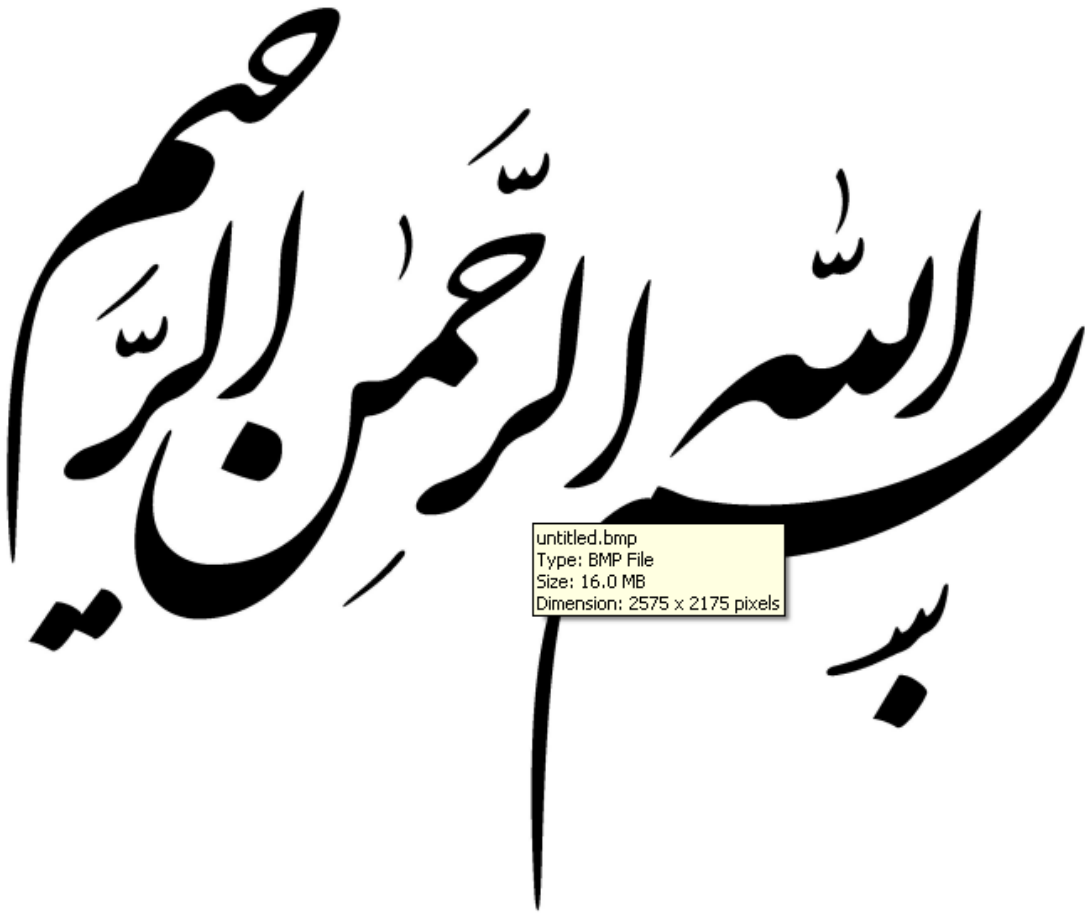


untitled.bmp
Type: BMP File
Size: 16.0 MB
Dimension: 2575 x 2175 pixels

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی عمران

موضوع: تحلیل پلهای مسیرهای ریلی تحت اثر دینامیکی وسیله متحرک

استاد راهنما:

دکتر رضا مرشد

استاد مشاور:

دکتر حسینعلی رحیمی بندر آبادی

نگارش:

محسن محمد کریمی حسین آبادی

زمستان ۸۹

تقدیم به

پدر و مادرم

تقدیر و تشکر

سپاس خدایی را که در قالب جهان آفرینش دفتر حسن زیبایی بنمود و برگهای گوناگون آن را در برابر ادراک و احساس آدمیان بگشود تا پاک بینان از هر ورق آن فصول اسرار خوانند و از دریافت هر سری مزه عشق چشند.

قبل از هر چیز لازم می‌دانم از زحمات فراوان اساتید گرامی، جناب آقای دکتر مرشد و جناب آقای دکتر رحیمی که با راهنماییهای استادانه و دلسوزانه خودشان، اینجانب را در انجام این تحقیق یاری نموده‌اند کمال تشکر و قدردانی نمایم.

در پایان نیز مراتب قدردانی خود را از خانواده عزیزم که همواره در تمامی عرصه ها مشوق و یاریگر من بوده‌اند ابراز می‌دارم.

چکیده

برای حل مسئله دینامیکی غیر خطی اندرکنش قطار و پل دو روش عمده وجود دارد. یکی روش تئوری که میتوان به عنوان مثال به روش نیروی تماسی اشاره کرد و دیگری روش تکرار می باشد. هر دو این روش ها بسته به شرایط مدلسازی پل و وسیله متحرک سرعت حل متفاوتی دارند. در این تحقیق روش جدیدی برای حل مسئله اندرکنش پل و سیله متحرک ارائه شده است که با ترکیب کردن دو روش تئوری و تکرار سعی در حل این نوع مسئله دینامیکی نموده است که سرعت حل روش تکرار را چندین برابر نموده است.

در این تحقیق سه پل دهانه ساده با تیر بتنی پیش ساخته بطولهای ۱۰، ۱۵ و۲۰ متر که توسط سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور پیشنهاد شده و یک پل پیش تنیده با دهانه ۳۰ متر بر اثر عبور قطار سریع السیر در محدوده سرعتهای ۱۰۰ تا ۴۵۰ کیلومتر بر ساعت مورد بررسی قرارگرفته اند. برای ارزیابی پاسخ دینامیکی پلها دو نوع مدلسازی از پل و قطار انتخاب شده است: یکی با در نظر گرفتن اندرکنش پل و قطار همراه با روسازی انعطاف پذیر(بالاست) و دیگری مدلسازی قطار بصورت بارهای متحرک بدون در نظر گرفتن اثر روسازی می باشد. سرعتهای تشدید و کاهندگی و تاثیر تغییرات سختی خمشی در جابجا کردن سرعتهای تشدید و اثر تعداد واگن های عبوری نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می دهد شتاب قائم ایجاد شده در وسط دهانه پلهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری بدلیل وزن واحد طول کوچکتر از پل دهانه ۳۰ متری، بیشتر از پل دهانه ۳۰ متری می باشد. مدلسازی قطار به صورت بار در مقایسه با مدلسازی با در نظر گرفتن اندرکنش پل و قطار سرعتهای تشدید را قدری بیشتر برآورد می کند ولی مقادیر پیش بینی شده واکنشهای حداکثر در هنگام تشدید توسط این مدل در جهت محافظه کارانه بوده است. با گذشت زمان، تغییرات ایجاد شده در سختی و جرم پلها در جهتی است که تشدید در سرعتهای کمتری اتفاق بیافتد. تعداد واگن های قطار صرفا در سرعت تشدید اصلی بر پاسخ پل تاثیر گذار می باشد.

فهرست مطالب

فصل اول) تعریف مسئله و مروری بر مطالعات پیشین

۱-۱) مقدمه ۱

۱-۲) روش های مدلسازی قطار ۲

۱-۲-۱) مدلسازی قطار به صورت بار ۲

۱-۲-۲) مدلسازی قطار به صورت جرم متحرک ۳

۱-۲-۳) مدلسازی قطار به صورت سیستم جرم و فنر ۳

۱-۲-۴) مدلسازی وسیله متحرک به صورت جرم گسترده سوار بر دو سیستم مجزای جرم و فنر ۴

۱-۲-۵) مدلسازی قطار به صورت جرم گسترده سوار بر دو سیستم مجزای بوژی ۴

۱-۲-۶) مدلسازی وسیله متحرک به صورت سه بعدی ۶

۱-۳) روشهای مدلسازی پل و ریل ۷

۱-۳-۱) مدلسازی تیر به صورت تیر برنولی- اولر و با سطح مقطع یکنواخت ۷

۱-۳-۱-۱) حرکت بار واحد متحرک بر روی تیر دو سر ساده ۷

۱-۳-۱-۲) حرکت تعداد متوالی از بارهای متمرکز بر روی تیر دو سر ساده ۸

۱-۳-۱-۳) حرکت جرم های متوالی بر روی تیر دو سر ساده ۱۰

۱-۳-۱-۴) تاثیر نسبت دهانه به طول واگن ۱۰

۱-۳-۲) ضریب ضربه برای پل های با تکیه گاه الاستیک تحت عبور بارهای متوالی ۱۱

۱-۳-۳) مدل سازی پل به صورت دو بعدی با در نظر گرفتن ریل و زیرسازی واعوجاج در مسیر (ریل) ۱۲

۱-۳-۴) مدل سازی پل به صورت سه بعدی ۱۸

۱-۳-۴-۱) اعوجاج در ریل مسیرهای ریلی ۱۹

۱-۳-۴-۲) حرکت دو قطار بر روی دو ریل واقع در یک پل در جهت مخالف ۲۱

فصل دوم) روابط حاکمه بر مدلهای گوناگون از قطار و پل و روشهای حل آنها

۲-۱) مقدمه ۲۵

۲-۲) روش های مدلسازی و حل مسئله حرکت وسیله متحرک که به صورت بار مدلسازی شده است ۲۶
۲-۳) روش های مدلسازی و حل مسئله حرکت وسیله متحرک با در نظر گرفتن اندرکنش وسیله محرک و پل ۲۷
۲-۳-۱) حل مسئله اندرکنش وسیله متحرک و پل با روش تراکم ۲۸
۲-۳-۲) حل مسئله اندرکنش وسیله متحرک و پل با استفاده از روش نیروی تماسی ۳۱
۲-۳-۳) حل مسئله اندرکنش وسیله متحرک و پل با روش تکرار ۳۵
۲-۴) جمع بندی ۳۶

فصل سوم) ارائه روش ترکیبی از روش تئوری و روش تکرار برای حل مسئله دینامیک غیر خطی حرکت وسیله متحرک بر روی پل

۳-۱) مقدمه ۳۸
۳-۲) رابطه خطی بین نیروهای تماسی و شتابهای تماسی در وسیله متحرک ۴۱
۳-۳)رابطه خطی بین نیروهای تماسی و شتابهای تماسی در پل ۴۴
۳-۴) بدست آوردن غیر مستقیم رابطه خطی بین نیروها و شتابهای تماسی زمانی که فقط یک واگن از قطار در حال حرکت بر روی پل باشد ۴۷
۳-۵) بدست آوردن غیر مستقیم رابطه خطی بین نیروها و شتابهای تماسی زمانی که بیش از یک وسیله متحرک در حال حرکت بر روی پل باشد ۵۰
۳-۶) استفاده از معکوس یک ماتریس برای بدست آوردن رابطه بین نیروها و شتابهای تماسی در پل و وسیله متحرک ۵۱
۳-۷) روش ترکیبی از روش تئوری و روش تکرار برای حل مسئله دینامیک غیر خطی حرکت وسیله متحرک بر روی پل ۵۵
۳-۸) حرکت سیستم جرم و فنر بر روی تیر در سر ساده ۵۵
۳-۹) حرکت یک واگن از قطار شینکانسن بر روی پل دو سر ساده ۶۱

۳-۱۰) حرکت قطار شینکانسن مدل ۳۰۰ بر روی پل دو سر ساده در سرعت رزونانس ۶۷
۳-۱۱) مقایسه سرعت حل روش پیشنهادی با روش تکرار معمول ۶۸
۳-۱۱-۱) مقایسه سرعت حل روش پیشنهادی با روش تکرار معمول در روسازی صلب ۷۰
۳-۱۱-۲) مقایسه سرعت حل روش پیشنهادی با روش تکرار معمول در روسازی انعطاف پذیر ۷۳
فصل چهارم) بررسی اندرکنش قطار سریع السیر و پلهای دو سر ساده با تیر بتنی پیش ساخته
۴-۱) مقدمه ۷۵
۴-۲) مشخصات پلهای مورد بررسی ۷۵
۴-۳) اثر تعداد واگن عبوری بر روی واکنشها پل ۷۶
۴-۴) سرعت های تشدید و کاهندگی ۷۸
۴-۵) تغییرات سختی و جرم در واکنش پل ۸۲
فصل پنجم: نتیجه گیری
۵-۱) مقدمه ۸۵
۵-۲) نتایج ۸۵
۵-۳) پیشنهادات ۸۷
منابع و مآخذ ۸۹

فهرست اشکال

شکل ۱-۱) ضریب تشدید در آیین نامه های مختلف ۱

شکل ۱-۲) مدل حرکت بار برای وسیله متحرک ۳

شکل ۱-۳) مدل حرکت جرم برای وسیله نقلیه ۳

شکل ۱-۴) مدل سیستم جرم و فنر برای قطار ۴

شکل ۱-۵) مدلسازی جرم گسترده سوار بر دو سیستم جرم و فنر مجزا برای قطار ۵

شکل ۱-۶) مدلسازی جرم گسترده سوار بر دو سیستم مجزای بوژی برای وسیله قطار ۵

شکل ۱-۷) مدل سه بعدی از وسیله قطار ۶

شکل ۱-۸) نمودار ضریب تشدید جابجایی (الف) و ممان (ب) وسط دهانه در برابر پارامتر سرعت ۸

شکل ۱-۹) تیر دو سر ساده تحت عبور مدل حرکت بار از قطار ۹

شکل ۱-۱۰) اثر میرایی و جرم محرک در ضریب تشدید ۱۰

شکل ۱-۱۱) تاثیر نسبت دهانه به طول قطار در ضریب تشدید ۱۱

شکل ۱-۱۲) میرایی افزاینده که تابعی از دهانه می باشد ۱۴

شکل ۱-۱۳) مقدار عکس العمل تکیه گاه پل دو سر ساده تحت عبور قطار Eurostar ۱۵

شکل ۱-۱۴) مدلسازی دو بعدی از پل و ریل و زیرسازی مسیر راه آهن ۱۶

شکل ۱-۱۵) المانی از تیر که سیستم جرم و فنر در حال عبور از آن می باشد ۱۶

شکل ۱-۱۶) ضریب تشدید برای جابجایی وسط پل ها بر اثر عبور قطار S25 در دو حالت بار ثابت و سیستم جرم و فنر ۱۷

شکل ۱-۱۷) مدلسازی سه بعدی از پل وریل و زیرسازی مسیر راه آهن ۱۸

شکل ۱-۱۸) انواع اعوجاج های موجود در مسیرهای ریلی[۲۲] ۱۹

شکل ۱-۱۹) پلانی از پل فولادی (ابعاد بر حسب میلیمتر) ۲۰

شکل ۱-۲۰) ماکزیمم شتاب عرشه پل برای چهار نوع قطار رایج اروپا ۲۱

شکل ۱-۲۱) مقدار ضریب تشدید جابجایی عرشه پل برای چهار نوع اعوجاج ریل ۲۲

شکل ۱-۲۲) مقدار شتاب عرشه پل در جهت z برای چهار نوع اعوجاج ریل ۲۲

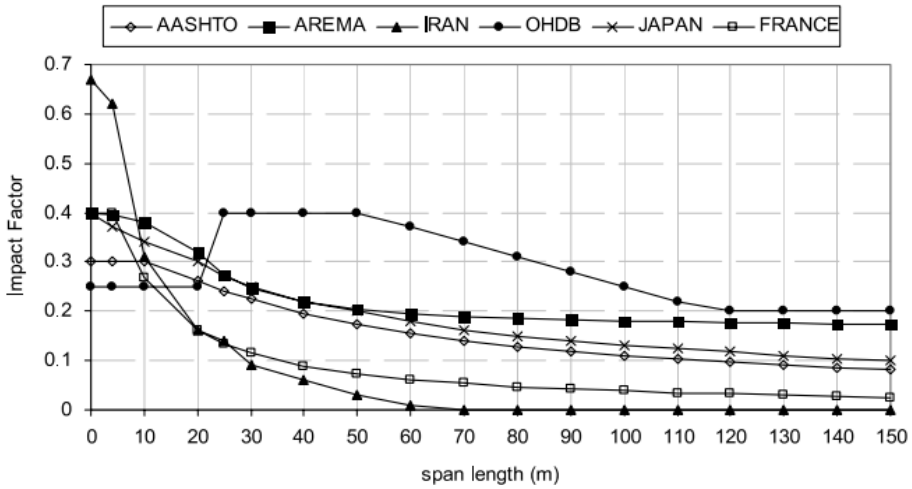
شکل ۱-۲۳) مقدار جابجایی عرشه پل در جهت y برای سه نوع اعوجاج ریل ۲۲
شکل ۱-۲۴) پاسخ پل بر اثر عبور دو قطار ۲۳
شکل۲-۱) پل تحت عبور بار قطار که به صورت بار مدل شده است ۲۶
شکل ۲-۲) المان مدل اندرکنش پل و وسیله متحرک به صورت سیستم جرم و فنر ۲۸
شکل ۲-۳) المان مدل اندرکنش پل و وسیله متحرک با در نظر گرفتن دوران حول محور z ۲۸
شکل۲-۴) مدل وسیله نقلیه به صورت تفکیک شده به دو قسمت چرخ و سیستم سوار بر آن ۳۲
شکل ۲-۵) فلوچارت حل اندرکنش وسیله محرک و پل با روش تکرار ۳۷
شکل ۳-۱) مدل وسیله نقلیه به صورت تفکیک شده به دو قسمت چرخ و سیستم سوار بر آن ۴۱
شکل ۳- ۲) . فلوچارت بدست آوردن غیر مستقیم رابطه خطی بین نیروها و شتابهای تماسی زمانی که فقط یک واگن از قطار در حال حرکت بر روی پل باشد ۴۹
شکل۳-۳) فلوچارت بدست آوردن رابطه های خطی بین نقطه نیروها و شتابهای نقاط تماسی در پل و وسیله متحرک و حل مسئله اندرکنش پل و وسیله متحرک زمانی که چندین وسیله متحرک در حال گذر بر روی پل است ۵۳
شکل۳-۴) فلوچارت بدست آوردن غیر مستقیم رابطه های خطی بین نقطه نیروها و شتابهای نقاط تماسی در پل و وسیله متحرک و حل مسئله اندرکنش پل و وسیله متحرک زمانی که چندین وسیله متحرک در حال گذر بر روی پل است با معکوس نمودن تنها یک ماتریس ۵۴
شکل ۳-۵) فلوچارت استفاده از روش تکرار و روش تئوری برای حل مسئله اندرکنش پل و وسیله متحرک ۵۶
شکل ۳-۶) جرم سوار بر روی فنر در حال عبور از تیر دو سر ساده ۵۷
شکل ۳-۷) جابجایی قائم وسط دهانه تیر ۵۷
شکل ۳-۸) شتاب قائم وسط دهانه تیر ۵۸
شکل ۳-۹) جابجایی جرم سوار بر فنر ۵۸
شکل ۳-۱۰) شتاب جسم سوار بر فنر ۵۹

شکل ۳-۱۱) نمودار نیروی تماسی در پل و المان جرم و فنر بر اساس مقدار شتاب تماسی زمانی که المان جرم و فنر در حال گذر از وسط دهانه می باشد ۶۰
شکل ۳-۱۲) مدل دو بعدی از واگن قطار شینکانسن مدل ۳۰۰ ۶۱
شکل۳ -۱۳) مدلسازی المان ریل و پل ۶۳
شکل۳-۱۴)مدل حرکت قطار بر روی پل با روسازی انعطاف پذیر ۶۳
شکل ۳-۱۵) جابجایی وسط دهانه پل بر اثر عبور قطار شینکانسن ۶۵
شکل ۳-۱۶) شتاب وسط دهانه پل بر اثر عبور قطار شینکانسن ۶۵
شکل ۳-۱۷) جابجایی وسط دهانه ریل بر اثر عبور قطار شینکانسن ۶۵
شکل ۳-۱۸) شتاب وسط دهانه ریل بر اثر عبور قطار شینکانسن ۶۶
شکل ۳-۱۹) شتاب قائم بدنه اصلی واگن(متر بر مجذور ثانیه)) ۶۶
شکل ۳-۲۰) شتاب دورانی بدنه اصلی واگن(متر بر مجذور ثانیه)) ۶۶
شکل ۳-۲۱) جابجایی وسط دهانه پل ۶۷
شکل ۳-۲۲) جابجایی وسط دهانه ریل ۶۸
شکل۳-۲۳) شتاب وسط دهانه پل دهانه ۳۰ متمری در دو حالت مدل بار و مدل با درنظر گرفتن اندر کنش پل ۷۱
شکل۳-۲۴) شتاب وسط دهانه پل دهانه ۱۰ متمری در دو حالت مدل بار و مدل با درنظر گرفتن اندر کنش پل ۷۲
شکل۴-۱) مقطع پلهای مورد بررسی(واحد میلیمتر) ۷۶
شکل ۴-۲) شتاب وارد بر وسط دهانه بر اثر عبور تعداد واگن های مختلف ۷۷
شکل ۴-۳) شتاب وارد بر وسط دهانه ۸۰
شکل ۴-۴) ضریب ضربه جابجایی وسط دهانه ۸۰
شکل ۴-۵) شتاب وارد بر وسط دهانه ۸۳
شکل ۴-۶) ضریب ضربه جابجایی وسط دهانه ۸۳

فصل اول: تعریف مسئله و مروری بر مطالعات پیشین

۱-۱ مقدمه

تحقیقات بر روی پاسخ دینامیکی پل بر اثر عبور وسیله متحرک بعد از خراب شدن پل چستر[۱] در انگلستان، که از اولین خرابیهای پل مسیر ریلی در جهان است، در اواسط قرن نوزدهم توسط ویلیس[۲] و استوکس[۳] و آغاز شده است و همواره در طول سالهای متمادی رفتار پل بر اثر عبور وسیله متحرک یکی از دغدغه های مهندسین پلساز بوده است. امروزه برای اعمال کردن اثر دینامیکی قطار در پلهای مسیر ریلی از ضرایب تشدید استفاده می شود و هر آیین نامه ای ضریب تشدیدی را پیشنهاد می دهد که عمده آنها بر اساس طول دهانه پل می باشد. همانطور که در شکل ۱-۱ مشخص است ضرایب پیشنهاد شده توسط آیین نامه های(به ترتیب در شکل از چپ به راست) بزرگراه های امریکا، راه آهن امریکا، ایران، کانادا، ژاپن و فرانسه تفاوتهای زیادی با یکدیگر دارند ولی هر کدام از این ضرایب تشدید که در مدل باری که با این ضرایب تشدید پیشنهاد شده ضرب شده و واکنش پل بر اثر عبور مدل بار تشدید یافته بررسی می شود.



شکل ۱-۱. ضریب تشدید در آیین نامه های مختلف [۱]

---

۱. Chaster(1847)

۲.willis(1849)

۳. Stokes(1849)

پیشرفت روزافزون صنعت و اقتصاد و اهمیت پارامتر زمان منجر به استفاده بیشتر از سیستم های حمل و نقل سریع السیر از جمله قطار های سریع السیر شده است. در مسیرهای ریلی به علت ناهمواریهای طبیعی و تداخل مسیرهای دیگر سیستم حمل و نقل در یک نقطه، وجود پل امری اجتناب ناپذیر می باشد. بعد از افتتاح اولین قطار سریع السیر در فرانسه و مشاهده خرابی و ناپایداری در ریل و بالاست به علت به وجود آمدن شتابی برابر ۰/۷g در عرشه پل گذرگاه ویربیری[1] در هفته های ابتدایی شروع به کار این قطار سریع السیر، مطالعات وسیعی در مورد اندرکنش قطار سریع السیر و پل آغاز شد. در ابتدا مدلهای ساده‌ای از پل و قطار استفاده شده است و با گذشت زمان و وجود کامپیوتر های قدرتمند و استفاده از روش های عددی مدل های پل و وسیله متحرک واقعی تر شده‌اند که قابلیت ارزیابی دقیق پاسخ های پل و قطار برای مهندسین فرآهم شده است. در ادامه به روشهای مختلف مدلسازی از قطار و پل به صورت مختصر اشاره خواهد شد.

۱-۲ روش های مدلسازی قطار

مدلسازی قطار با گذشت زمان دقیق تر و به واقعیت نزدیکتر شده است که با استفاده از مدل واقعی تر امکان بررسی پارامتر هایی چون شتاب وارد بر سرنشین و پایداری قطار بر روی ریل هم میسر شده است. به فرآیند تکامل مدلسازی قطار در این قسمت اشاره خواهد شد.

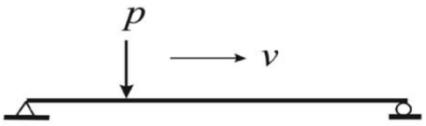
۱-۲-۱ مدلسازی قطار به صورت بار

ساده ترین روش مدلسازی قطار، مدل کردن آن به صورت بار متحرک می باشد(شکل ۱-۲). از اولین کارهایی که در زمینه حرکت قطار بر روی پل صورت گرفته این نوع مدلسازی قطار می باشد[۲و۳]. این روش مدلسازی به علت اینکه از اثر اینرسی وسیله نقلیه صرفنظر شده است بسیار ساده می باشد. ولی دقت حل بستگی به نسبت جرم وسیله متحرک به پل دارد که با کم شدن این

---

verberie

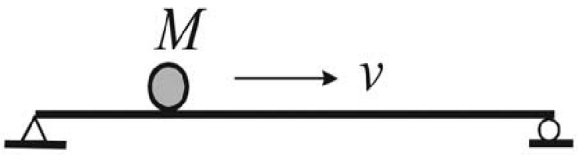
نسبت مسئله به واقعیت نزدیکتر می‌باشد. از دیگر کاربردهای این روش زمانی است که مقدار واکنش وسیله متحرک مد نظر نباشد. در واقع اگر تغییری در پارامترهای پل ایجاد شود به‌طوری که بتواند اثر اینرسی قطار را اعمال کند، می‌توان با مدلسازی وسیله متحرک به صورت بار پاسخ پل را دقیق‌تر بدست آورد که در آیین‌نامه اروپا با تعریف میرایی اضافی برای پل این کار صورت گرفته است[۴].البته با مدلسازی قطار به صورت بار دیگر نمی‌توان برآوردی از نیروی وارد شده بر قطار داشت.



شکل ۱-۲. مدل حرکت بار برای وسیله متحرک

۱-۲-۲ مدلسازی قطار به صورت جرم متحرک

زمان که اثر اینرسی قطار در مقایسه با پل قابل صرفنظر نباشد می‌توان از مدل جرم متحرک بجای مدل بار متحرک استفاده کرد(شکل ۱-۳). در این نوع مدلسازی مقدار نیروی وارده از قطار به پل بستگی به مقدار شتاب نقطه تماسی می‌باشد. پس نیروی تماسی بستگی به تاریخچه حرکت پل و وسیله متحرک دارد و مقدار آن در طی حرکت ثابت نمی‌باشد[۵].

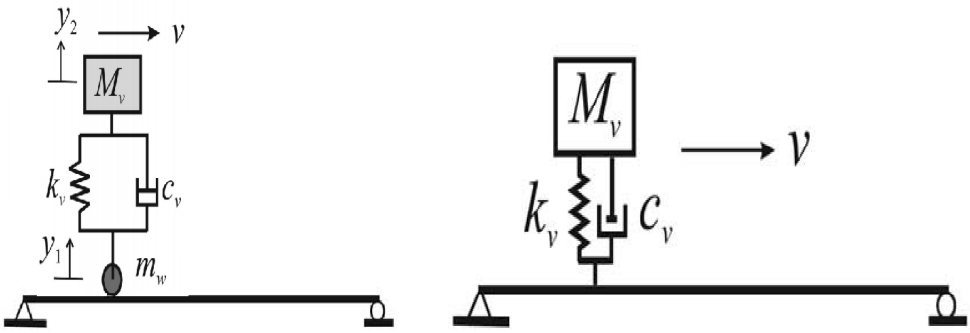


شکل ۱-۳. مدل حرکت جرم برای وسیله نقلیه

۱-۲-۳ مدلسازی قطار به صورت سیستم جرم و فنر

مدل کامل‌تری که بعد از مدلسازی قطار بصورت جرم می‌توان به آن اشاره کرد مدل جرم و فنر به صورت شکل ۱-۴- الف است. این مدل دارای یک درجه آزادی می‌باشد که جرم وسیله

متحرک سوار بر فنر و میراگر در حال حرکت است[۶] و مدل کاملتر از آن به صورت شکل ۱-۴-ب می‌باشد و دارای دو درجه آزادی در جهت قائم که یکی برای بدنه وسیله نقلیه و دیگری برای چرخ است[۷].



شکل ۱-۴- ب **شکل ۱-۴- الف**

شکل ۱-۴. مدل سیستم جرم و فنر برای قطار

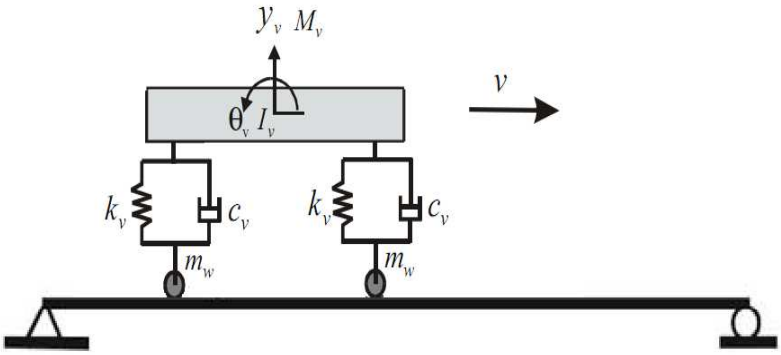
۱-۲-۴ مدلسازی وسیله متحرک به صورت جرم گسترده سوار بر دو سیستم مجزای جرم و فنر

در راستای واقعی‌تر شدن مدل قطار بعد از سیستم جرم و فنر می‌توان به سیستم جرم گسترده سوار بر دو سیستم جرم و فنر اشاره کرد(شکل۱-۵). همانطور که در این شکل مشخص می‌باشد مدل ارائه شده دارای چهار درجه آزادی است. اگر همین مدل را با دو سیستم مجزای جرم و فنر مطابق شکل۱-۴-ب مدلسازی کنیم دارای چهار درجه آزادی می‌باشد ولی در این مدل یکی از درجه‌های آزادی معرف مقدار جابجایی دورانی وسیله متحرک حول محور عمود بر مسیر حرکت می‌باشد. با استفاده از این روش علاوه بر این که قابلیت برآورد شتاب دورانی وارد بر بدنه فرآهم می‌شود می‌توان اثر آن را هم در مقدار نیروی تماسی بررسی نمود[۸]. البته در این مدل دو بعدی از قطار، ساده سازیهایی در سیستم چرخ وجود دارد.

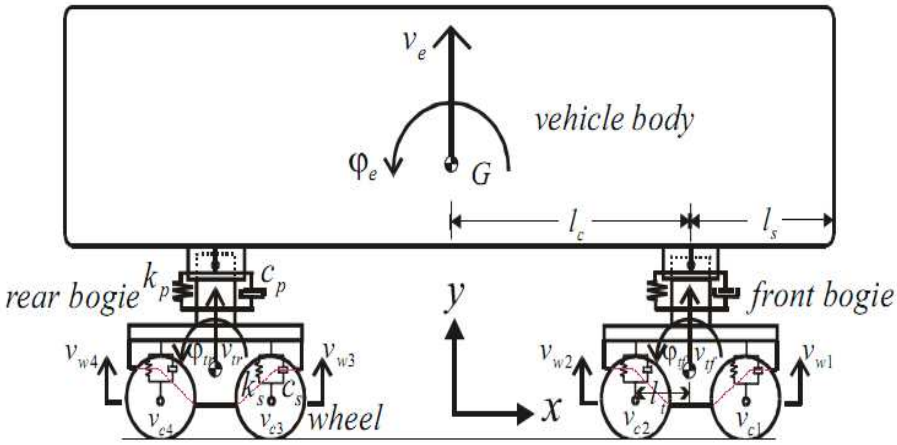
۱-۲-۵ مدلسازی قطار به صورت جرم گسترده سوار بر دو سیستم مجزای بوژی

در شکل ۱-۶ کاملترین مدل دو بعدی که می‌توان برای واگن در نظر گرفت نشان داده شده

است که شامل یک جرم صلب سوار بر دو دستگاه بوژی است که آنها هم به وسیله چرخ ها نیروها را انتقال داده و به ریل وارد می کنند[۹].



شکل ۱-۵. مدلسازی جرم گسترده سوار بر دو سیستم جرم و فنر مجزا برای قطار

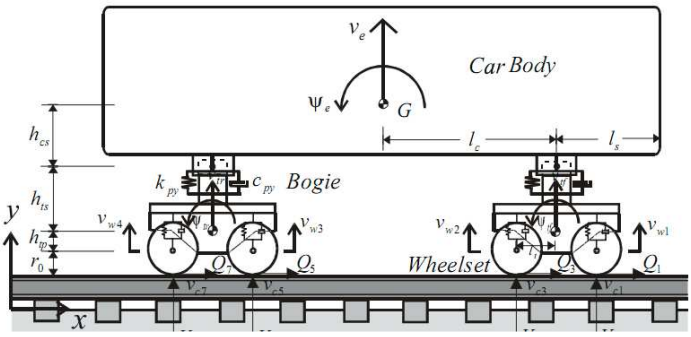


شکل۱-۶. مدلسازی جرم گسترده سوار بر دو سیستم مجزای بوژی برای قطار

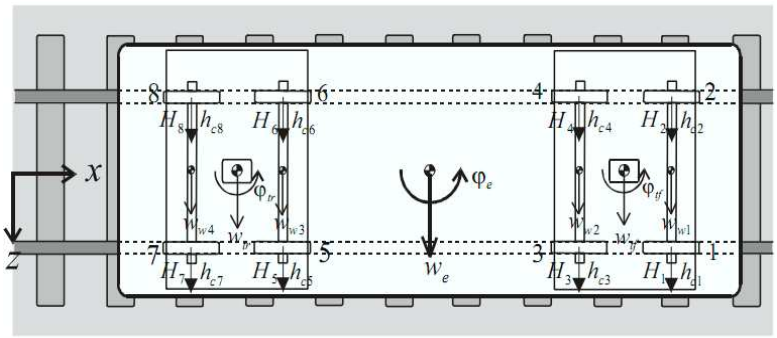
همانطور که در شکل ۱-۶ مشخص شده است بدنه قطار به صورت جرم صلب با دو درجه آزادی بوسیله دو بوژی که هر کدام دارای دو درجه آزادی هستند با چرخها که هر کدام از آنها دارای یک درجه آزادی در جهت قائم هستند در ارتباط می باشد. با این اوصاف تعداد درجه آزادی این نوع مدل دو بعدی برابر با ده می باشد ولی باید این را هم در نظر گرفت که چهار درجه آزادی چرخها مستقل نمی باشند و هر کدام از آنها، اگر چرخها از ریل جدا نشوند، برابر با مقدار جابجایی ریل در محل تماس خود چرخ می باشد که با این حساب مقدار جابجایی مستقل واگن برابر با شش درجه آزادی می باشد.

۱-۲-۶ مدلسازی وسیله متحرک به صورت سه بعدی

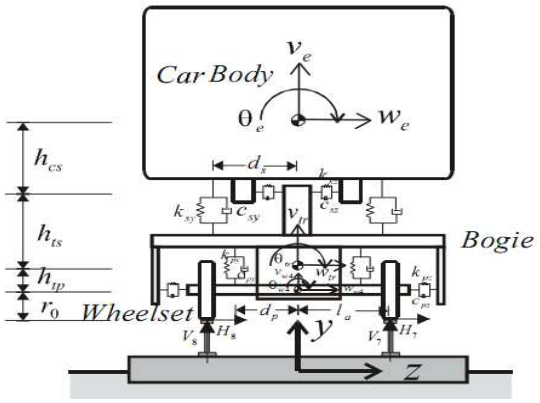
کاملترین مدل موجود برای واگن قطار همانطور که در شکل ۱-۷ نشان داده شده است به صورت سه بعدی می‌باشد. در این مدل واگن به صورت یک جرم صلب سه بعدی در نظر گرفته شده است که سوار بر بوژی که آن هم به صورت سه بعدی در نظر گرفته شده است، می‌باشد. بوژی بوسیله سیستم چرخ با چرخها و سپس با ریل در ارتباط می‌باشد[۱۰].



شکل ۱-۷- الف



شکل ۱-۷- ب



شکل ۱-۷- ج

شکل ۱-۷. مدل سه بعدی از وسیله قطار

در این مدل تعداد درجه آزادی بدنه برابر پنج می‌باشد و هر دو بوژی هم دارای پنج درجه آزادی هستند و هر کدام از چهار سیستم چرخها خود دارای سه درجه آزادی می‌باشند که مجموع

درجات آزادی این نوع مدل برای واگن برابر با ۲۷ می‌باشد. ولی باید این را در نظر داشته باشیم که دوازده درجه آزادی سیستم چرخها مستقل نمی‌باشند، پس تعداد درجات آزادی مستقل این نوع مدل برابر با ۱۵ می‌باشد.

۱-۳ روشهای مدلسازی پل و ریل

همانطور که مدلسازی قطار با گذشت زمان یک فرآیند تکاملی داشته است. در راستای کامل شدن مدل قطار مدلسازی پل و ریل هم گام به گام کاملتر شده است. از انواع پلهایی که تحت عبور مدلهای گوناگون وسیله متحرک بررسی شده است می‌توان به مدل پل خرپایی [۱۱]، دو سر ساده [۱۲]، دو سر ساده سوار بر تکیه‌گاه الاستیک [۱۳]، پیوسته [۱۴]، قوسی [۱۵] و معلق [۱۶] اشاره کرد. در ادامه در یک نگاه کلی به چند نمونه از مدلهای بررسی شده و نتایج حاصله اشاره خواهد شد.

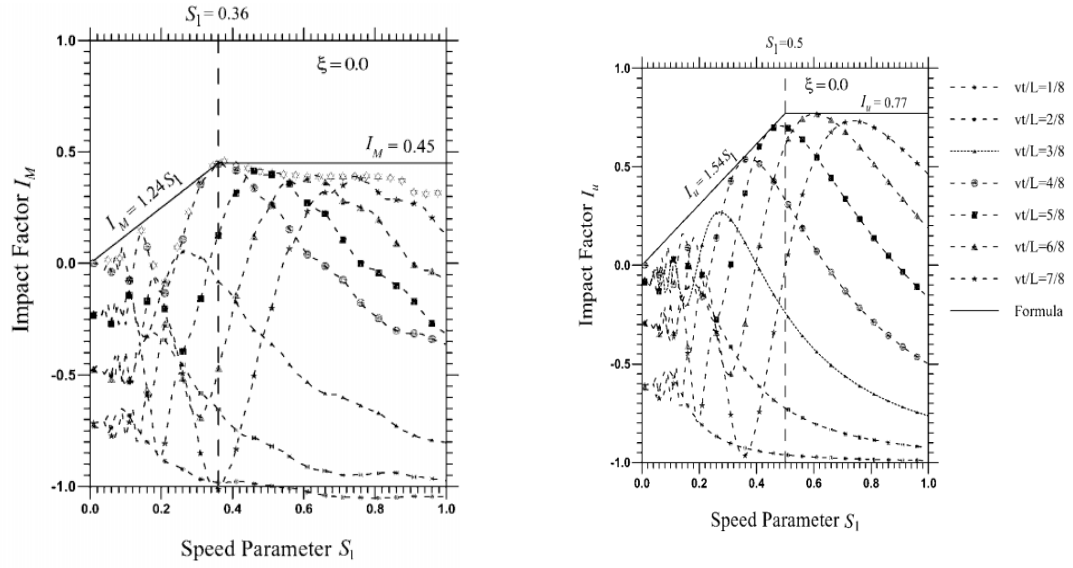
۱-۳-۱ مدلسازی تیر به صورت تیر برنولی- اولر و با سطح مقطع یکنواخت

از ابتدایی‌ترن مدلهای بررسی شده مدل تیر دو سر ساده و به صورت تیر برنولی می‌باشد. پلهای دو سر ساده از رایجترین انواع پلها می‌باشند و با وجود اینکه پل دو سر ساده در سرعت های تشدید، که در ادامه به آن اشاره می‌شود، دارای واکنشهایی چند برابر سرعتهایی بغیر از محدوده سرعت تشدید می‌باشد بیشتر مطالعات در راستای حرکت قطار بر روی پل دو سر ساده بوده است. در ادامه به برخی نتایج بدست آمده از تحقیقات صورت گرفته اشاره خواهد شد.

۱-۳-۱-۱ حرکت بار واحد متحرک بر روی تیر دو سر ساده

بررسی این مسئله با وجود اینکه ساده و غیر واقعی می‌باشد ولی با توجه به اینکه نتایج حاصله را می‌توان بر اساس پارامترهای موجود در مسئله بدست آورد، بررسی اثر هر کدام از پارامترها را آسان می‌سازد. بعد از حل معادلات دیفرانسیل حاکمه و تعریف پارامتر بی‌بعد سرعت

به صورت $S_n = \frac{n\pi v}{\omega_n L}$ (که در آن v نشان دهنده سرعت حرکت و ω_n، nامین مقدار فرکانس ارتعاشی تیر می باشد) مقادیر ضریب تشدید برای جابجایی و ممان برای تیر دو سر ساده در سرعت های متفاوت تحت عبور یک بار واحد منفرد در شکل ۱-۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود پارامتر سرعت در بر گیرنده مقدار سرعت حرکت است و در واقع به صورت نسبت فرکانس حرکت وسیله نقلیه به پل تعریف می شود. در اکثر آیین نامه ها مقدار ضریب تشدید بر اساس پارامتر با بعد طول می باشد، در صورتی که ضریب تشدید بصورت یک پارامتر بی بعد تعریف شده است. همانطور که در شکل ۱-۸ نشان داده شده است می توان ضریب تشدیدی (نسبت پاسخ دینامیکی به استاتیکی منهای یک) بر اساس اولین پارامتر بی بعد پارامتر سرعت تعریف کرد که در برگیرنده مقدار سرعت حرکت هم باشد.



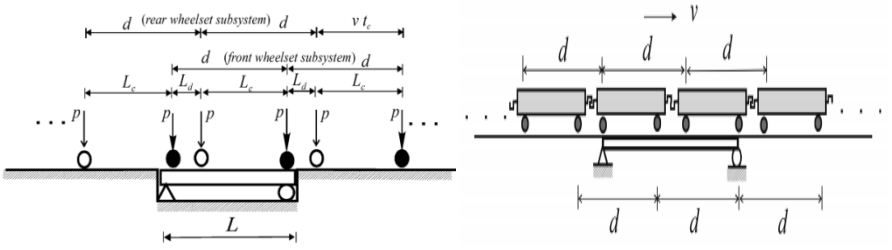
ب **الف**

شکل ۱-۸. نمودار ضریب تشدید جابجایی (الف) و ممان (ب) وسط دهانه در برابر پارامتر سرعت[۱۷]

۱-۳-۱-۲ حرکت تعداد متوالی از بارهای متمرکز بر روی تیر دو سر ساده

در شکل ۱-۹-الف تیر دو سر ساده بطول L که تحت عبور قطاری با سرعت ثابت v می باشد نشان داده شده است. فاصله هر چرخ متناظر در واگن ها از یکدیگر برابر d (شکل۱-۹-ب) می باشد. قطار از مرکز تیر عبور می کند یعنی در حرکت از اثر پیچش صرفنظر شده است. هر

واگن از دو بوژی تشکیل شده است که فاصله آنها همانطور که در شکل ۱-۹-ب نشان داده شده است برابر L_c می باشد و فاصله چرخ عقب واگن جلویی از چرخ جلوی واگن عقب برابر با L_d فرض شده است که مجموع این دو فاصله برابر با d می باشد یعنی $L_c+L_d=d$. نیروی چرخها را می توان به دو گروه تقسیم کرد یکی نیروی چرخهای جلوی واگن ها و دیگری نیروی چرخهای عقب واگن ها که فاصله زمانی بین این دو دسته نیرو در هر واگن برابر با $t_c=L_c/v$ می باشد.



شکل ۱-۹. تیر دو سر ساده تحت عبور مدل حرکت بار از قطار

با حل مسئله جواب به صورت مجموعه ای از اثر تمام چرخهای عبوری بر روی پل در خواهد آمد. برای حالت خاصی که طول پل از دو برابر فاصله واگن ها بزرگتر نباشد با ساده سازی روابط به یک عبارت کسری خواهیم رسید که در مخرج آن عبارت ۱-۱ ظاهر خواهد شد. اگر این مقدار برابر با صفر باشد مقدار جابجایی در صورت نبودن میرایی به سمت بینهایت میل خواهد کرد که حالت تشدید نام دارد[۱۷].

$$\sin\left(\omega_1 d/2v\right)=0 \quad \rightarrow S_1=\frac{d}{2iL} \quad , \qquad i=1,2,3,\ldots \qquad (۱-۱)$$

با در نظر گرفتن مقادیر i=1,2,3.. پدیده تشدید می تواند در پارامتر سرعتهای $S_1=\frac{0.5d}{L},\frac{0.25d}{L},\frac{0.167d}{L},\frac{0.125d}{L},\ldots$ اتفاق بیافتد ولی هر چه تشدید در سرعتهای پایین تر اتفاق بیافتد مقدار جابجایی تیر با نسبت $1/(1-S_1^2)$ کاهش پیدا می کند یعنی امکان اتفاق افتادن تشدید در سرعتهای پایین برای یک پل وجود دارد ولی مقدار پاسخ نسبت به سرعت های تشدید بالاتر، کمتر می باشد.

از طرف دیگر برای صورت کسر جواب بدست آمده برای حالت خاص مورد بررسی حرکت قطار بر روی پل عبارت ۱-۲ ظاهر خواهد شد که با صفر شدن آن اثر تمام چرخ های عبوری قطار صفر خواهد شد که حالت عکس حالت تشدید یعنی (کاهندگی) نام دارد.