمحمد صادق، سیدجواد، یلداشخان، ماهان (۲۰۰۶). توسعه یک روش جهت تحلیل ارتعاشی و ارتجاعی (عملکردی) سیستم جرم و فنر روسازی قطارهای سبک شهری. *پژوهشنامه حمل و نقل*، ۳(۱)، ۶۰-۴۵.

- Lamprea-Pineda, A. C., Connolly, D. P., & Hussein, M. F., (2022). Beams on elastic foundations—A review of railway applications and solutions. *Transportation Geotechnics*, 33, 100696.
- Reboredo Gasalla, P., (2021, August). Structural Dynamics, Noise and Vibration: Buildings Adjacent to Train Lines. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, *Institute of Noise Control Engineering*. Vol. 263, No. 4, 2228-2240.
- Lam, H. F., Adeagbo, M. O., & Yang, Y. B., (2021). Time-domain Markov chain Monte Carlo-based Bayesian damage detection of ballasted tracks using nonlinear ballast stiffness model. *Structural Health Monitoring*, 20(5), 2653-2677.
- Zhao, C., Zheng, J., Sang, T., Wang, L., Yi, Q., & Wang, P., (2021). Computational analysis of phononic crystal vibration isolators via FEM coupled with the acoustic black hole effect to attenuate railway-induced vibration. *Construction and Building Materials*, 283, 122802.
- Martínez Fernández, P., Villalba Sanchís, I., Insa Franco, R., & Yepes, V., (2022). Slab track optimization using metamodels to improve rail construction sustainability. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(7), 04022053.
- Idczak, W., Lewandowski, T., Pokropski, D., Rudnicki, T., & Trzmiel, J., (2022). Dynamic Impact of a Rail Vehicle on a Rail Infrastructure with Particular Focus on the Phenomenon of Threshold Effect. *Energies*, 15(6), 2119.
- Yelce, T. U., Balci, E., & Bezgin, N. Ö., (2023). A discussion on the beam on elastic foundation theory. *Challenge*, 9(1), 34-47.
- Quante, F., (2001). Innovative track systems technical construction. *European Commission Competitive and Sustainable Growth Programme Reports*, 6, 17-18.
- Prakoso, P. B., (2012). The basic concepts of modelling railway track systems using conventional and finite element methods. *Info-Teknik*, 13(1), 57-65.

Numerical and Technical Analysis of Rail Adequacy and the Effectiveness of Elastic Layers in the Concrete Infrastructure of Urban Trains (Case Study: Shiraz Urban Railway Line)

*Mohammad Reza Khakbaz, M.Sc., Student, School of Civil Engineering, Iran University
of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Morteza Noruzi, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic
Azad University, Tehran, Iran.*

*Neda Kamboozia, Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science
and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Mahan Yoldashkhan, M.Sc., Grad., Department of Road and Transportation, K.N. Toosi
University of Technology, Tehran, Iran.*

E-mail: Khakbaz9090@gmail.com

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

The discussion on the analysis and design of concrete slab structures for railways, subways and urban trains and the effect of various elements on the elasticity and vibration of these tracks is very important and has been considered a general topic in the railway industry and structural design. In this regard, many researchers have presented many approaches and solutions in recent years to achieve a reliable and simple analysis and design method in this field. The use of mass and spring systems in railways, subways and urban trains is widely used in this field. In addition, one of the most important issues in the analysis and design of railway lines is the choice of the railway profile and the investigation of the suitability (resistance) of its construction under the applied loads. In addition, it is very important to establish a composition between the performance and vibration criteria of the railway concrete pavement to achieve a durable and stable track under the influence of dynamic work forces. This article presents general methods for the analysis and inspection of rail profiles on concrete slab lines, as well as the results of the rail analysis of the Shiraz City Railway and the effect of the use of elastic layers on it. In addition, based on the results of the vibration analysis carried out in this work, it is proposed to consider a vibration reduction of more than 20 dB at an operating frequency of more than 50 Hz in the mass and spring systems of urban railways train.

Keywords: City Train, Rail, Zimmerman Analysis, Mass and Spring Systems, Vibration