

بررسی تاثیر مشخصات روسازی دال خط راه آهن بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط

امین خواجه دزفولی^{*}، عبدالغفور خادم‌الرسول^۱، مجتبی لیب زاده^۱

۱- استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

*amin_dezfuly@scu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۲۲

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۰۸

چکیده

با توجه به ویژگی‌های مثبت روسازی دال خط راه آهن در مقایسه با روسازی بالاستی راه آهن که به روسازی رایج معروف می‌باشد، استفاده از روسازی دال خط راه آهن روز به روز در حال افزایش است. بر همین اساس به تازگی، مبحث تحلیل و طراحی روسازی دال خط راه آهن به عنوان یک موضوع مهم در میان پژوهشگران تبدیل شده است. یکی از پارامترهای موثر در تحلیل و طراحی روسازی دال خط راه آهن، توزیع بار قائم در راستای طولی خط (ضریب توزیع بار) است. در این مقاله تاثیر مشخصات اجزای مختلف روسازی دال خط راه آهن بر ضریب توزیع بار بررسی شده است. بر همین اساس مدلی از روسازی دال خط شامل ریل، پابند، دال بتنی، فرش ارتجاعی و بستر خاکی با کمک روش اجزای محدود شبیه سازی شده است. در این مدل عددی، ریل، دال بتنی و بستر بتنی به کمک المان تیر شبیه سازی شده اند و از المان فنر برای شبیه سازی اجزای پابند، فرش ارتجاعی و بستر خاکی کمک گرفته شده است. بار یک چرخ روی ریل و دقیقاً در محل یک پابند به مدل عددی اعمال شده است. با تشکیل ماتریس سختی مدل عددی و بردار بار وارده به آن، معادله تعادل حاکم بر مدل عددی تشکیل می‌شود. با حل معادله تعادل حاکم بر مدل عددی، نیروهای رسیده به هر یک از پابندها محاسبه شده و در نهایت ضریب توزیع بار محاسبه می‌شود. با انجام مطالعه پارامتریک در مدل عددی، تاثیر پارامترهای مختلف خط مانند سختی پد پابند، صلبیت خمشی دال بتنی، سختی فرش ارتجاعی، صلبیت خمشی بستر بتنی و سختی بستر خاکی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط بررسی شده است. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان داد که با کاهش سختی اجزای مختلف روسازی، بار قائم به صورت گسترده‌تری در راستای طولی خط توزیع می‌شود. از میان پارامترهای مختلف روسازی دال خط، سختی پد زیر ریل بیشترین تاثیر را در توزیع بار قائم در راستای طولی خط دارد و با تغییر سختی پد از کم به زیاد، ضریب توزیع بار از ۰/۳ به میزان ۰/۷ افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده نشان داد که مشخصات اجزای پایین تر روسازی در مقایسه با اجزای بالاتر، نقش کمتری در توزیع بار قائم در راستای طولی خط دارند. بر همین اساس صلبیت خمشی دال بتنی ضریب توزیع بار قائم در راستای طولی خط را در بازه ای بین ۰/۵۲ تا ۰/۵۴ تغییر می‌دهد. براساس نتایج به دست آمده از این پژوهش، فرش ارتجاعی، بستر بتنی و بستر خاکی هیچگونه تاثیری بر توزیع بار قائم در راستای طولی روسازی دال خط ندارند.

واژه‌های کلیدی: روسازی دال خط، ضریب توزیع بار قائم، روش اجزای محدود، مدل سه لایه

۱. مقدمه

ریل به منظور جابه‌جایی کالا و مسافر شده است. در میان روسازی‌های مختلف راه‌آهن، روسازی دال خط راه آهن به دلیل ویژگی‌هایی مانند پایداری زیاد، هزینه تعمیر و نگهداری

مزایای فراوان سیستم حمل و نقل ریلی در مقایسه دیگر سیستم‌های حمل و نقل، منجر به توسعه روز افزون استفاده از

کم و ...، از محبوبیت بالایی برخوردار است. با گسترش استفاده از روسازی دال‌خط راه آهن، مبحث تحلیل و طراحی روسازی دال‌خط مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. برخلاف روسازی بالاستی راه آهن (روسازی متداول استفاده شده در خطوط ریلی)، به دلیل جوان بودن تکنولوژی استفاده از روسازی دال‌خط و انحصاری بودن مبحث تحلیل و طراحی آن، روند مدونی به منظور تحلیل و طراحی اجزای مختلف روسازی دال‌خط راه آهن تاکنون ارائه نشده است [3-1]. در این میان، به توصیه برخی از آیین نامه‌های راه آهن، روند تحلیل و طراحی روسازی دال‌خط راه آهن تا اندازه ای مشابه با روند تحلیل و طراحی روسازی بالاستی راه آهن است [4]. در بسیاری از موارد، خستگی دال بتنی روسازی دال‌خط راه آهن، یکی از عوامل مهم طراحی دال بتنی است [2]. به منظور تخمین درستی از عمر خستگی دال بتنی، باید مقدار تنش‌های ایجاد شده در دال بتنی (هر چند ناچیز) به درستی تخمین زده شوند. همین امر لزوم دستیابی به الگوی صحیحی از بارگذاری دال بتنی را مشخص می‌سازد. بر همین اساس، یکی از گام‌های مهم در بارگذاری و تحلیل روسازی دال‌خط راه آهن (همچنین روسازی بالاستی راه آهن)، تعیین چگونگی توزیع بار در راستای طولی خط است. به بیانی دیگر، در زمانی که یک چرخ محور بر روی ریل قرار می‌گیرد، باید میزان سهمی از بار قائم چرخ محور که میان پابندهای مختلف توزیع می‌شود، تعیین شود. در همین راستا و به منظور تعیین روند توزیع بار قائم در راستای طولی خط، تحقیقات میدانی و عددی متعددی در روسازی بالاستی راه آهن صورت گرفته است. ذاکری و صادقی (۲۰۰۷) با کمک انجام مطالعات میدانی، تاثیر برخی از مشخصات روسازی بالاستی را در توزیع بار قائم در راستای طولی خط بررسی کرده اند [5]. یکی از نتایج مهم پژوهش آنها که در ادبیات موضوع نیز بدان تاکید شده است، تاثیر بسیار زیاد سختی سیستم حائل ریل بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط بوده است [5,6]. تغییر مشخصات و ویژگی‌های اجزای مختلف قرارگرفته در ریل، می‌تواند منجر به تغییر سختی سیستم حائل ریل شود. در همین راستا، اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۷) با انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی، تاثیر استفاده از فولاد سرباره در بالاست را بر

توزیع بار قائم در راستای طولی خط راه آهن بررسی کردند [7]. به دلیل هزینه‌های زیاد انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی و میدانی و همچنین توانایی روش‌های عددی در شبیه‌سازی و تحلیل روسازی، برخی از پژوهشگران به کمک مدل‌های عددی توزیع بار در راستای طولی روسازی بالاستی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند [8-9]. در نقطه مقابل، پژوهش‌های عددی معدودی در زمینه توزیع بار در راستای طولی روسازی دال-خط راه آهن انجام گرفته است. سانگ و همکاران (۲۰۱۱) با ساخت یک مدل دوبعدی سه لایه از اندرکنش دال‌خط و قطار، توزیع بارقائم در راستای طولی دال‌خط را طی یک مطالعه موردی بررسی کردند [10]. در مدل عددی سانگ و همکاران (۲۰۱۱)، دال‌خط به صورت مجموعه ای از ریل، پابند، دال بتنی پیوسته، فرش ارتجاعی و بستر بتنی پیوسته و بستر خاکی شبیه سازی شده است. در تحقیق سانگ و همکاران (۲۰۱۱)، تاثیر پارامترهای مختلف خط و ناوگان بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط بررسی نشده است [10]. صادقی و همکاران (۲۰۱۷)، با انجام پژوهشی میدانی تاثیر پارامترهایی مانند فاصله پابندها، سختی سیستم حائل ریل، بار محوری ناوگان و سرعت حرکت ناوگان را بر توزیع بار قائم در راستای طولی روسازی دال‌خط بررسی کرده و رابطه ای به منظور تعیین ضریب توزیع بار قائم در راستای طولی دال‌خط ارائه کرده اند [11]. در پژوهش انجام شده توسط آنها، فقط روی تعداد محدودی روسازی دال‌خط آزمایش‌ها انجام شده است. نتیجتاً در پژوهش آنها، میزان تاثیر اجزای مختلف روسازی (مانند سختی پد، فرش ارتجاعی و بستر خاکی) به طور جداگانه و دقیق بر توزیع بار در راستای طولی خط بررسی نشده است [11]. همچنین در رابطه‌ای که توسط صادقی و همکاران (۲۰۱۷) برای تخمین ضریب توزیع بار قائم در راستای طولی دال‌خط ارائه شده است، سرعت حرکت ناوگان در این رابطه نقش کلیدی ایفا می‌کند. در ادبیات موضوع، سرعت حرکت قطار در روابط تخمین ضریب توزیع بار قائم در راستای طولی روسازی بالاستی راه آهن نقشی نداشته و تاثیر سرعت حرکت قطار در ضریب ضربه دینامیکی اعمال می‌شود [12].

بستر خاکی تشکیل شده است. به منظور توسعه این مدل عددی، کدی با نام STLM در محیط برنامه نویسی FORTRAN تهیه شده است.

در مدل عددی توسعه داده شده در این مقاله، ریل، دال بتنی ناپیوسته (به صورت قطعاتی ناپیوسته) و بستر بتنی به کمک المان تیر دوگره ای شبیه سازی شده اند (شکل ۲). در معادله ۱، ماتریس سختی المان تیر دوگره ای ارائه شده است [13]. در معادله (۱)، EI صلبیت خمشی المان و L طول المان است.

شکل ۲. المان تیر دو گرہ ای

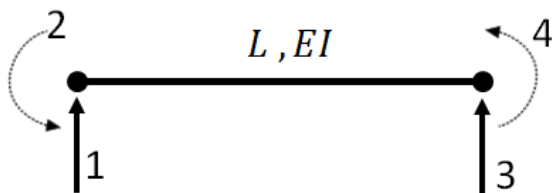


Fig. 2. Two noded beam element

با سرهم‌بندی ماتریس سختی المان‌های تیر با یکدیگر، ماتریس سختی ریل $[K_{rail}]$ ، ماتریس سختی دال بتنی $[K_{cs}]$ و ماتریس سختی بستر بتنی $[K_{cb}]$ تشکیل می‌شوند. تعداد گرہ‌ها و درجات آزادی روسازی دال‌خط معادل با مجموعه گرہ‌ها و درجات آزادی ریل، دال بتنی و بستر بتنی است.

$$K_b = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & 6L \\ 6L & 2L^2 & 6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

اجزای ریل، دال بتنی و بستر بتنی به کمک اعضای واسطه (مانند پابند، فرش ارتجاعی و بستر خاکی) با یکدیگر مرتبط می‌شوند. پابند، فرش ارتجاعی و بستر خاکی به کمک المان فنر شبیه سازی می‌شوند (شکل ۳). در معادله (۲)، ماتریس سختی المان فنر ارائه شده است [13]. در معادله (۲)، k مقدار سختی المان فنر است. المان فنر، المانی واسطه‌ای است که بین گرہ‌های دو عضو مختلف ارتباط ایجاد می‌کند.

با بررسی ادبیات موضوع در زمینه توزیع بار قائم در راستای طولی روسازی دال‌خط، عدم بررسی دقیق تاثیر مشخصات اجزای مختلف روسازی دال‌خط بر توزیع بار قائم در راستای طولی آن و با کمک یک مدل عددی کامل، به عنوان یک محدودیت عمده در این زمینه است. انجام این پژوهش در راستای برطرف کردن این محدودیت است. در همین راستا در ابتدا یک مدل عددی دو بعدی سه لایه از روسازی دال‌خط در فضای اجزای محدود (شامل ریل، پابند، دال بتنی پیوسته، فرش ارتجاعی و بستر بتنی پیوسته و بستر خاکی) شبیه سازی می‌شود. در مدل عددی، یک چرخ محور ناوگان بر روی ریل (دقیقا در بالای یک پابند) قرار گرفته و سپس با حل معادله تعادل حاکم بر مدل عددی، نیروی ایجاد شده در پابندهای مختلف محاسبه می‌شود. در نهایت، با کمک نیروهای محاسبه شده، ضریب توزیع بار قائم در راستای طولی خط محاسبه می‌شود. در ادامه و با انجام تعدادی مطالعه پارامتریک، تاثیر پارامترهایی نظیر سختی پد زیر ریل، صلبیت خمشی دال بتنی، سختی فرش ارتجاعی، صلبیت خمشی بستر بتنی و سختی بستر خاکی بر ضریب توزیع بار بررسی شده است.

شکل ۱. نمایی شماتیک از مدل عددی توسعه داده شده در این پژوهش

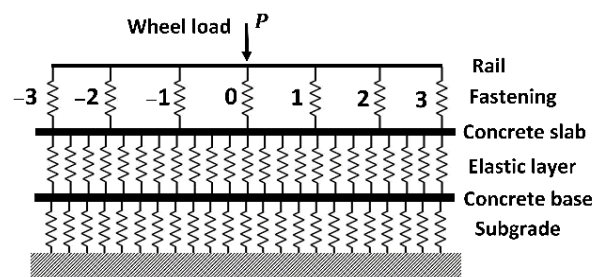


Fig. 1. Schematic view of numerical model developed in this study

۲. روش انجام تحقیق

در این مقاله، یک مدل دوبعدی سه لایه از روسازی دال-خط به کمک روش اجزای محدود توسعه داده شده است. در شکل (۱)، نمایی شماتیک از این مدل نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، مدل عددی از ریل، پابند، دال بتنی ناپیوسته، فرش ارتجاعی، بستر بتنی و

با رابطه (۳)، بردار نیرو در معکوس ماتریس سختی ضرب شده و بردار جابه‌جایی محاسبه می‌شود. با توجه به معادله (۳)، می‌توان بیان داشت که جابه‌جایی تمامی گره‌های مدل عددی تحت نیروی یک چرخ و به صورت استاتیکی محاسبه شده است.

$$\{\Delta\} = \{f_{track}\} [K_{track}]^{-1} \quad (3)$$

بردار $\{\Delta\}$ شامل تغییر شکل کلیه گره‌های ریل $\{\Delta_{rail}\}$ ، دال بتنی $\{\Delta_{cs}\}$ و بستر بتنی $\{\Delta_{cb}\}$ است. یک پابند، یک گره از ریل را به یک گره از دال بتنی متصل می‌سازد (شکل-های ۱، ۳ و ۴). به منظور محاسبه نیروی ایجاد شده در پابند i ام، کافیت تا اختلاف جابه‌جایی ریل و دال بتنی در محل پابند i ام در مقدار سختی پد پابند ضرب شود (معادله ۴). در معادله (۴)، F_i نیروی پابند i ام، $\{\Delta_{rail}\}_i$ جابه‌جایی قائم ریل در محل پابند i ام، $\{\Delta_{cs}\}_i$ جابه‌جایی قائم دال بتنی در محل پابند i ام و S سختی پد پابند است.

$$F_i = (\{\Delta_{rail}\}_i - \{\Delta_{cs}\}_i) \times S \quad (4)$$

در ادامه و با تقسیم نیروی پابند i ام (F_i) بر مقدار نیروی چرخ محور اعمال شده به ریل (P)، نسبت بار جذب شده توسط پابند i ام (α_i) محاسبه می‌شود (مطابق رابطه ۵).

$$\alpha_i = \frac{F_i}{P} \quad (5)$$

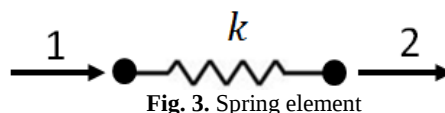
با کمک معادله شماره ۵، مقدار α_i به عنوان سهم پابند i ام از نیروی چرخ P بدست می‌آید. بر همین اساس، نیروی چرخ P میان پابندهای مختلف در راستای طولی خط توزیع می‌شود. به بیانی دیگر، ضریب توزیع بار قائم در راستای طولی برای پابند i ام برابر با مقدار α_i است.

جدول ۱. مشخصات روسازی دال خط استاندارد

Properties	Value	Unit
Rail flexural rigidity	۶۷۵۵۷۰۰	N.m ²
Fastening space	۶۵	cm
Rail pad stiffness	۱۵۰	MN/m
Concrete slab flexural rigidity	۰.۱	GN.m ²
Elastic layer stiffness	۱	GN/m
Concrete base flexural rigidity	۰.۱	GN.m ²
Subgrade stiffness	۵۰	MN/m

Table 1. Standard slab track properties

شکل ۳. المان فنر



$$K_s = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \quad (2)$$

با سرهم‌بندی ماتریس سختی المان فنر با یکدیگر، ماتریس سختی پابند ($[K_{pad}]$)، ماتریس سختی فرش ارتجاعی ($[K_{pu}]$) و ماتریس سختی بستر خاکی ($[K_{sub}]$)، تشکیل می‌شوند. با توجه به اینکه فنر به عنوان یک عضو واسطه و به منظور ایجاد ارتباط بین تغییر شکل ایجاد شده بین دو درجه آزادی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین فنرها هیچگونه درجه آزادی جدیدی به سیستم اضافه نمی‌کنند. با سرهم‌بندی ماتریس‌های سختی اجزای مختلف روسازی با یکدیگر، ماتریس سختی روسازی دال خط ($[K_{track}]$) بدست می‌آید. در شکل (۴) نمایی از مدل روسازی دال خط که حاصل از سرهم‌بندی المان‌های تیر دوگره‌ای و فنر است، نشان داده شده است.

شکل ۴. نمایی از ساخت مدل روسازی دال خط با سرهم‌بندی المان‌های

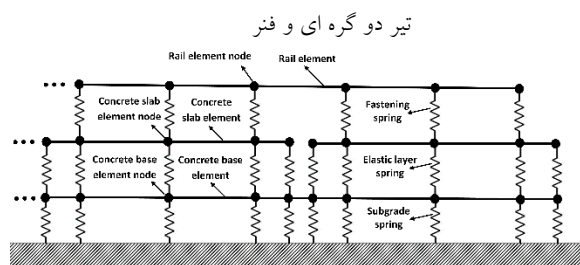


Fig. 4. View of slab track model assembled by beam and spring elements

با توجه به مقدار نیروی چرخ محور اعمال شده به ریل (P) و به کمک توابع شکل المان تیر [13]، بردار بار وارد شده به روسازی دال خط $\{f_{track}\}$ تعیین می‌شود. با حل معادله تعادل حاکم بر روسازی دال خط (معادله ۳)، مقدار تغییر شکل روسازی دال خط $\{\Delta\}$ و با کمک یک تحلیل استاتیکی محاسبه می‌شود. در این پژوهش، ماتریس سختی به کمک روش گوس-جوردن معکوس شده است. در ادامه و مطابق

مقایسه با سایر پدها با سختی بیشتر، توزیع می‌شود. به عنوان نمونه در زمانی که سختی پد کم است (۲۰ مگانیوتن بر متر)، ضرایب توزیع برای پابند مرکزی و مجاور آن به ترتیب ۰/۳۳ و ۰/۲۴ است. در حالی که با افزایش سختی پد به ۵۰۰ مگانیوتن بر متر، ضرایب توزیع برای پابند مرکزی و مجاور آن به ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۱۸ است. از سویی دیگر، در تمامی حالات سختی پد زیر ریل، پابند مرکزی (قرار گرفته در زیر بار قائم) سهم بیشتری از بار قائم را به خود اختصاص می‌دهد.

شکل ۵. تاثیر سختی پد زیر ریل بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط

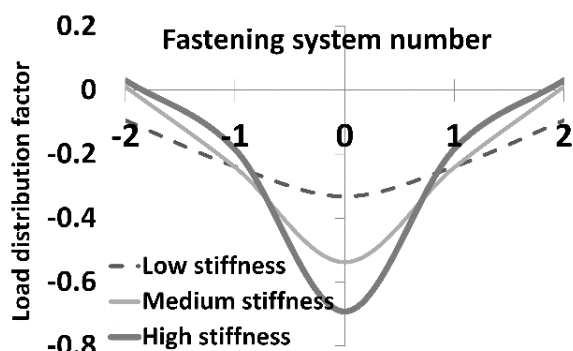


Fig. 5. Effect of rail pad stiffness on the vertical load distribution in track longitudinal direction

شکل ۶. تاثیر مدول پد زیر ریل بر نسبت بار جذب شده توسط پابند مرکزی

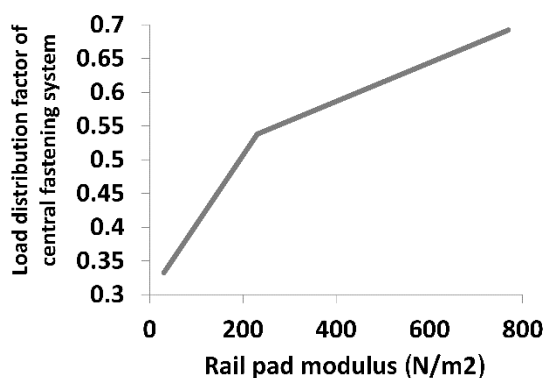


Fig. 6. Effect of rail pad modulus on the central rail pad load ratio

در شکل (۶) تاثیر مدول پد زیر ریل بر بار قائم جذب شده توسط پابند مرکزی نشان داده شده است. با تقسیم سختی پد زیر ریل به مقدار فاصله بین پابندها، مدول پد زیر ریل تعیین می‌شود. استفاده از مدول پد زیر ریل باعث می‌شود

۳. بررسی تاثیر مشخصات روسازی بر توزیع بار قائم در راستای طولی

در این مقاله به منظور بررسی تاثیر مشخصات مختلف روسازی بر توزیع بار قائم در راستای طولی، تعدادی مطالعه پارامتریک صورت گرفته است. در این راستا، در ابتدا مشخصات یک روسازی دال خط استاندارد در نظر گرفته شده است و سپس تاثیر تغییر ویژگی هر یک از اجزای روسازی به صورت جداگانه بر توزیع بار قائم در راستای طولی بررسی شده است. مشخصات روسازی دال خط استاندارد به صورت جدول (۱) است. همچنین در کلیه تحلیل‌های انجام شده، بار محوری واگن ۱۴ تن در نظر گرفته شده است. در بخش‌های پیش‌رو، به ترتیب تاثیر سختی پد زیر ریل، صلبیت خمشی دال‌بتنی، سختی فرش ارتجاعی، صلبیت خمشی بستر بتنی و سختی بستر خاکی بر روی توزیع بار قائم در راستای طولی بررسی شده است.

۳.۱. بررسی تاثیر سختی پد زیر ریل بر توزیع بار قائم در راستای طولی

مطابق با جدول (۲)، سه مقدار سختی پد کم، متوسط و زیاد به منظور بررسی تاثیر سختی پد زیر ریل بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط در نظر گرفته شده است. تاثیر سختی پد زیر ریل بر ضرایب توزیع بار برای پابند زیر بار و دو پابند مجاور در چپ و راست پابند زیر بار، در شکل (۵) ارائه شده است. براساس نتایج نشان داده شده در شکل (۵)، سختی پد زیر ریل تاثیر بسیار زیادی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط دارد.

جدول ۲. محدوده سختی پد زیر ریل

Rail pad type	Value	Unit
Low stiffness	۲۰	MN/m
Medium stiffness	۱۵۰	MN/m
High stiffness	۵۰۰	MN/m

Table 2. Range of rail pad stiffness

زمانی که پدی با سختی کم در زیر ریل استفاده می‌شود، بار قائم به صورت گسترده‌تری در راستای طولی خط در

جدول ۳. محدوده صلبیت خمشی دال بتنی

Concrete slab type	Value	Unit
Low flexural rigidity	۰,۰۰۱	GN.m ²
Medium flexural rigidity	۰,۱	GN.m ²
High flexural rigidity	۱,۴	GN.m ²

Table 3. Range of concrete slab flexural rigidity

در شکل (۷)، تاثیر صلبیت خمشی دال بتنی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط ارائه شده است. همان گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، کاهش صلبیت خمشی دال بتنی منجر به توزیع گسترده تر بار قائم در راستای طولی دال خط می شود. به عنوان نمونه زمانی که صلبیت خمشی دال بتنی ۰/۰۰۱ گیگانیوتن در مترمربع است، ضرایب توزیع برای پابند مرکزی و مجاور آن به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۲۴ است.

با افزایش صلبیت دال بتنی به مقدار ۱/۴ گیگانیوتن در مترمربع، ضرایب توزیع برای پابند مرکزی و مجاور آن به ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۲۳ است و این امر نشان دهنده تاثیر کم صلبیت خمشی دال بتنی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط است. بیشینه مقدار ضریب توزیع بار مقدار ۰/۵۴ است. مقایسه نتایج شکل (۷) با شکل (۶)، نشان می دهد که صلبیت خمشی دال بتنی تاثیر کمتری بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط در مقایسه با سختی پد زیر ریل دارد.

شکل ۸. تاثیر صلبیت خمشی دال بتنی بر نسبت بار جذب شده توسط پابند مرکزی

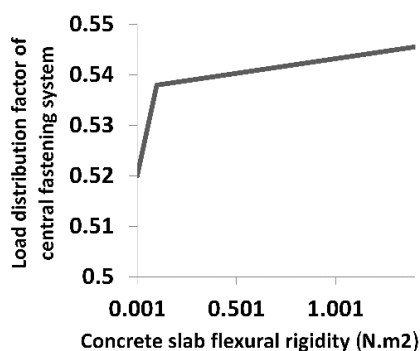


Fig. 8. Effect of concrete slab flexural rigidity on the central rail pad load ratio

جدول ۴. محدوده سختی فرش ارتجاعی

Type of elastic layer	Value	Unit
Low stiffness	۰,۰۰۵	GN/m
Medium stiffness	۱	GN/m
High stiffness	۵۰۰۰	GN/m

Table 4. Range of elastic layer stiffness

که تاثیر سختی پد زیر ریل و فاصله پابندها بر توزیع بار همزمان در نظر گیرند. همان گونه که در شکل (۶) نشان داده شده است، با افزایش سختی پد زیر ریل، سهم پابند مرکزی از بار قائم به شدت افزایش می یابد. به بیانی دیگر زمانی که سختی پد زیر ریل ۲۰، ۱۵۰ و ۵۰۰ مگانیوتن است، سهم پابند مرکزی از بار قائم به ترتیب ۰/۳۳، ۰/۵۴ و ۰/۶۹ است. به عبارتی دیگر، افزایش ۵/۷ و ۲۵ برابری سختی پد زیر ریل، منجر به افزایش ۱/۶ و ۲/۱ برابری سهم پابند مرکزی از بار قائم می شود. در نتیجه می توان بیان داشت که افزایش سختی پد زیر ریل، منجر به کاهش نرخ تاثیر سختی پد زیر ریل بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط می شود. نتایج بدست آمده در این بخش نشان می دهد که نسبت بار جذب شده توسط یک پابند در بازه ای بین ۰/۳ تا ۰/۷ متغیر بوده و میزان آن به شدت به مقدار سختی پد زیر ریل بستگی دارد.

۲.۳. بررسی تاثیر صلبیت خمشی دال بتنی بر توزیع بار قائم در راستای طولی

در این بخش، سه مقدار صلبیت خمشی کم، متوسط و زیاد به منظور بررسی تاثیر صلبیت خمشی دال بتنی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط در نظر گرفته شده است (جدول ۳). مقادیر ارائه شده در جدول (۳) بر اساس حدود بیشینه و کمینه مدول الاستیسیته بتن، ضخامت دال بتنی و عرض دال بتنی استفاده شده در روسازی دال خط راه آهن انتخاب شده اند [1].

شکل ۷. تاثیر صلبیت خمشی دال بتنی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط

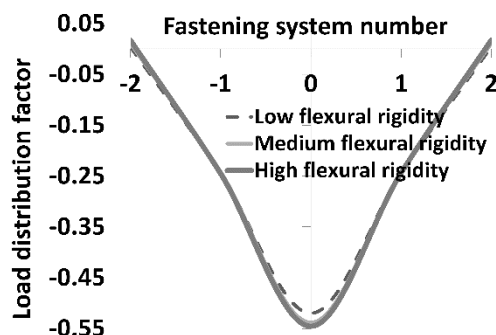


Fig. 7. Effect of concrete slab flexural rigidity on the vertical load distribution in track longitudinal direction

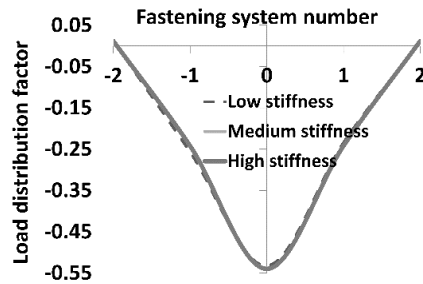


Fig. 9. Effect of elastic layer stiffness on the vertical load distribution in track longitudinal direction

همانگونه که در شکل (۹) نشان داده شده است، با افزایش سختی فرش ارتجاعی از ۰/۰۰۵ به ۵۰۰۰ گیگانیوتن بر متر، هیچگونه تغییر محسوسی در توزیع بار قائم در راستای طولی خط مشاهده نشده و در تمامی حالات ضرایب توزیع برای پابند مرکزی و مجاور آن به ترتیب در حدود ۰/۵۳ و ۰/۲۴ است. البته باید توجه داشت که در شکل (۹) اندکی تفاوت میان ضرایب توزیع حالات مختلف سختی فرش ارتجاعی مشاهده می شود که قابل چشم پوشی است. به منظور نشان دادن دقیق تر نتیجه مستخرج از شکل (۹)، در شکل (۱۱) تاثیر سختی فرش ارتجاعی بر نسبت بار جذب شده توسط پابند مرکزی نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، تغییرات سختی فرش ارتجاعی هیچگونه تاثیر محسوسی بر سهم پابند مرکزی از بار قائم نگذاشته و مقدار نسبت بار جذب شده توسط پابند مرکزی همواره حدود ۰/۵۴ است. این امر نشان می دهد که در نظر گرفتن مقدار سختی فرش ارتجاعی در مدلسازی روسازی دال خط و به منظور بررسی توزیع بار قائم در راستای طولی خط اهمیت چندانی ندارد.

شکل ۱۰. تاثیر سختی فرش ارتجاعی بر نسبت بار جذب شده توسط پابند مرکزی

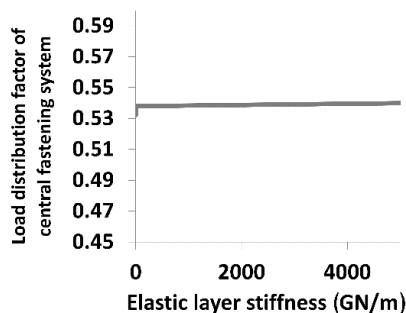


Fig. 10. Effect of elastic layer stiffness on the central rail pad load ratio

به منظور درک بیشتر تاثیر صلبیت خمشی دال بتنی بر سهم پابند مرکزی از بار قائم، در شکل (۸) نسبت بار جذب شده توسط پابند مرکزی بر حسب صلبیت خمشی دال بتنی ترسیم شده است. همانگونه که در شکل (۸) نشان داده شده است، با افزایش صلبیت خمشی دال بتنی، مقدار نسبت بار جذب شده توسط پابند مرکزی تا حدود ۰/۵۴ افزایش می یابد. نمودار ترسیم شده در شکل (۸) نشان می دهد که تغییرات صلبیت خمشی دال بتنی تاثیر کمی بر تغییر نسبت بار جذب شده توسط پابند مرکزی دارد.

۳.۳. بررسی تاثیر سختی فرش ارتجاعی بر توزیع بار قائم در راستای طولی

به منظور بررسی تاثیر سختی فرش ارتجاعی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط و مطابق با جدول (۴)، سه مقدار سختی کم، متوسط و زیاد برای فرش ارتجاعی در نظر گرفته شده است [1]. سختی فرش ارتجاعی با توجه به مدول الاستیسیته استاتیکی فرش ارتجاعی (E)، ضخامت فرش ارتجاعی (L) و سطح بارگذاری فرش ارتجاعی (A) و به کمک رابطه (۶) محاسبه می شود.

$$K_{pu} = \frac{AE}{L} \quad (6)$$

با توجه به بازه سختی و ضخامت فرش های ارتجاعی موجود و با توجه به ابعاد روسازی دال خط، مقادیر کمینه، متوسط و زیاد برای سختی فرش ارتجاعی در نظر گرفته شده است [15-16]. تاثیر سختی فرش ارتجاعی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط در شکل (۹) نشان داده شده است. نکته قابل توجه در نتایج ارائه شده در شکل (۹)، عدم تاثیر سختی فرش ارتجاعی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط است.

شکل ۹. تاثیر سختی فرش ارتجاعی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط

۴.۳. بررسی تاثیر صلبیت خمشی بستر بتنی بر توزیع بار قائم در راستای طولی

مطابق با جدول (۵)، سه مقدار کم، متوسط و زیاد برای صلبیت خمشی بستر بتنی در این بخش در نظر گرفته شده است، تا از این رهگذر بتوان تاثیر صلبیت خمشی بستر بتنی را بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط بررسی کرد. مقادیر صلبیت خمشی بستر بتنی بر مبنای، محدوده‌های موجود برای ضخامت بستر بتنی (بین ۲۵ تا ۶۰ سانتی‌متر)، عرض بستر بتنی (بین ۲ تا ۳ متر) و مدول الاستیسیته بستر بتنی انتخاب شده‌اند. در شکل (۱۱)، تاثیر صلبیت خمشی بستر بتنی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، صلبیت خمشی بستر بتنی هیچگونه تاثیر محسوسی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط ندارد. بر همین اساس و با توجه به شکل (۱۱)، در تمامی حالات صلبیت خمشی بستر بتنی ضرایب توزیع برای پابند مرکزی و مجاور آن به ترتیب در حدود ۰/۵۴ و ۰/۲۴ هستند.

جدول ۵. محدوده صلبیت خمشی بستر بتنی

Concrete base type	Value	Unit
Low flexural rigidity	۰,۰۰۱	GN. m ²
Medium flexural rigidity	۰,۱	GN. m ²
High flexural rigidity	۱,۴	GN. m ²

Table 5. Range of concrete base flexural rigidity

شکل ۱۱. تاثیر صلبیت خمشی بستر بتنی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط

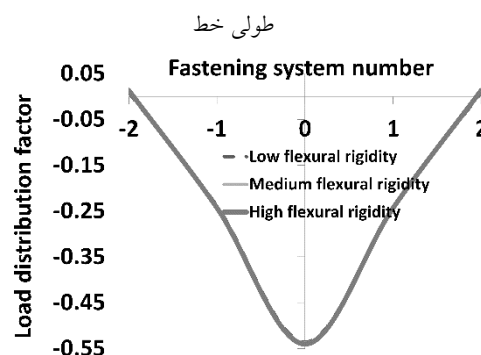


Fig. 11. Effect of concrete base flexural rigidity on the vertical load distribution in track longitudinal direction

عدم تاثیر محسوس صلبیت خمشی بستر بتنی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط در شکل (۱۲) نیز به خوبی

نمایان است. همان‌گونه که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، با افزایش صلبیت خمشی بستر بتنی، میزان نسبت بار جذب شده توسط پابند مرکزی به طور نامحسوسی افزایش پیدا می‌کند و به حدود ۰/۵۴ می‌رسد. مقدار این افزایش آنچنان ناچیز است، که می‌توان نتیجه گرفت تغییر صلبیت خمشی بستر بتنی هیچگونه تاثیری بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط ندارد.

شکل ۱۲. تاثیر صلبیت خمشی بستر بتنی بر نسبت بار جذب شده توسط

پابند مرکزی

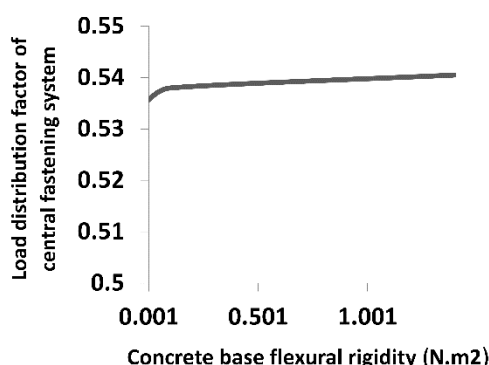


Fig. 12. Effect of concrete base flexural rigidity on the central rail pad load ratio

نتیجه بدست آمده از این بخش نشان می‌دهد که در شبیه سازی روسازی دال خط به منظور بررسی توزیع بار قائم در راستای طولی دال خط، در نظر نگرفتن بستر بتنی هیچگونه خطایی در رفتار پیش بینی شده توسط مدل ندارد. بر همین اساس و به منظور کاهش هزینه محاسبات مدل ساخته شده از روسازی دال خط، می‌توان از شبیه سازی بستر بتنی در مدل سازی روسازی دال خط صرف نظر کرد.

۴.۵. بررسی تاثیر سختی بستر خاکی بر توزیع بار قائم در راستای طولی

مانند بخش‌های پیشین این مقاله و به منظور بررسی تاثیر سختی بستر خاکی بر توزیع بار قائم در راستای طولی دال خط، سه مقدار کم، متوسط و زیاد برای سختی بستر خاکی در نظر گرفته شده است [1]. تاثیر سختی بستر خاکی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط در شکل (۱۳) نشان داده شده است. نتایج نشان داده شده در شکل (۱۳) نشان

همان‌گونه که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، در تمامی حالات سختی بستر خاکی، ضرایب توزیع برای پابند مرکزی و مجاور آن به ترتیب در حدود ۰/۵۴ و ۰/۲۴ است. همچنین همان‌گونه که در شکل (۱۴) نشان داده شده است، با تغییر سختی بستر خاکی از ۱۰ به ۳۰۰ مگانیوتن بر متر (افزایش ۳۰ برابری سختی بستر خاکی)، نسبت بار جذب شده توسط پابند مرکزی هیچگونه تغییر محسوسی نداشته و همواره در حدود ۰/۵۴ قرار دارد.

۴. نتیجه‌گیری

یکی از گام‌های مهم در تحلیل و طراحی روسازی دال‌خط راه‌آهن، داشتن اطلاعات کافی از چگونگی توزیع بار قائم در راستای طولی روسازی است. مسلماً هرگونه تغییر در سختی هر یک از اجزای روسازی، منجر به تغییر سختی روسازی دال‌خط (سختی سیستم حائل ریل) می‌گردد و می‌تواند منجر به ایجاد تغییراتی در توزیع بار در راستای طولی خط شود. در ادبیات موضوع این مسئله تاکنون به صورت جامع بررسی نشده و انجام این پژوهش در راستای دستیابی به پاسخ این مسئله است. در همین راستا، یک مدل عددی دو بعدی سه لایه از روسازی دال‌خط در فضای اجزای محدود که شامل ریل، پابند، دال بتنی پیوسته، فرش ارتجاعی و بستر بتنی پیوسته و بستر خاکی و در محیط برنامه‌نویسی FORTRAN شبیه‌سازی می‌شود. در این مدل عددی، وزن قائم یک چرخ ناوگان روی ریل و دقیقاً در بالای یک پابند اعمال می‌شود. با حل معادله تعادل حاکم بر مسئله، جابه‌جایی ریل و دال بتنی در محل پابندها، نیروی رسیده به هر یک از پابندها و ضریب توزیع بار در راستای طولی خط محاسبه می‌شوند.

با انجام تعدادی مطالعه پارامتریک، تاثیر پارامترهای سختی پد زیر ریل، صلبیت خمشی دال بتنی، سختی فرش ارتجاعی، صلبیت خمشی بستر بتنی و سختی بستر خاکی بر ضریب توزیع بار قائم در راستای طولی خط بررسی شده است. مطالعات پارامتریک انجام شده منجر به نتایج زیر شد:

دهنده عدم تاثیر سختی بستر خاکی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط است.

نتایج بدست آمده در این بخش تایید کننده نتایج بدست آمده در بخش پیشین (بررسی تاثیر صلبیت خمشی بستر بتنی) است. به بیانی دیگر، لایه‌های پایین‌تر روسازی (اجزای پایین‌تر روسازی) تاثیر کمتری بر توزیع بار قائم در راستای طولی دال‌خط در مقایسه با لایه‌های بالاتر (اجزای بالاتر روسازی) دارند. در همین راستا، سختی بستر خاکی کمترین تاثیر را در مقایسه با دیگر اجزای روسازی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط دارد.

جدول ۶. محدوده سختی بستر خاکی

Type of subgrade	Value	Unit
Low stiffness	۱۰	MN/m
Medium stiffness	۱۵۰	MN/m
High stiffness	۳۰۰	MN/m

Table 6. Range of subgrade stiffness

شکل ۱۳. تاثیر سختی بستر خاکی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط

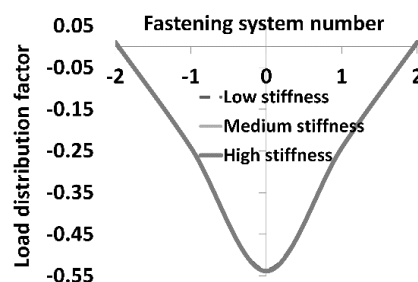


Fig. 13. Effect of subgrade stiffness on the vertical load distribution in track longitudinal direction

شکل ۱۴. تاثیر سختی بستر خاکی بر نسبت بار جذب شده توسط پابند مرکزی

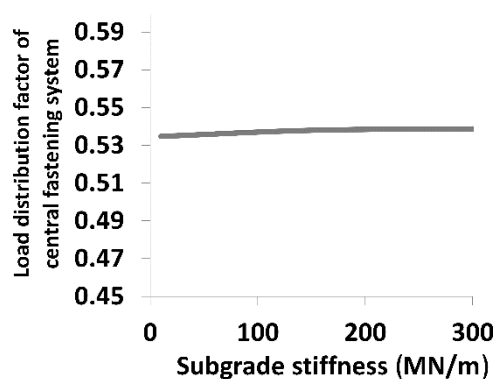


Fig. 14. Effect of subgrade stiffness on the central rail pad load ratio

architecture and urban engineering, Tehran, Iran (in Persian).

4- American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, AREMA, 2006 Concrete Slab Track.

5- Zakeri J.A. & Sadeghi J. 2007 Field investigation on load distribution and deflections of railway track sleepers. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 21(1), 1948-1956.

6- Greve M., Dersch M.S., Edwards J.R., Barkan P.L., Mediavilla J. & Wilson B.M. 2014 Analysis of the Relationship Between Rail Seat Load Distribution and Rail Seat Deterioration in Concrete Crossties. *Joint Rail Conference*, 1-6, Colorado, USA.

7- Esmaeili M., Yousefian K. & Nouri R. 2017 Vertical load distribution in ballasted railway tracks with steel slag and limestone ballasts. *International Journal of Pavement engineering*, 71(1), 1-8.

8- Matias S. 2015 Numerical modeling and design of slab track: comparison with ballasted tracks. *Master of science thesis*, University of Lisbon, Portugal.

9- Blanco Lorenzo J., Santamaria J., Vadillo E.G. & Oyarzabal, O. 2011 Dynamic comparison of different types of slab tracks and ballasted track using a flexible track model. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 225(1), 574-592.

10- Song H., Bian X., Chen Y. & Jiang J. 2011 An analytical approach for slab track vibration with train-track-ground coupling effect, *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics*, EURODDYN, Leuven, Belgium.

11- Sadeghi J., Liravi H. & Esmaeili M.H. 2017 Experimental investigation on loading pattern of railway concrete slabs. *Construction and Building Materials*, 153(1), 481-495.

12- Baker T. 2016 Analysis on the Behaviour of FRP Reinforced Concrete Railway Sleepers. *Research Project*, University of Southern Queensland.

13- Przemieniecki J. 1985 Theory of matrix structural analysis. *Dover Publications*, New York.

14- Labibzadeh M. & Dadak M. 2018 Determining of load bearing capacity of rectangular concrete columns reinforced with longitudinal spirals using FEM and ANN methods. *Journal of structural and construction engineering*, 11(1), 1-21 (in Persian).

15- Getzner. 2001 Sylomer description of a special elastomer, Getzner Work Stuffed GmbH, Bludenz, Austria.

16- Getzner. 2001 Vibration isolation by means of sylomer materials, Getzner Works Stuffed GmbH, Bludenz, Austria.

- سختی پد زیر ریل، تاثیر بسیار زیادی بر توزیع بار قائم در راستای طولی خط دارد. هر چه که سختی پد زیر ریل کاهش یابد، بار قائم به صورت گسترده تری در راستای طولی خط توزیع می شود. با تغییر سختی پد زیر ریل از کم به زیاد، بیشینه نسبت بار جذب شده توسط یک پابند در بازه ای بین $0/3$ تا $0/7$ متغیر است.

- صلبیت خمشی دال بتنی در مقایسه با سختی پد زیر ریل تاثیر کمتری بر روی توزیع بار قائم در راستای طولی خط دارد. زمانی که صلبیت خمشی دال بتنی از مقدار کم به زیاد تغییر می کند، بیشینه نسبت بار جذب شده توسط یک پابند در بازه ای بین $0/51$ تا $0/54$ متغیر است.

- نتایج بدست آمده نشان دهنده تاثیر بسیار ناچیز سختی فرش ارتجاعی، صلبیت خمشی بستر بتنی و سختی بستر خاکی بر توزیع بار در راستای طولی خط دارد. این امر بدین معناست که جابه جایی ایجاد شده در ریل بسیار متاثر از سختی پد زیر ریل است و سختی اعضای دیگر نقش بسیار کمی را در تغییر شکل ریل دارند.

- به منظور شبیه سازی روسازی دال خط و بررسی توزیع بار قائم در راستای طولی روسازی دال خط و کاهش هزینه محاسبات آن، نیازی به در نظر گرفتن آثار فرش ارتجاعی، بستر بتنی و بستر خاکی نیست. این امر در حالیکه به منظور بررسی توزیع بار قائم در راستای طولی روسازی دال خط حتما باید آثار پد زیر ریل و صلبیت خمشی دال بتنی در شبیه سازی روسازی دال خط لحاظ شود.

References

۵. مراجع

- 1- Khajehdezfuly A. 2016 investigation of the effects of track and vehicle parameters on the dynamic load in railway slab track. PhD thesis, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran (in Persian).
- 2- Khajehdezfuly A. 2018 Calculation of minimum thickness of railway slab track using AASHTO method. *Journal of transportation research*, 15(1), 1-23 (in Persian).
- 3- Khajehdezfuly A. & Sakipour Sh. 2018 prediction of railway slab track life cycle using PCA method. *Proceeding of 4th national conference in civil*,

Investigation of the effects of slab track properties on the vertical load distribution in the longitudinal direction

Amin Khajehdezfuly^{1*}, Abdolghafoor Khademalrasoul¹, Mojtaba Labibzadeh¹

¹ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

amin_dezfuly@scu.ac.ir

Abstract

Nowday, slab track is widely used in the world as railway supresturture because its advantages in comprison with conventioanl ballasted railway superstureure. So, design and analysis process of railway slab track is one the main issues in recent researches. One of the main factor in the design and analysis of slab track is distrubtion of vertical load on longitudinal direction of the track (load distribution factor). In this paper, a 2D numerical model is developed in FORTRAN to investigate the effect of slab track properties on the load distribution factor. In this model, the slab track is comprised of rail, fastening system, concrete slab, elastic layer, concrete base and subgrade. Rail, concrete slab and concrete base are modeled as two nodeded beam element and fastening system, elastic layer and subgrade are simulated as spring element. According to the elements stiffness matrices, slab track stiffness matrix is developed. A wheel load is applied on the rail (in the middle of the model). Based on the two noded beam element shape functions, load vector of the model is developed. The equilibrium equation of the model is solved and load distribution factor is derived. To investigate the validity of the results obtained from the model, a comparsion is made between results obtained from the model and those of ABAQUS as a commercial finite element software. Rail displacement, concrete slab displacement, concrete base displacement and load distribution factor obtained from the ABAQUS are compared with those of the model developed in this paper and a very good agreement was illustrated between results. A parametric study was performed to investigate the effects of rail flexural rigidity, fastening system stiffness, concrete slab flexural rigidity, elastic layer stiffness, concrete base flexural rigidity and subgrade stiffness on the load distribtion factor. The results obtaine from the parametric study indicate that as the slab track element stiffness or flexural rigidity is decreased, the load distribution factor is decreased and vertical load is distributed widely in the longitudinal direction of the track. Rail pad stiffness has the maximum effect on the load distribution factor reletive to the other parameters. As the rail pad stiffness is changed from lowest to highest magnitude, the load distribution factor is varied from 0.3 to 0.7. The results obtained in this research indicate that propeties of lower slab track elements have lower effects on the load distribution factor compared to the upper slab track elements. So when the flexural rigidity of the concrete slab is changed from low to high, load distribution factor is changed from 0.52 to 0.54. Moreover, when the elastic layer stiffness, concrete base flexural rigidity and subgrade stiffness are changed from low to high, the load distribution factor are almost unchanged and is roughly 0.54. This shows that elastic layer stiffness, concrete base flexural rigidity and subgrade stiffness do not have any significant effects on the load distribution factor. So when a model is developed to calculate the load distribution factor and dcrease of analysis computation cost, elastic layer stiffness, concrete base flexural rigidity and subgrade stiffness could be ignored in the model.

Keywords: Slab track railway, load distribution factor, finite element method, three layers