

بررسی تاثیر نیروی حرارتی ریل در رفتار دینامیکی خط تحت اثر بار متحرک

امیرحسام تقی پور، دانشجوی دکتری مهندسی خطوط راه آهن، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

جبار علی ذاکری سردودی (نویسنده مسئول)، استاد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

E-mail: zakeri@iust.ac.ir

سید علی مسیعی، استاد یار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۹

دریافت: ۱۳۹۸/۷/۲۴

چکیده

خطوط ریلی همواره در معرض بارهای قائم و جانبی و محوری (طولی) که برای انواع راه آهن ها دارای مقادیر متفاوت هستند، قرار دارند. تغییرات دما ناشی از انقباض و انبساط ریل (نیروهای حرارتی)، نیروهای شتاب و ترمزگیری در واگن ها و لوکوموتیوها و بسیاری از عوامل دیگر باعث ایجاد نیروهای محوری بالایی در خط آهن می شود که عدم کنترل این نیروها ممکن است منجر به کاهش پایداری خط و در نهایت موجب وقوع پدیده کمانش گردد. در این مقاله ابتدا سازه خط آهن بالاستی به صورت یک مدل سه لایه و با استفاده از نرم افزار مهندسی مدل سازی شده و اثرات عدم اعمال نیروی محوری طولی، اعمال نیروی محوری طولی کششی و اعمال نیروی طولی فشاری بر روی پارامترهایی نظیر جابجایی، سرعت و شتاب ریل، سرعت و شتاب تراورس، سرعت و شتاب بالاست همزمان با اعمال یک بار متحرک قائم با استفاده از روش عددی ویلسون-تتا بررسی شده است و سپس با انجام تحلیل حساسیت به ازای مقادیر مختلف نیروی طولی و به ازای سرعت های مختلف سیر قطار از سرعت ۳۶ کیلومتر بر ساعت تا ۳۶۰ کیلومتر بر ساعت تغییرات جابجایی، سرعت و شتاب ریل و تراورس و بالاست بصورت نمودارهای تاریخچه زمانی ارائه گردیده است. نتایج بررسی ها نشان داد که افزایش مقادیر نیروی محوری طولی و هم چنین افزایش سرعت سیر قطار در حالت اعمال یک بار متحرک قائم باعث افزایش مقادیر جابجایی، سرعت و شتاب هم در ریل و هم در تراورس و بالاست شده است.

واژه های کلیدی: رفتار دینامیکی خط و قطار، نیروی حرارتی، خطوط بالاستی، سرعت قطار

۱. مقدمه

را تحت تأثیر قرار داده و به بیان دیگر در هر گام زمانی با ماتریس سختی یا به نوعی معادلات جدیدی سروکار خواهیم داشت. در تحلیل مسائل اندرکنش خط و قطار با روش المان‌های محدود با توجه به ماهیت متحرک وسیله نقلیه نیاز است تا بردار بار در هر گام زمانی اصلاح شود تا موقعیت صحیح بار در هر لحظه در محاسبات وارد گردد. [Mosayebi, Zakeri and Esmaili, 2017] در ضمن با توجه به وجود سختی تماسی بین وسیله نقلیه و ریل در صورت در نظرگیری اثر وسیله و جرم و سختی آن در تحلیل نیاز است تا ماتریس‌های سختی و میرایی و جرم نیز متناسب با حرکت وسیله نقلیه در هر گام زمانی اصلاح گردند. [Zakeri et al, 2016] همچنین در این تحلیل نیاز است تا برای محدود کردن المان‌های ساخته شده شرایط مرزی مصنوعی در انتهای مدل ریل‌ها ایجاد گردد.

۲. سوابق تحقیق

با توجه به اهمیت موضوع تحلیل سازه خط آهن تحت انواع بارهای وارد بر آن در این قسمت به مرور انواع مدل سازی‌های انجام شده بر روی سیستم خط-قطار توسط دانشمندان و محققین مختلف پرداخته شده است. شاید بتوان کتاب فوق‌العاده فرایبا [Fryba, 2002] را به عنوان جامع‌ترین مرجع برای حل مسئله بار متحرک در نظر گرفت، ایشان در کتاب خود مسئله بار متحرک بر روی تیرهای اوپلر برنولی را به صورت تحلیلی حل نموده‌اند. روش دیگری که برای حل مسئله بار متحرک به کار گرفته شده استفاده از روش تبدیل فوریه بوده است که مسئله را در محیط فرکانس حل می‌نماید. این روش نیز با توجه به حل تحلیلی و دقیق مسئله دارای محدودیت‌های زیادی خصوصاً در نوع بارگذاری است و در مسائل پیچیده با مشکلاتی روبرو می‌باشد [Bitzenbauer and Dinkel, 2002] تیموشنکو استفاده از سیستم مختصات متحرک را برای به دست آوردن راه حل شبه حالت پایدار یک تیر نامحدود پیشنهاد کرد. تیر روی بستر الاستیک بوده و در معرض یک بار ثابت که با سرعت ثابت

باتوجه به ماهیت دینامیکی مسئله اندرکنش خط و قطار، به ناچار محققین مجبور به تحلیل دینامیکی اثرات انواع نیروهای وارد بر خط آهن هستند. تحلیل دینامیکی اندرکنش خط و قطار به ویژه در سالهای اخیر مورد توجه و علاقه‌ی بسیاری از محققین بخصوص مهندسين راه آهن قرار گرفته است. یک از چالش‌های اصلی در بررسی رفتار دینامیکی خط آهن ارزیابی ماتریس سختی سیستم است چرا که با توجه به ماهیت دینامیکی حرکت قطار این ماتریس با گذشت زمان مدام در حال تغییر است [Mosayebi, Zakeri and Esmaili, 2016] از گذشته تاکنون روش‌های مختلفی برای تحلیل دینامیکی خط و قطار مورد استفاده محققین قرار گرفته است. در طول سالیان محققین هر بار فرضیات کامل‌تر و واقعی‌تری را برای حل این مسئله مدنظر قرار داده‌اند، از بار متحرک گرفته تا مدل‌های کامل‌تر وسیله نقلیه متحرک چند درجه آزادی که در جای خود استفاده شده‌اند [دادگستر، ۱۳۹۵] در این بین سیستم خط و زیرسازی نیز از مدل‌های ساده مانند تیر بر روی بستر ارتجاعی تا مدل‌های دقیق‌تر امروزی مورد استفاده محققین بوده است. بعد از دارای روش‌های متفاوتی است. روش‌های مختلفی در حل مسائل اندرکنش خط و قطار استفاده شده که از این روش‌ها می‌توان روش‌های مبتنی بر حل بسته نظیر تبدیل فوریه و روش‌های حل عددی نظیر روش المان محدود را نام برد. روش‌های المان متحرک و المان طیفی نیز اخیراً در حل مسائل محدود بر اساس مدل مورد نظر درجات آزادی مشخص شده و با در نظر گرفتن شرایط مدل، معادلات مربوطه نوشته شده و با حل معادلات فوق تحلیل مورد نظر صورت می‌پذیرد. باید توجه داشت که در روش فوق به دلیل متغیر بودن بار که همان وسیله نقلیه است، در هر گام زمانی قسمت‌های متغیر ماتریس سختی

داشت را محاسبه نمودند. همچنین یک مطالعه موردی^۲ نیز برای بررسی دینامیکی مدل انجام دادند. مدل خطی که ایشان مورد استفاده قرار دادند، مدل تیر تیموشنکو روی تکیه گاه های الاستیک مجزا بود و بالاست و تراورس به صورت توده جرم مدل شده و از طریق فنر و دمپر به یکدیگر متصل شده بودند. مدل وسیله نقلیه را به صورت بدنه واگن با دو بوژی و چرخ ها مدل کردند. ایشان همچنین توانستند طول مناسب برای حداقل کردن اثرات مرزی روی پاسخ سیستم خط و قطار را برای مدل خویش به دست آورند. گه و همکاران نوعی از کاربرد روش مختصات متحرک را تحت عنوان روش المان متحرک به کار بستند [Koh, C et al, 2003] در این پروژه یک مدل بر مبنای مختصات متحرک جهت تحلیل دینامیکی سازه ی خط ایجاد کردند. المان های متحرکی در نظر گرفتند که همراه با بار روی بستر ویسکوالاستیک حرکت می کنند. بر مبنای ذکر شده معادلات را حل نمودند و به نتایج خوبی دست یافتند. ایشان روش را تشریح کرده و با مطالعه ی عددی چهار مسئله نتایج حاصل از این روش را با نتایج به دست آمده از دیگر روش ها نظیر المان محدود و تبدیل فوریه مقایسه کردند.

لوو و همکاران یک مدل محاسباتی دینامیکی برای تحلیل ارتباط بین فرکانس های طبیعی ریل و تنش طولی حرارتی ناشی از تغییرات دمایی در نظر گرفتند. مدل دینامیکی آن ها شامل ریل، تراورس و بستر می باشد. عواملی مانند اثر پروفیل مقطع ریل، میزان سایش ریل و سختی پابندها نیز در این تحلیل مد نظر قرار گرفته است. ایشان در این تحلیل از روش عددی برای حل مسئله استفاده کردند. تاثیرات پارامترهایی مانند تغییر فاصله بین تراورس، تغییر مقاطع ریل، تغییر سختی پابندها و تغییر سختی بستر بر روی خروجی های این تحلیل در این پژوهش دیده شده است. هم چنین یک مدل میدانی از خط آهن بالاستی برای یافتن ارتباط بین مشخصات دینامیکی ریل و تنش های حرارتی که منجر به انقباض یا انبساط در طول ریل می شوند، و برای اندازه های مختلف فاصله بین دو تراورس در نظر گرفته شد. در نهایت

حرکت می کند قرار دارد وی از روش تبدیل فوریه برای حل معادلات دیفرانسیل به دست آمده استفاده نمود [Tran, Ang and Luong, 2014] بیات خمش یک تیر نامحدود را روی بستر ارتجاعی مورد بررسی قرار داد. هدف مطالعه این بود که راه حل دقیق تری نسبت به راه حل های قبل ارائه دهد. دو نوع بستر را برای محاسبات در نظر گرفت، یک بار بستر را به صورت دوبعدی و بار دیگر به صورت سه بعدی لحاظ نمود. در مورد اول یک بار سینوسی و برای حالت دوم بار سینوسی مضاعف را بر بستر اعمال نمود. با استفاده از تبدیل فوریه، خمش حاصله در تیر را به دست آورده و آن را برای دو حالت بستر دوبعدی و سه بعدی باهم مقایسه کرده و نتایج را تفسیر کرد. [Biot, 1922] ایشان طی این مطالعه پی بردند که تئوری اولیه تقریب خوبی از مقدار حقیقی است و می توان به علت ساده تر بودن آن نسبت به تئوری دوم آن را به کار گرفت. لوو یک مدل دینامیکی برای بررسی تاثیر نیروی حرارتی بر ریل با جوشکاری پیوسته در خط آهن بالاستی در نظر گرفت. ایشان در این پژوهش ویژگی های مختلف دینامیکی ریل مانند فرکانس های طبیعی و مودهای ارتعاشی تحت اثر بار طولی حرارتی ناشی از تغییرات دمایی را مورد بررسی قرار داد و همچنین بار وارده به ریل نیز به صورت یک بار هارمونیک و متمرکز در وسط دهانه ریل در نظر گرفت. تاثیر پارامترهای مختلف خط آهن مانند جرم ریل، سختی گره های تکیه گاهی نیز در این تحقیق در نظر گرفته شده است و در نهایت از خروجی این مقاله درک مشکلات هندسی و سازه ای خط آهن استفاده شده است.

(Luo, 1999)

ذاکری و شیا المان محدود دوبعدی را برای حل اندرکنش دینامیکی خط و قطار به کار بستند. ایشان برای کاهش اثرات شرایط مرزی روی پاسخ دینامیکی خط و قطار ترکیبی از المان های محدود و دو المان نامحدود را به کار گرفتند [Zakeri and Xia, 2008] به این صورت که دو المان نامحدود در دو انتهای مدل خط برای کاهش اثرات شرایط مرزی در نظر گرفتند. با به کارگیری توابع شکل^۱ ماتریس های جرم، سختی و میرایی را برای المان نامحدود که روی بستر ویسکوالاستیک قرار

استفاده از روش عددی ویلسون-تتا برای سرعت های ۳۶ تا ۳۶۰ کیلومتر بر ساعت و برای حالت های مختلف بدون اعمال نیروی طولی، اعمال نیروی طولی فشاری به خط آهن، اعمال نیروی طولی کششی به خط آهن در این مقاله ارایه گردیده است و نتایج آن در قسمت اعتبار سنجی با نتایج سایر محققین مقایسه شده است.

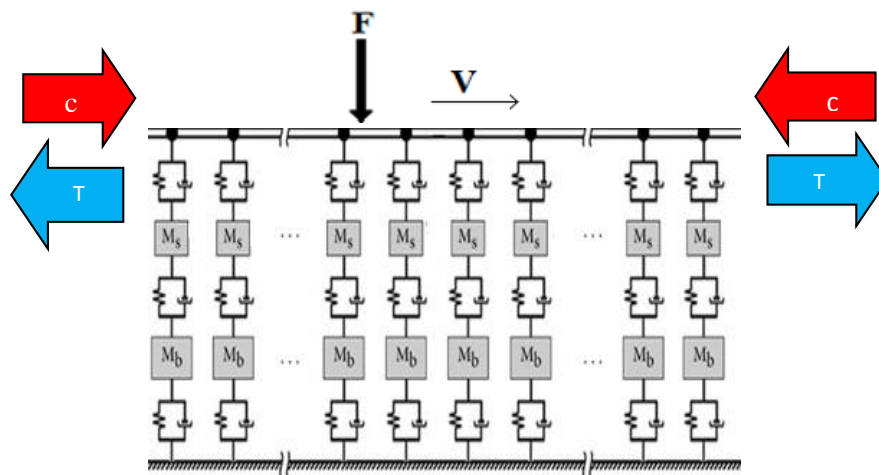
۳-۱ مدل سازی و فرضیات مسئله

مدل خط و بار متحرک در شکل (۱) قابل مشاهده است که همان طورکه در قسمت بالانیز ذکر شد، در این مقاله مدل مورد بررسی در سه حالت بدون در نظر گرفتن نیروی طولی (محوری)، در حضور نیروی طولی فشاری C و نیروی محوری طولی کششی T مطابق شکل (۱) در نظر گرفته شده است. در هر سه حالت بار F با سرعت ثابت V روی ریل و بر روی بستر ویسکوالاستیک حرکت می کند. ریل به صورت تیر بی نهایت اویلر - برنولی بر روی بستر ویسکوالاستیک مدل گردیده است. ریل دارای مدول الاستیسیته E و ممان اینرسی I و جرم واحد طول \bar{m} است. همچنین میرایی و سختی واحد طول بستر ویسکوالاستیک به ترتیب برابر با \bar{c} و \bar{k} می باشند.

خروجی های حاصل از مدل میدانی با خروجی های مدل عددی مقایسه شده است. [Luo, Li and Yin, 2010]

۳. تعریف مسئله

در این تحقیق ابتدا مدل خط آهن بالاستی به صورت مدل سه لایه (ریل، تراورس، بالاست) و با استفاده از نرم افزار متلب مدل شده است. بار وسیله نقلیه در این مقاله به صورت بار متحرک قائم مدل شده است لذا تعداد درجات آزادی کل سیستم برابر تعداد درجات آزادی خط آهن است. این درجات آزادی شامل دو درجه آزادی برای حرکت انتقالی قائم و دورانی برای هر گره ریل، یک درجه آزادی انتقالی قائم برای هر توده جرم بالاست و یک درجه آزادی انتقالی قائم برای هر تراورس است. سیستم خط آهن مدنظر در این پژوهش شامل ۱۶۸ گره ریلی، ۱۶۶ گره دارای توده جرم بالاستی و ۱۶۶ گره دارای تراورس است. لذا تعداد کل درجات آزادی برای ریل برابر ۳۳۶ درجه آزادی و برای هر کدام از اجزای بالاست و تراورس برابر ۱۶۶ درجه آزادی می باشد. در نتیجه تعداد کل درجات آزادی ذکر شده در این قسمت برابر ۶۶۸ درجه آزادی می باشد. در این مقاله همچنین بار متحرک قائم با سرعت ثابت روی خط آهن حرکت می کند که نتایج و نمودارهای خروجی از این بررسی با



شکل ۱. مدل خط آهن بالاستی سه لایه در حالت وجود بار متحرک قائم F و اعمال همزمان نیروی طولی فشاری C یا نیروی طولی کششی T

$$EI \left(\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \right) + \bar{m} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right) + \bar{c} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) + \bar{k} y = F(t) \delta(x - Vt) \quad (1)$$

با توجه به مشخصات عنوان شده معادله حاکم بر المان های تیر ریل به صورت زیر خواهد بود [ذاکری و شاه بابایی، ۱۳۹۴]

و برای ماتریس سختی نیز ابتدا برای المان دو گرهی به طول L فرم ماتریسی به شکل زیر است:

$$[K] = EI \begin{bmatrix} \frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} & -\frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} \\ -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} & \frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} \\ \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} & \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ -\frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} & \frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{bmatrix} \quad (7)$$

E = مدول الاستیسیته فولاد ریل، I = ممان اینرسی پروفیل ریل
ماتریس میرایی سیستم با رعایت موارد زیر همانند ماتریس سختی می باشد: ۱- ترم های K در سیستم به تغییر پیدا می کند ۲- ماتریس میرایی ریل نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (8)$$

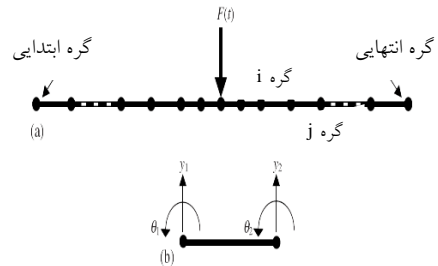
حال با توجه به اینکه هدف این تحقیق بررسی اثر نیروی محوری است لذا ماتریس سختی هندسی برای المان دو گرهی با در نظر گرفتن اثر نیروی محوری (طولی) P بدین صورت خواهد شد:

$$[K] = EI \begin{bmatrix} \frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} & -\frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} \\ -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} & \frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} \\ \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} & \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ -\frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} & \frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$-P \begin{bmatrix} \frac{6}{5L} & -\frac{1}{10} & -\frac{6}{5L} & -\frac{1}{10} \\ \frac{1}{2L} & \frac{1}{15} & \frac{1}{2L} & -\frac{30}{10} \\ -\frac{10}{6} & \frac{1}{6} & \frac{10}{6} & \frac{1}{6} \\ -\frac{5L}{10} & \frac{10}{30} & \frac{5L}{10} & \frac{10}{15} \\ \frac{1}{10} & -\frac{L}{30} & \frac{1}{10} & \frac{2L}{15} \end{bmatrix}$$

هم چنین فرم ماتریس سختی برای حالت بار متحرک قائم به صورت زیر خواهد بود:

در رابطه (۱) نیروی دینامیکی در محل تماس و δ نشان دهنده دلتای دیراک است که نشان دهنده وجود مرکز مختصات ثابت در طول ریل است. این دستگاه مختصات در جهت سهولت در محل $x = 0$ و $t = 0$ در نظر گرفته می شود و y نشان دهنده جابجایی های قائم است. در شکل (۴) مدل المان بندی ریل و محل قرارگیری وسیله یا بار قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که در مقاله حاضر مقدار نیروی F در طرف دوم معادله ریل صفر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. مدل خط و وسیله نقلیه در حالت وجود بار متحرک قائم
برای تشکیل ماتریس توابع شکل در المان تیر می توانیم از توابع درجه سوم هرمیتین استفاده نماییم.

$$N_1 = \frac{1}{L^3} (2x^3 - 3x^2L + L^3) \quad (2)$$

$$N_2 = \frac{1}{L^3} (x^3L - 2x^2L^2 + xL^3) \quad (3)$$

$$N_3 = \frac{1}{L^3} (-2x^3 + 3x^2L) \quad (4)$$

$$N_4 = \frac{1}{L^3} (x^3L - x^2L^2) \quad (5)$$

متناسب با درجات آزادی المان توابع شکل فوق با درجات آزادی زیر متناسب می باشند.

$$(y_1 \text{ و } \theta_1 \text{ و } y_2 \text{ و } \theta_2)$$

فرم ماتریس استفاده شده برای ماتریس جرم در این تحقیق به صورت زیر است:

$$[M] = \frac{M}{420} \begin{bmatrix} 156 & 54 & 22L & -13L \\ 54 & 156 & 13L & -22L \\ 22L & 13L & 4L^2 & -3L^2 \\ -13L & -22L & -3L^2 & 4L \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن L طول المان و M جرم کل المان می باشد.

فاصله زمانی Δt وجود دارد. معادله حرکت یک سیستم دینامیکی یک درجه آزادی ویسکوز خطی می باشد که به فرم رابطه (۱۲) می تواند بیان شود:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(t) \quad (12)$$

که در آن، M ، C و K به ترتیب جرم، میرایی و سختی سیستم می باشند. $F(t)$ نیروی اعمالی می باشد. همچنین X ، \dot{X} و \ddot{X} به ترتیب جابجایی، سرعت و شتاب سیستم هستند. همچنین فرم کلی معادلات حرکت برای یک سیستم چند درجه آزادی طبق رابطه می باشد:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F(t)\} \quad (13)$$

دو روش اصلی که برای انتگرال گیری مستقیم مورداستفاده قرار می گیرد عبارتند از: ۱- روش صریح^۶ ۲- روش ضمنی^۷ یکی از روش های مورداستفاده در گروه روش های ضمنی، روش ویلسون-تتا است که به دلیل صحت و دقت روش و همچنین کاربرد زیاد این روش توسط محققین قبل، این روش در این پروژه برای حل معادلات نهایی استفاده شده است که الگوریتم آن به صورت ترسیمی در ادامه ارائه گردیده است:

| | | |
|------------|---------------|---------------|
| ریل | ریل/تراورس | • |
| تراورس/ریل | تراورس | تراورس/بالاست |
| • | بالاست/تراورس | بالاست |

در تحقیق حاضر معادلات حرکت تراورس و بالاست نیز بدین صورت است:

معادله حرکت تراورس:

$$Z_S \quad (10)$$

$$M_{si} \ddot{Z}_{si} + K_{pi} (Z_{si} - Z_R) + K_{bi} (Z_{si} - Z_{bi}) + C_{pi} (\dot{Z}_{si} - \dot{Z}_R) + C_{bi} (\dot{Z}_{si} - \dot{Z}_{bi}) = 0$$

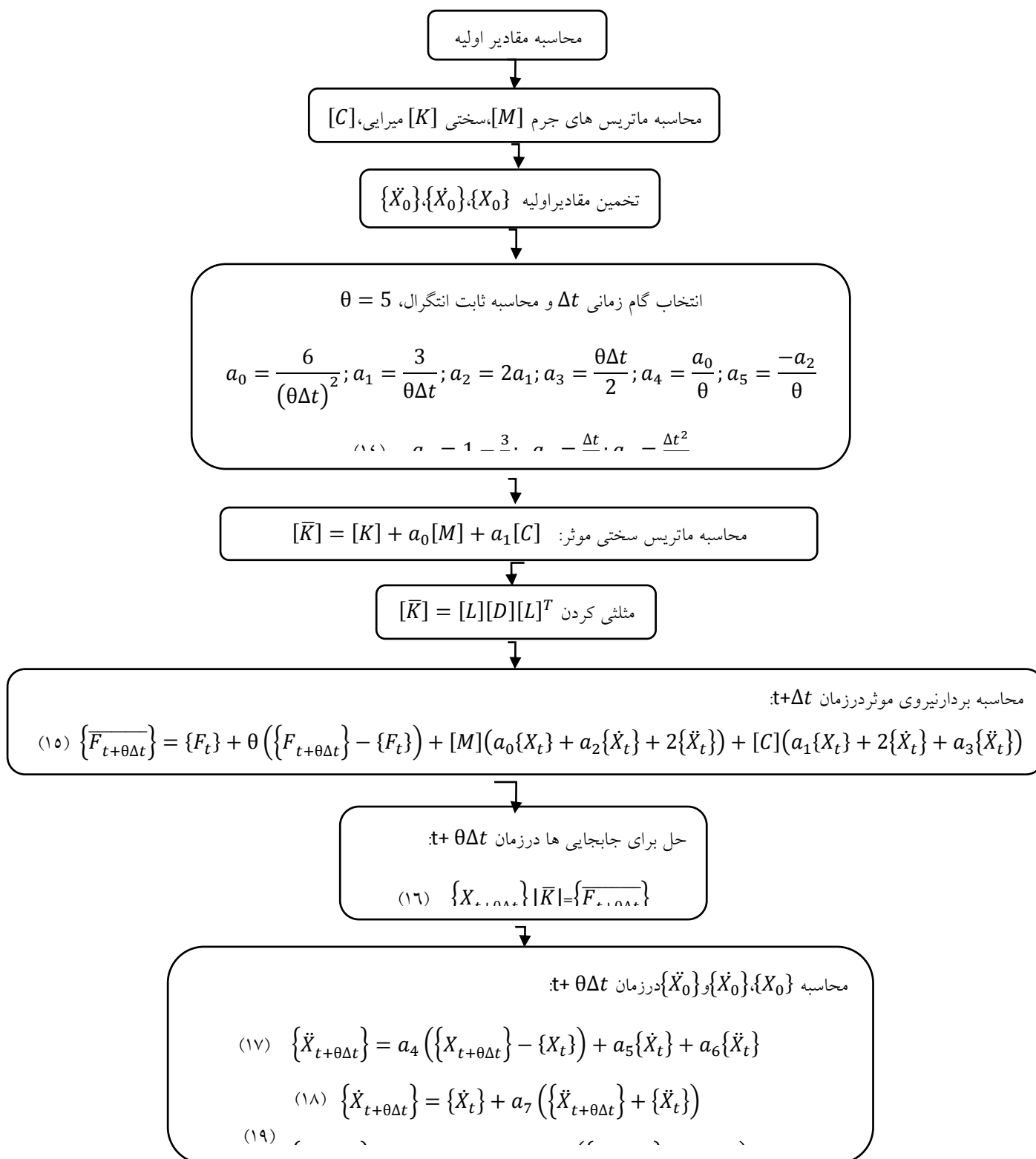
معادله حرکت بالاست:

$$Z_B \quad (11)$$

$$M_{bi} \ddot{Z}_{bi} + K_{bi} (Z_{bi} - Z_{si}) + k_f Z_{bi} + C_{bi} (\dot{Z}_{bi} - \dot{Z}_{si}) + C_f \dot{Z}_{bi} = 0$$

۲-۳ روش حل معادلات سیستم

رفتار سیستم های دینامیکی تحت تاثیر تغییرات وابسته به زمان براساس معادلات دیفرانسیل عادی^۴ قابل بررسی است. هنگامی که معادلات دیفرانسیل یک سیستم متحرک به شکل بسته^۵ قابل حل نباشند، روش های عددی بسیار مفید می باشند. روش های انتگرال گیری عددی زیادی برای حل تقریبی چنین معادلات حرکتی موجود است. همه روش های عددی دارای دو خصوصیت اصلی می باشند. اولاً، آنها معادلات دیفرانسیل در همه زمان t را ارضا نمی کنند اما در فواصل زمانی مشخص مثلاً Δt قابل محاسبه می باشند. ثانیاً، با توجه به هر فاصله زمانی Δt ، یک نوع مشخصی از تغییرات جابجایی X ، سرعت \dot{X} و شتاب \ddot{X} فرض می شود. بنابراین چندین روش انتگرال گیری عددی وابسته به نوع تغییر فرض شده برای X ، \dot{X} و \ddot{X} با هر



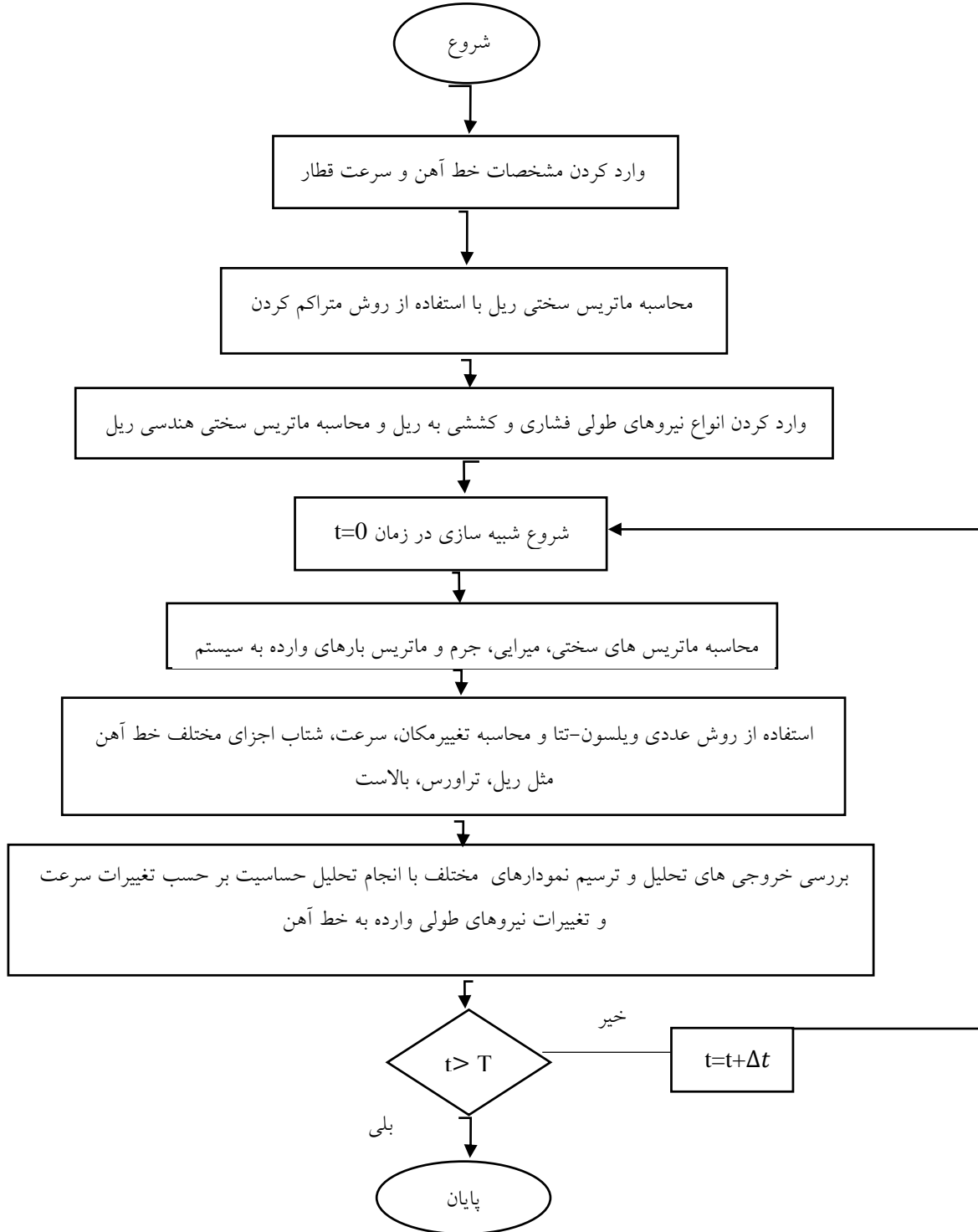
شکل ۳. الگوریتم نحوه استفاده از روش عددی ویلسون-تتا در حل معادلات سیستم

آهن ۲، ۱۰۰ متر فرض شده است که شامل ۱۶۷ المان کوچک به طول ۰،۶ متر و ۱۶۸ گره است که گره های ابتدایی و انتهایی به صورت تکیه گاه های مفصلی ثابت می باشند. در این حالت بار

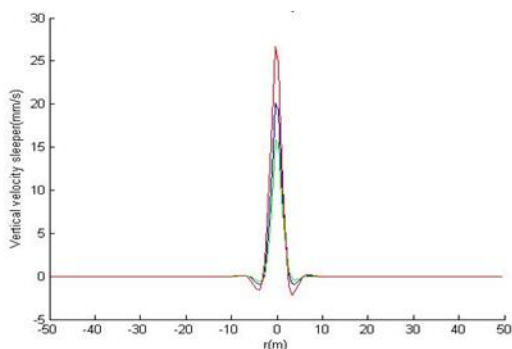
۴. نتایج تحقیق و تفسیر آن ها

در تحقیق حاضر با استفاده از نرم افزار متلب یک بار متحرک قائم بر روی خط آهن قرار داده شده است. در این حالت طول خط

متحرک قائم روی خط آهن به صورت نیروی قائم متحرک بامیزان ۱۰۰۰۰۰ نیوتون برخط وارد می‌گردد. این نیروی متحرک با سرعت ۲۰ m/s در طول خط حرکت می‌کند. شکل (۴) الگوریتم مربوط به نحوه استفاده از این نرم افزار در این پژوهش برای فهم بهتر موضوع را نشان می‌دهد.

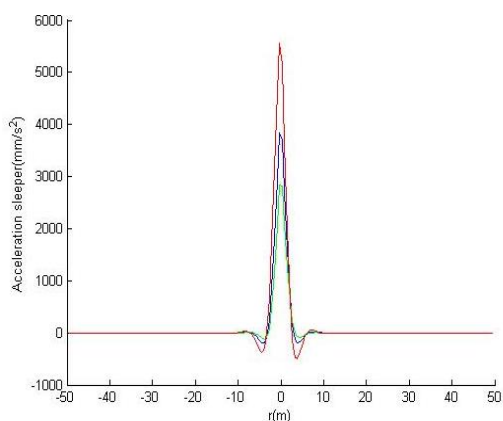


شکل ۴. الگوریتم استفاده شده با استفاده از نرم افزار متلب جهت تحلیل حرکت بار قائم بر روی خط آهن



شکل ۶. نمودار سرعت تراورس در حالت اعمال بدون نیروی محوری طولی (نمودار آبی رنگ)، اعمال نیروی محوری فشاری (نمودار قرمز رنگ) و اعمال نیروی محوری کششی ۱۵۰ تن (نمودار

سبز رنگ) در زمان $T=2.5$ s



شکل ۷. نمودار شتاب بالاست در حالت اعمال بدون نیروی محوری طولی (نمودار آبی رنگ)، اعمال نیروی محوری فشاری (نمودار قرمز رنگ) و اعمال نیروی محوری کششی ۱۵۰ تن (نمودار

سبز رنگ) در زمان $T=2.5$ s

۴-۱- اعتبار سنجی نتایج بدست آمده با نتایج تحقیقات

محققین

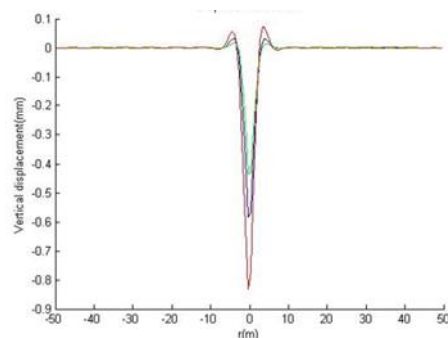
در این قسمت در قالب یک نمودار نتایج بدست آمده از خروجی نرم افزار که با استفاده از روش عددی ویلسون-تتا و برای گام زمانی ۰,۰۱، بدست آمده است و با نتایج تحقیقات آقای که و همکاران [Koh, C et al, 2003] برای جایبایی ریل مقایسه شده است و همان طور از شکل نمودار (۹) پیداست نتایج بدست آمده از طریق مدلسازی و نرم افزار تطابق خوبی با نتایج تحقیقات آقای که و همکاران برای حالت بار متحرک قائم با سرعت سیر ۲۰ متر بر ثانیه دارد.

مقادیر اجزای مختلف خط آهن در این حالت به صورت جدول زیر است.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای مختلف خط در سیستم خط بالاست

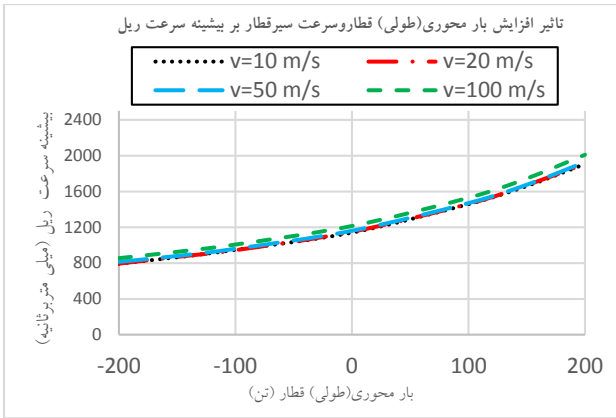
| پارامترهای خط در سیستم خط بالاستی | | | |
|-----------------------------------|-------|---------------------|----|
| $2/06 \times 10^{11}$ | Pa | مدول الاستیسیته ریل | E |
| $3/22 \times 10^{-5}$ | m^4 | ممان اینرسی ریل | I |
| ۶۰ | kg/m | جرم واحد طول ریل | Mr |
| 240×10^6 | N/m | سختی پد زیر ریل | Kp |
| 248×10^3 | Ns/m | میرایی پد زیر ریل | Cp |
| 70×10^6 | N/m | سختی لایه بالاست | Kb |
| 180×10^3 | Ns/m | میرایی لایه بالاست | Cb |
| 130×10^6 | N/m | سختی بستر | Kf |
| $62/3 \times 10^3$ | Ns/m | میرایی بستر | Cf |
| ۳۲۰ | Kg | توده جرم تراورس | Ms |
| ۱۴۰۰ | Kg | توده جرم بالاست | Mb |

برای جایبایی ریل، سرعت تراورس، شتاب بالاست نتایج خروجی نرم افزار برای سرعت ۲۰ متر بر ثانیه و برای نیروی محوری ۱۵۰ تن بدین صورت است:

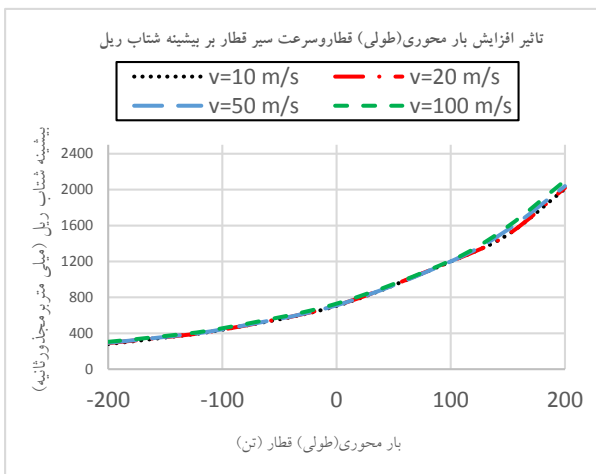


شکل ۵. نمودار جایبایی ریل در حالت اعمال بدون نیروی محوری طولی (نمودار آبی رنگ)، اعمال نیروی محوری فشاری (نمودار قرمز رنگ) و اعمال نیروی محوری کششی ۱۵۰ تن (نمودار

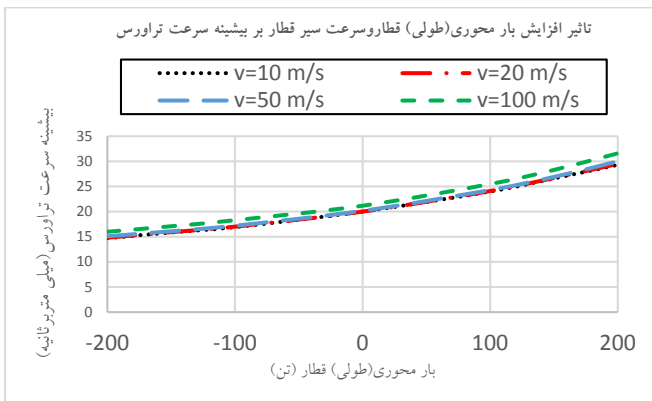
سبز رنگ) در زمان $T=2.5$ s



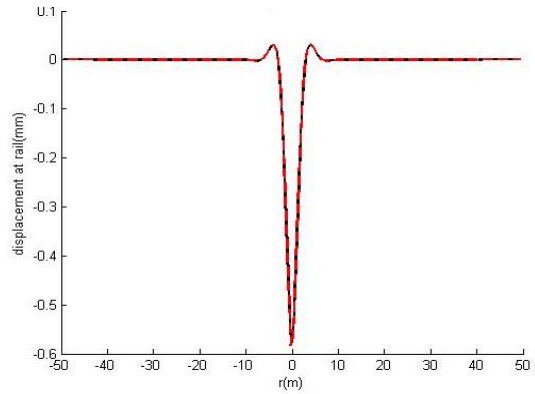
شکل ۱۰. نمودار بیشینه سرعت ریل در برابر اعمال مقادیر مختلف نیروی محوری (طولی) به خط آهن



شکل ۱۱. نمودار بیشینه شتاب ریل در برابر اعمال مقادیر مختلف نیروی محوری (طولی) به خط آهن



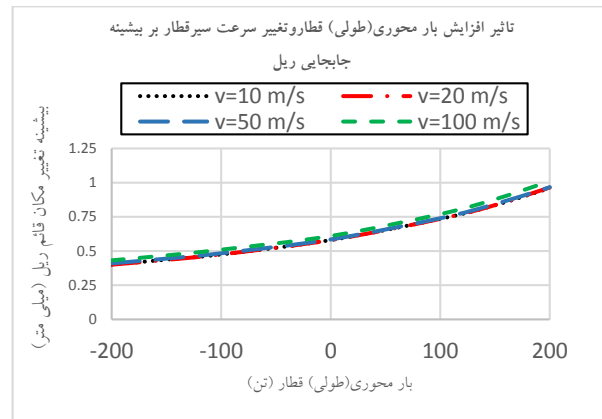
شکل ۱۲. نمودار بیشینه سرعت تراورس در برابر اعمال مقادیر مختلف نیروی محوری (طولی) به خط آهن



شکل ۸. نمودار جابجایی ریل در حالت بدون نیروی محوری طولی (نمودار سیاه رنگ)، نمودار جابجایی ریل در حالت اعمال بدون نیروی محوری طولی (نمودار قرمز رنگ-برگرفته از نتایج تحقیقات که وهمکاران در زمان $T=2.5s$

۴-۲ آنالیز حساسیت در سیستم خط بالاستی در حالت اعمال بار متحرک قائم

انواع نیروهای محوری با مقادیر مختلف در حالت کشش و فشار به سیستم خط بالاستی اعمال شده است و هم چنین سرعت حرکت قطار بر روی خط آهن تغییر داده شده است که نتایج آن بر روی پارامترهای مختلف اجزا خط آهن مطابق اشکال زیر است:



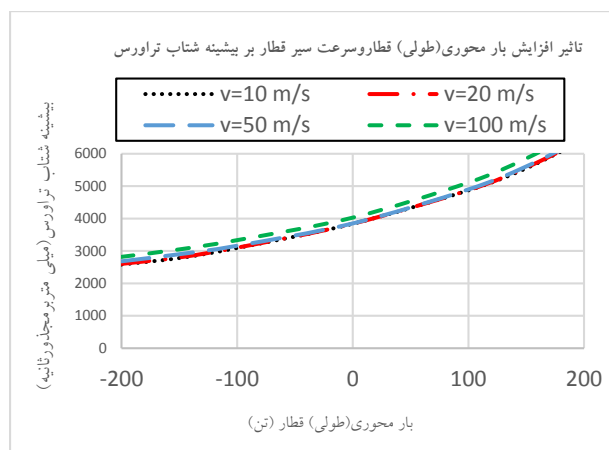
شکل ۹. نمودار بیشینه تغییر مکان قائم ریل در برابر اعمال مقادیر مختلف نیروی محوری (طولی) به خط آهن

اجزای مختلف خط آهن را نشان می دهد. سرعت های سیر قطار ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ متر بر ثانیه در این پژوهش در نظر گرفته شده و بازه تغییرات نیروی طولی نیز از ۲۰۰- تن تا ۲۰۰ تن می باشد. علامت منفی نشان نشان دهنده نیروهای طولی کششی و علامت مثبت نشان دهنده اعمال نیروهای طولی فشاری می باشد. اشکال (۹) تا (۱۱) مربوط به تغییر مکان، سرعت و شتاب ریل می باشد همان طور که مشاهده می شود افزایش سرعت و افزایش نیروی طولی باعث افزایش این مقادیر برای ریل می باشد. هم چنین افزایش سرعت سیر قطار از ۱۰ متر بر ثانیه تا ۱۰۰ متر بر ثانیه و هم چنین افزایش نیروی طولی از ۲۰۰- تن کششی تا نیروی ۲۰۰ تن فشاری باعث افزایش سرعت و شتاب تراورس و سرعت و شتاب بالاست در اشکال (۱۲) تا (۱۵) شده است.

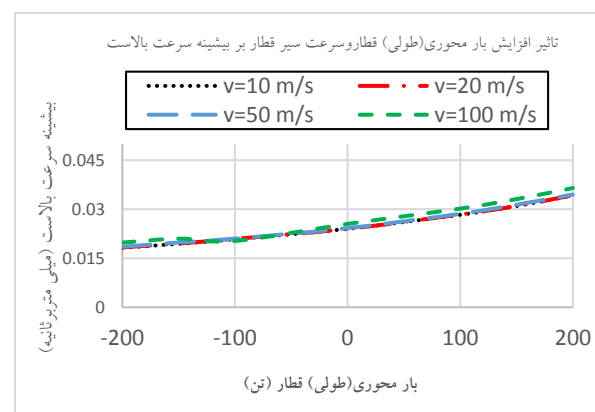
۵. جمع بندی و نتیجه گیری

به منظور تحلیل مناسب و استخراج نتایج قابل قبول از مسئله اندرکنش خط و قطار نیاز است تا این مسئله به شیوه ای صحیح مدل سازی و حل گردد. در تحقیق حاضر به کمک مدلسازی عددی و با استفاده از نرم افزار متلب اثر نیروی محوری بر اندرکنش دینامیکی خط و قطار با استفاده از روش عددی ویلسون تتا برای حالت بار متحرک قائم مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و نتایج آن در قالب نمودار برای اجزای مختلف خط آهن نظیر ریل، تراورس، بالاست در قسمت های پیش تر ارائه گردید. هم چنین با انجام آنالیز حساسیت به ازای تغییر نیروهای محوری (طولی) اعمالی به خط آهن همگام با تغییرات سرعت سیر قطار تاثیر این عوامل بر پارامترهای مختلف اجزای خط آهن دیده شد که شرح این نتایج به صورت زیر است:

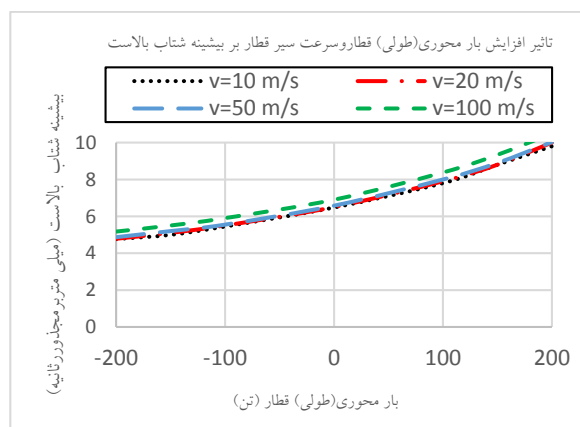
- در حالت اعمال نیروی محوری فشاری به خط میزان جابجایی ریل نسبت به حالتی که به خط نیروی محوری طولی اعمال نمی شود هم در حالت اعمال یک بار متحرک قائم به میزان قابل توجهی افزایش می یابد.
- در حالت اعمال نیروی محوری کششی به خط میزان جابجایی ریل نسبت به حالتی که به خط نیروی محوری طولی



شکل ۱۳. نمودار بیشینه شتاب تراورس در برابر اعمال مقادیر مختلف نیروی محوری (طولی) به خط آهن



شکل ۱۴. نمودار بیشینه سرعت بالاست در برابر اعمال مقادیر مختلف نیروی محوری (طولی) به خط آهن



شکل ۱۵. نمودار بیشینه شتاب بالاست در برابر اعمال مقادیر مختلف نیروی محوری (طولی) به خط آهن

نمودار اشکال (۹) تا (۱۵) تاثیر افزایش بار محوری (طولی) قطار و سرعت سیر قطار بر بیشینه مقادیر تغییر مکان، سرعت، شتاب

- دادگستر، یاسر (۱۳۹۵) "اندرکنش دینامیکی خط و قطار با فرمول بندی مختصات متحرک"، پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر جبارعلی ذاکری سردرودی، تهران: دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- ذاکری، جبارعلی و شاه بابایی، محمد (۱۳۹۴) "بررسی تاثیر سستی تکیه گاههای ارتجاعی بر فرکانس های طبیعی و مود های ارتعاشی تیرهای دو دهانه تحت ارتعاش آزاد"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال هفتم، شماره ۱ اول، ص. ۴۴-۵۴.

- Bitzenbauer, J. and J. Dinkel, (2002) "Dynamic interaction between a moving vehicle and an infinite structure excited by irregularities-Fourier transforms solution" Archive of applied mechanics, Vol.72, No.2-2, pp. 199-211.

- Biot, M., (1922) "Bending of an infinite beam on an elastic foundation", Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Vol.2, No.3, pp. 165-184.

- Chen, Y.H. and Y.H. Huang, (2008) "Dynamic stiffness of infinite Timoshenko beam on viscoelastic foundation in moving coordinate ", International journal for numerical methods in engineering, Vol.48, No.6, pp. 1-18
Fryba, L. (2002) "Vibration of solids and structures under moving loads", Prauge: Thomas Telford.

- Koh, C., Ong J. S. Y., Chua D.K.H and Feng, J., (2003) "Moving element method for train-track dynamics", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.56, No.11, pp. 1549-1567.

- Luo, Y., (1999) "A model for predicting the effect of temperature force of continuous welded rail track", Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.213, No.2, pp.117-124.

- Luo, Y., Li, L., Yin, H., (2010) "A dynamic analysis of a continuous welded rail track under

اعمال نمی شود شود هم در حالت اعمال یک بار متحرک قائم به میزان قابل توجهی کاهش می یابد.

• در حالت اعمال نیروی محوری فشاری به خط میزان سرعت تراورس نسبت به حالتی که به خط نیروی محوری طولی اعمال نمی شود شود هم در حالت اعمال یک بار متحرک قائم به میزان قابل توجهی افزایش می یابد.

• در حالت اعمال نیروی محوری فشاری به خط میزان سرعت بالاست نسبت به حالتی که به خط نیروی محوری طولی اعمال نمی شود دارای افزایش ۲۷ درصدی است.

• در حالت اعمال نیروی محوری کششی به خط میزان سرعت بالاست نسبت به حالتی که به خط نیروی محوری طولی اعمال نمی شود دارای کاهش ۲۰ درصدی است.

• در حالت اعمال نیروی محوری فشاری به خط میزان شتاب تراورس نسبت به حالتی که به خط آهن نیروی محوری طولی اعمال نمی شود دارای افزایش است.

• در حالت اعمال نیروی محوری کششی به خط میزان شتاب تراورس نسبت به حالتی که به خط نیروی محوری طولی اعمال نمی شود دارای کاهش ۲۷ درصدی است.

• در حالت اعمال نیروی محوری فشاری به خط میزان شتاب بالاست نسبت به حالتی که به خط نیروی محوری طولی اعمال نمی شود دارای افزایش است.

• به ازای تغییرات سیر قطار نیز همگام با افزایش این سرعت پارامترهای نظیر جابجایی، شتاب و سرعت برای اجزای مختلف خط آهن نظیر ریل، تراورس، بالاست افزایش می یابد.

۶. پی نوشتها

1. Shape function
2. Case study
3. Wilson-Theta
4. Ordinary Differential Equation
5. Closed form
6. Explicit Method
7. Implicit Method

۷. منابع

a longitudinal stress caused by temperature changes " , Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.224, No.2, pp.91-10.

- Mosayebi, S. A., Zakeri, J. A., Esmaeili, M (2016), "A comparison between the dynamic and static stiffness of ballasted track", Techno Press International Journal of Geomechanics and Engineering , Vol.11, No.6, pp.757-76.

- Mosayebi ,S. A., Zakeri ,J. A., Esmaeili, M. (2017) " Vehicle/track dynamic interaction considering developed railway substructure models", Geotextiles and Geomembranes ,Vol.45, No. 2, pp. 23-33.

- Zakeri, J. A. and H. Xia, (2008) "Sensitivity analysis of track parameters on train-track dynamic interaction", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.22, No.7, pp. 1299-1304.

- Zakeri, J. A., Feizi, M. M, Shadfar ,M and Naeimi ,M. (2016) "Sensitivity analysis on dynamic response of railway vehicle and ride index over curved bridges ", Structural Engineering and Mechanics, Vol.61, No.6, pp. 775-784.

- Zakeri, J. A., Esmaili ,M , Mosayebi ,S. A. (2016) "Some aspects of support stiffness effects on dynamic ballasted railway tracks", Journal of Periodica Polytechnica Civil Engineering, Vol.60, No.3, pp.427-436.

جبار علی ذاکری سردرودی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۱ از دانشگاه تبریز و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-سازه در سال ۱۳۷۴ را از دانشگاه تبریز اخذ نمود. در سال ۲۰۰۰ میلادی موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی خطوط راه آهن از دانشگاه جیائوتونگ پکن-چین گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان سیستم های مدیریت و نگهداری راه آهن، اندرکنش دینامیکی خط و قطار، دینامیک پلهای راه آهن بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



امیرحسام تقی پور، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه تبریز و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی خطوط راه آهن را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. هم اکنون دانشجوی مقطع دکتری در رشته مهندسی خطوط راه آهن در دانشگاه علم و صنعت ایران می باشد. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مباحث نگهداری و تعمیر خطوط راه آهن، اندرکنش دینامیکی خط و قطار، دینامیک پلهای راه آهن می باشد.



سید علی مسیبی، درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی خطوط راه آهن را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه دکتری را در رشته مهندسی خط و سازه ریلی در سال ۱۳۹۵ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۷ موفق به کسب درجه پسا دکتری در رشته مهندسی خطوط راه آهن از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی راه آهن، اندرکنش خط و قطار، نگهداری و تعمیر خط آهن بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه علم و صنعت ایران است.

