



دانشکده عمران
گروه راه آهن

پیشنهاد طرح پژوهشی پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته‌ی عمران گرایش راه آهن و خطوط ریلی

عنوان فارسی

بررسی اندرکنش دینامیکی پل و قطار سریع السیر در حضور روسازی نردبانی در
مقایسه با روسازی‌های سنتی بالاستی و دال خط بتنی

عنوان انگلیسی

**Investigation of Dynamic High Speed Train- Bridge
Interaction with Ladder track in comparison With ballast
and Slab Track**

استاد راهنما

جناب آقای دکتر محمدحسین امین فر

استاد مشاور

جناب آقای دکتر مسعود رنجبرنیا

پژوهشگر

امین جاودانی پور

تاریخ ارائه طرح پایان نامه

بهمن ۹۷

کتابخانه تخصصی
فنون و صنایع دستی

نام خانوادگی دانشجو: جاودانی پور نام: امین

عنوان: بررسی اندرکنش دینامیکی پل و قطار سریع‌السير در حضور روسازی نردبانی در مقایسه با روسازی‌های سنتی بالاستی و دال خط بتنی

استاد راهنما: جناب آقای دکتر محمدحسین امین‌فر

استاد مشاور: جناب آقای دکتر مسعود رنجبرنیا

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی عمران گرایش: راه‌آهن و خطوط ریلی

دانشگاه: تبریز دانشکده: عمران

تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۹۷ تعداد صفحات: ۱۵۰

چکیده

در این تحقیق بعد از مدل‌سازی و صحت‌سنجی سیستم پل و قطار پرسرعت، اندرکنش دینامیکی پل و قطار در حضور روسازی نردبانی و در مقایسه با سیستم‌های روسازی سنتی بالاستی و دال خط بتنی بررسی می‌گردد. پارامترهای دینامیکی مورد بررسی، حداکثر شتاب قائم و نیز حداکثر جابجایی قائم بر روی عرشه پل جعبه‌ای می‌باشند که تحت اثر عبور وسیله نقلیه ریلی با بارهای محوری ۱۴، ۲۰ و ۲۵ تن و در سرعت‌های ۳۰، ۸۰، ۱۱۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استخراج شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

نتایج حاصله نشان می‌دهند که با افزایش سرعت و بار محوری، حداکثر شتاب قائم و نیز حداکثر جابجایی قائم افزایش می‌یابند. همچنین نتایج مورد نظر حاکی از آن است که در جذب جابجایی قائم، روسازی بالاستی بهتر از دو روسازی دیگر عمل نموده و در جذب شتاب قائم روسازی دال خط بتنی نتایج بهتری را از خود نشان می‌دهد. در انتها لازم به ذکر می‌باشد که سرعت‌های ۲۵۰ و ۲۶۰ کیلومتر بر ساعت به عنوان سرعت بحرانی عرشه پل، مورد پذیرش قرار گرفتند.

واژگان کلیدی: قطار پرسرعت، اندرکنش دینامیکی، روسازی نردبانی، روسازی بالاستی، روسازی دالخط

بتنی، پل جعبه‌ای، نرم‌افزار المان محدود آباکوس، سرعت بحرانی.

تقدیم به همه آن‌هایی که

می‌خواهند بیشتر بدانند...

خدایا...

۱

به من زیستی عطا کن که در لحظه مرگ، بر بی‌ثمری لحظه‌ای که برای زیستن گذشته‌است، حسرت نخورم و مُردنی عطا کن که بر بیهودگیش، سوگوار نباشم. بگذار تا آن را، خود انتخاب کنم، اما آنچنان که تو دوست میداری.

تو می‌دانی و همه می‌دانند که شکنجه دیدن بخاطر تو، زندانی کشیدن به خاطر تو و رنج بردن به پای تو تنها لذت بزرگ زندگی من است، از شادی توست که من در دل می‌خندم، از امید رهایی توست که برق امید در چشمان خسته‌ام می‌درخشد و از خوشبختی توست که هوای پاک سعادت را در ریه‌هایم احساس می‌کنم. نمی‌توانم خوب حرف بزنم. نیروی شگفتی را که در زیر کلمات ساده و جمله‌های ضعیف و افتاده، پنهان کرده‌ام دریاب، دریاب.

تو می‌دانی و همه می‌دانند که زندگی از تحمیل لبخندی بر لبان من، از آوردن برق امیدی در نگاه من، از برانگیختن موج شعفی در دل من، عاجز است.

تو، چگونه زیستن را به من بیاموز، چگونه مردن را خودم خواهم آموخت. به من توفیق تلاش در شکست، صبر در نومیدی، رفتن بی‌همراه، جهاد بی‌سلاح، کار بی‌پاداش، فداکاری در سکوت، دین بی‌دنیا، مذهب بی‌عوام، عظمت بی‌نام، خدمت بی‌نان، ایمان بی‌ریا، خوبی بی‌نمود، گستاخی بی‌خامی، قناعت بی‌غرور، عشق بی‌هوس، تنهایی در انبوه جمعیت، و دوست داشتن بی‌آن که دوست بداند، روزی کن.

اگر تنها ترین تنها شوم، باز خدا هست

او جانشین همه نداشتن‌هاست...

پاس‌گذاری...

سپاس خداوندگار حکیم را که با لطف بی‌کران خود، آدمی را زیور عقل آراست.

در آغاز وظیفه خود می‌دانم از زحمات بی‌دریغ استاد راهنمای خود، جناب آقای دکتر محمدحسین امین‌فر، صمیمانه تشکر و قدردانی کنم که قطعاً بدون راهنمایی‌های ارزنده ایشان، این مجموعه به انجام نمی‌رسید.

از جناب آقای دکتر مسعود رنجبرنیا که زحمت مطالعه و مشاوره این رساله را تقبل فرمودند و در آماده‌سازی این رساله، به نحو احسن اینجانب را مورد راهنمایی قرار دادند، کمال امتنان را دارم.

همچنین لازم می‌دانم از جناب آقای دکتر میثم جهانگیری به خاطر یاری‌رسانی در مورد نحوه مدل‌سازی نرم‌افزای و پاسخ به سوالات اینجانب کمال قدردانی را داشته‌باشم.

در پایان، بوسه می‌زنم بر دستان خداوندگاران مهر و مهربانی، پدر و مادر عزیزم و بعد از خدا، ستایش می‌کنم وجود مقدس‌شان و تشکر می‌کنم از خواهران عزیزم به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان، که در این سردترین روزگاران، بهترین پشتیبان من بودند.

امین جاودانی پور

۱۳۹۷

فهرست مطالب صفحه

فصل اول: مقدمه و کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۲-۱- بیان مسئله ۲

۳-۱- سؤالات تحقیق ۳

۴-۱- فرضیات تحقیق ۴

۵-۱- مواد و روش‌ها (روش تحقیق) ۴

۶-۱- نتایج مورد انتظار ۵

۷-۱- معیار ارزیابی موفقیت تحقیق ۵

فصل دوم: بررسی منابع و پیشینه موضوع ۷

۱-۲- مقدمه ۸

۲-۲- تاریخچه خطوط راه‌آهن سریع‌السیر کشور چین ۱۱

۳-۲- کلیات طراحی ۱۳

۴-۲- محدودیت‌های سرویس‌دهی ۱۴

۵-۲- روسازی‌های متداول ۱۷

۱-۵-۲- تیر با تکیه‌گاه ساده ۱۷

۲-۵-۲- تیر یکسره ۱۹

۶-۲- زیرسازی‌های مرسوم (پایه‌های متداول) ۱۹

۷-۲- روش‌های معمول ساخت ۲۰

۸-۲- فرکانس طبیعی پل‌های راه‌آهن ۲۲

۹-۲- میرایی پل‌های راه‌آهن ۲۳

۱۰-۲- تأثیر سرعت وسیله نقلیه در پاسخ دینامیکی پل‌ها ۲۳

| | | |
|----------|--|----|
| ۱۱-۲ | مشخصات مسأله دینامیکی | ۲۴ |
| ۱۲-۲ | پدیده تشدید در پل‌های راه آهن | ۲۴ |
| ۱۳-۲ | ضریب تأثیر دینامیکی | ۲۵ |
| ۱۴-۲ | تحلیل دینامیکی با در نظر گرفتن اندرکنش پل و قطار | ۲۵ |
| ۱۵-۲ | روسازی نردبانی | ۲۶ |
| ۱۶-۲ | ساختار تراورس نردبانی | ۲۷ |
| ۱۷-۲ | سیستم روسازی نردبانی | ۲۸ |
| ۱-۱۷-۲ | روسازی نردبانی بالاستی | ۲۹ |
| ۲-۱۷-۲ | روسازی نردبانی بدون بلاست | ۳۱ |
| ۱-۲-۱۷-۲ | روسازی نردبانی شناور اجرا شده بر روی بستر بتنی تخت دارای صفحات فلزی | ۳۲ |
| ۲-۲-۱۷-۲ | روسازی نردبانی شناور اجرا شده بر روی بستر بتنی L شکل | ۳۳ |
| ۳-۲-۱۷-۲ | روسازی نردبانی شناور اجرا شده بر روی بستر بتنی تخت به همراه المان ارتجاعی دایره‌ای | ۳۵ |
| ۱۸-۲ | پیشینه پژوهش | ۳۶ |
| ۴۹ | فصل سوم: مواد و روش‌ها | |
| ۱-۳ | مقدمه | ۵۱ |
| ۲-۳ | معرفی نرم افزار آباکوس | ۵۲ |
| ۳-۳ | مقایسه روش‌های ضمنی و صریح در مسائل وابسته به زمان | ۵۳ |
| ۴-۳ | فضای مدل‌سازی | ۵۴ |
| ۵-۳ | انواع المان‌ها از نظر تغییرشکل پذیری | ۵۴ |

| | | | |
|----|-------|----------------|--|
| ۵۴ | ..... | Deformable | نوع ۱-۵-۳ |
| ۵۵ | ..... | Discrete rigid | نوع ۲-۵-۳ |
| ۵۵ | ..... |  | ۶-۳- تعیین خواص مواد |
| ۵۶ | ..... |  | ۷-۳- نوع تحلیلگر در آباکوس |
| ۷۴ | ..... | Deformable | نوع ۱-۵-۳ |
| ۷۵ | ..... | Discrete rigid | نوع ۲-۵-۳ |
| ۷۵ | ..... |  | ۶-۳- تعیین خواص مواد |
| ۷۶ | ..... |  | ۷-۳- نوع تحلیل گر در آباکوس |
| ۵۶ | ..... |  | ۱-۷-۳- تحلیل عمومی |
| ۵۷ | ..... |  | ۲-۷-۳- تحلیل خطی |
| ۵۷ | ..... |  | ۸-۳- مفهوم اندرکنش |
| ۵۸ | ..... |  | ۹-۳- مدل سازی در نرم افزار آباکوس |
| ۵۸ | ..... | Part | ۱-۹-۳- محیط |
| ۵۹ | ..... |  | ۱-۱-۹-۳- عرشه پل |
| ۵۹ | ..... |  | ۲-۱-۹-۳- روسازی (لایه بالاست، دالخط بتنی، نردبانی) |
| ۵۹ | ..... |  | ۱-۲-۱-۹-۳- مدل سازی لایه بالاست |
| ۶۰ | ..... |  | ۲-۲-۱-۹-۳- مدل سازی روسازی دالخط بتنی |
| ۶۱ | ..... |  | ۳-۲-۱-۹-۳- مدل سازی روسازی نردبانی |
| ۶۱ | ..... |  | ۳-۱-۹-۳- ریل |
| ۶۲ | ..... |  | ۴-۱-۹-۳- مدل قطار |
| ۶۲ | ..... |  | ۱-۴-۱-۹-۳- مدل سازی محور |

| | |
|----|--|
| ۶۳ | مدل‌سازی بوژی لوکوموتیو و واگن ۲-۴-۱-۹-۳ |
| ۶۵ | مدل‌سازی بدنه لوکوموتیو و واگن ۳-۴-۱-۹-۳ |
| ۶۸ | صفحات جاذب ارتعاش انتهای ریل ۵-۱-۹-۳ |
| ۶۸ | محیط Property ۲-۹-۳ |
| ۶۹ | محیط Assembly ۳-۹-۳ |
| ۶۹ | محیط Step ۴-۹-۳ |
| ۷۰ | محیط Interaction ۵-۹-۳ |
| ۷۰ | المان‌های فنری میرا ۱-۵-۹-۳ |
| ۷۱ | مدل‌سازی اندرکنش (اندرکنش بین چرخ و ریل) ۲-۵-۹-۳ |
| ۷۲ | سختی معادل فنر هرتز ۳-۵-۹-۳ |
| ۷۳ | ضریب بار ۴-۵-۹-۳ |
| ۷۵ | اندرکنش پل و قطار در نرم‌افزار آباکوس ۵-۵-۹-۳ |
| ۷۵ | محیط Load ۶-۹-۳ |
| ۷۵ | بارگذاری ۱-۶-۹-۳ |
| ۷۷ | شرایط مرزی ۳-۹-۶-۲ |
| ۷۹ | محیط Mesh ۷-۹-۳ |
| ۸۰ | محیط Job ۸-۹-۳ |
| ۸۰ | محیط Visualization ۹-۹-۳ |
| ۸۰ | اعتبار سنجی مدل ۱۰-۳ |
| ۸۱ | آنالیز مدال ۱-۱۰-۳ |
| ۸۷ | صحت‌سنجی ۲-۱۰-۳ |

| | |
|---|-----|
| فصل چهارم: نتایج و بحث | ۹۰ |
| ۱-۴- مقدمه | ۹۱ |
| ۲-۴- شیوه انجام آنالیز عددی | ۹۱ |
| ۳-۴- نتایج و بحث | ۹۲ |
| ۱-۳-۴- بررسی تأثیر بار محوری بر میزان حداکثر شتاب قائم در محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی | ۹۲ |
| ۲-۳-۴- بررسی تأثیر بار محوری بر میزان حداکثر شتاب قائم در محور عرض و میانی پل در روسازی نردبانی | ۹۸ |
| ۳-۳-۴- بررسی تأثیر بار محوری بر میزان حداکثر جابجایی قائم در محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی | ۱۰۳ |
| ۴-۳-۴- بررسی تأثیر بار محوری بر میزان حداکثر جابجایی قائم در محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی | ۱۰۸ |
| ۵-۳-۴- بررسی تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم در محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی | ۱۱۳ |
| ۶-۳-۴- بررسی وضعیت نقطه میانی عرشه (BMP3) در سرعت‌های مختلف روسازی نردبانی | ۱۱۶ |
| ۷-۳-۴- بررسی تأثیر سرعت بر میزان حداکثر جابجایی قائم در محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی | ۱۱۷ |
| ۸-۳-۴- بررسی تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی | ۱۲۱ |
| ۹-۳-۴- بررسی تأثیر سرعت بر میزان حداکثر جابجایی قائم در محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی | ۱۲۴ |

| | |
|--|------------|
| ۱۰-۳-۴- بررسی تأثیر به کارگیری انواع روسازی در میزان حداکثر جابجایی قائم در امتداد محور طولی | ۱۲۷ |
| ۱۱-۳-۴- بررسی تأثیر به کارگیری انواع روسازی در میزان حداکثر جابجایی قائم در امتداد محور عرضی | ۱۳۰ |
| ۱۲-۳-۴- بررسی تأثیر به کارگیری انواع روسازی در میزان حداکثر شتاب قائم در امتداد محور طولی | ۱۳۴ |
| ۱۳-۳-۴- بررسی تأثیر به کارگیری انواع روسازی در میزان حداکثر شتاب قائم در امتداد محور عرضی | ۱۳۷ |
| فصل پنجم: جمع بندی و پیشنهادات | ۱۴۱ |
| ۱-۵- مقدمه | ۱۴۲ |
| ۲-۵- جمع بندی | ۱۴۲ |
| ۳-۵- پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آتی | ۱۴۴ |
| پیوست | ۱۴۵ |
| منابع و مراجع | ۱۴۸ |

| فهرست جداول | صفحه |
|--|------|
| جدول ۱-۳- خصوصیات مصالح | ۶۷ |
| جدول ۲-۳- مقادیر بار ۱۴ تنی اعمال شده در واگن و لکوموتیوها | ۷۶ |
| جدول ۳-۳- مقادیر بار ۲۰ تنی اعمال شده در واگن و لکوموتیوها | ۷۶ |
| جدول ۴-۳- مقادیر بار ۲۵ تنی اعمال شده در واگن و لکوموتیوها | ۷۶ |
| جدول ۵-۳- نتایج آنالیز مدال به جهت محاسبه اندازه مش غالب در محاسبات | ۸۶ |
| جدول ۱-۴- مقادیر حداکثر شتاب قائم در نقطه BSQSP3 بر حسب سرعت (بار محوری ۱۴ تن) | ۱۱۳ |
| جدول ۲-۴- مقادیر حداکثر شتاب قائم در نقطه BSQSP3 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۰ تن) | ۱۱۴ |
| جدول ۳-۴- مقادیر حداکثر شتاب قائم در نقطه BSQSP3 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۵ تن) | ۱۱۵ |
| جدول ۴-۴- مقادیر حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP3 بر حسب سرعت (بار محوری ۱۴ تن) | ۱۱۷ |
| جدول ۵-۴- مقادیر حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP3 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۰ تن) | ۱۱۸ |
| جدول ۶-۴- مقادیر حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP3 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۵ تن) | ۱۴۰ |
| جدول ۷-۴- مقادیر حداکثر شتاب قائم در نقطه BMP1 بر حسب سرعت (بار محوری ۱۴ تن) | ۱۲۱ |
| جدول ۸-۴- مقادیر حداکثر شتاب قائم در نقطه BMP1 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۰ تن) | ۱۲۲ |
| جدول ۹-۴- مقادیر حداکثر شتاب قائم در نقطه BMP1 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۵ تن) | ۱۲۳ |
| جدول ۱۰-۴- مقادیر حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP1 بر حسب سرعت (بار محوری ۱۴ تن) | ۱۲۴ |
| جدول ۱۱-۴- مقادیر حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP1 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۰ تن) | ۱۲۵ |

جدول ۴-۱۲- مقادیر حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP1 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۵ تن) ... ۱۲۶

جدول ۴-۱۳- مقادیر حداکثر جابجایی قائم بر حسب نوع روسازی و سرعت سیر در امتداد طولی ۱۲۹

جدول ۴-۱۴- مقادیر حداکثر جابجایی قائم بر حسب نوع روسازی و سرعت سیر (در امتداد عرضی) ۱۳۲

جدول ۴-۱۵- مقادیر حداکثر شتاب قائم بر حسب نوع روسازی و سرعت سیر (در امتداد طولی) ۱۳۵

جدول ۴-۱۶- مقادیر حداکثر شتاب قائم بر حسب نوع روسازی و سرعت سیر (در امتداد عرضی) ۱۳۹

فهرست اشکال صفحه

- شکل ۱-۱: تصویر پل Gouhe تحت عبور قطار سریع‌السیر چاینا استار ۶
- شکل ۱-۲: زاویه‌ای دیگر از پل Gouhe ۶
- شکل ۲-۱: مقایسه درصدی طول مسیر خطوط سریع‌السیر بر حسب کشور ۹
- شکل ۲-۲: درصد پل‌های موجود در روسازه خطوط سریع‌السیر اصلی کشور چین ۱۱
- شکل ۲-۳: سیستم شبکه خطوط ریلی سریع‌السیر کشور چین تا سال ۲۰۲۰ ۱۳
- شکل ۲-۴: ضوابط سرورس‌دهی در پل‌های خطوط سریع‌السیر ۱۴
- شکل ۲-۵: مقایسه ویژگی‌های کلیدی پله‌ای خطوط راه‌آهن پرسرعت شش کشور ۱۵
- شکل ۲-۶: ضوابط طراحی دینامیکی برای پل‌های خطوط سریع‌السیر ۱۶
- شکل ۲-۷: دسته‌بندی تیر با تکیه‌گاه ساده در پل‌های خطوط سریع‌السیر ۱۷
- شکل ۲-۸: مقطع عرضی متداول تیر با تکیه‌گاه ساده در خطوط سریع‌السیر کشور چین ۱۸
- شکل ۲-۹: تیرهای یک‌سر متداول با عمق متغیر در خطوط سریع‌السیر کشور چین ۱۹
- شکل ۲-۱۰: دو نوع از پایه‌های متداول در خطوط سریع‌السیر کشور چین ۲۰
- شکل ۲-۱۱: ساخت‌وساز تیر با تکیه‌گاه ساده در پل‌های خطوط سریع‌السیر کشور چین ۲۱
- شکل ۲-۱۲: روش‌های ساخت متداول برای تیرهای یک‌سر در خطوط سریع‌السیر ۲۲
- شکل ۲-۱۳: الف- مدل کامل اندرکنش پل و قطار، ب- مدل ساده‌شده اندرکنش ۲۶
- شکل ۲-۱۴: سیستم تراورس نردبانی ۲۷

- شکل ۲-۱۵: نحوه اتصال لوله فلزی عرضی به تیر بتنی طولی در تراورس نردبانی ۲۸
- شکل ۲-۱۶: انواع سیستم روسازی نردبانی ۲۹
- شکل ۲-۱۷: تیرهای عرضی بتنی اجرا شده در انتهای تراورس نردبانی ۲۹
- شکل ۲-۱۸: استفاده از پد در زیر تیرهای طولی بتنی در روسازی نردبانی بالاستی ۳۰
- شکل ۲-۱۹: روسازی نردبانی بالاستی ۳۱
- شکل ۲-۲۰: روسازی نردبانی شناور ۳۱
- شکل ۲-۲۱: روسازی نردبانی شناور اجرا شده بر روی بستر بتنی تخت دارای صفحات فلزی ۳۳
- شکل ۲-۲۲: روسازی نردبانی شناور اجرا شده بر روی بستر بتنی تخت دارای صفحات فلزی ۳۳
- شکل ۲-۲۳: جزئیات اجرای روسازی نردبانی شناور اجرا شده بر روی بستر بتنی L شکل ۳۴
- شکل ۲-۲۴: جزئیات اجرای روسازی نردبانی شناور اجرا شده بر روی بستر بتنی L شکل ۳۴
- شکل ۲-۲۵: نمونه‌ای از اجرای روسازی نردبانی شناور اجرا شده بر روی بستر بتنی L شکل ۳۵
- شکل ۲-۲۶: مدل روسازی نردبانی شناور به همراه المان ارتجاعی دایره‌ای ۳۶
- شکل ۲-۲۷: نمایش سه‌بعدی مدل یکی از واگن‌های قطار ۳۷
- شکل ۲-۲۸: مدل‌سازی پل مورد نظر با استفاده از نرم افزار انسیس ۳۸
- شکل ۲-۲۹: مدل‌سازی بالاست با استفاده از فنر و میراگر ۳۸
- شکل ۲-۳۰: نمایی از مقطع طولی پل با دهانه ۵۰ متری با مقطع U شکل ۳۹
- شکل ۲-۳۱: نمایی از مقطع عرضی پل مورد بررسی ۴۱

- شکل ۲-۳۲: مودهای تجربی پل استخراج شده از نرم‌افزار مطلب ۴۱
- شکل ۲-۳۳: مقطع جانبی در مدل اندرکنش دینامیکی قطار سریع‌السیر، پل و سازه خط ۴۱
- شکل ۲-۳۴: مقطع عرضی در مدل اندرکنش دینامیکی قطار سریع‌السیر، پل و سازه خط ۴۲
- شکل ۲-۳۵: مدل خط بالاستی راه‌آهن سریع‌السیر ۴۲
- شکل ۲-۳۶: مدل خط دال خط بتنی راه‌آهن سریع‌السیر (a) مقطع عرضی (b) نمای پایانی ۴۳
- شکل ۲-۳۷: مقطع پل شاه‌تیر بتنی ۴۳
- شکل ۲-۳۸: صحت‌سنجی مدل تحت عبور قطار با سرعت ۲۶۰ کیلومتر بر ساعت ۴۳
- شکل ۲-۳۹: مدل سه بعدی قطار متحرک ۴۴
- شکل ۲-۴۰: سیستم نردبانی آزمایشی نصب شده در خط ۵ مترو بیژینگ ۴۵
- شکل ۲-۴۱: تصویر شماتیک ناهمواری‌های استاتیکی و دینامیکی خط ۴۵
- شکل ۲-۴۲: (a) سطح کاهش ارتعاش تحت بارهای مختلف، بار هارمونیک، (b) بار ضربه ای ۴۶
- شکل ۲-۴۳: نمایی از پل آنتوئینگ ۴۷
- شکل ۲-۴۴: مدل المان محدود عرشه U شکل ۴۷
- شکل ۲-۴۵: مقطع عرضی پل بسیا ۴۸
- شکل ۲-۴۶: نمایی کلی از پل خط‌آهن بسیا ۴۸
- شکل ۲-۴۷: مدل المان محدود عرشه پل بسیا ۴۸
- شکل ۳-۱: محیط‌های ده‌گانه نرم افزار آباکوس ۵۷

- شکل ۳-۲: مدل عرشه پل ۵۸
- شکل ۳-۳: روسازی بالاستی ۵۹
- شکل ۳-۴: روسازی دالخط بتنی مدل شده ۵۹
- شکل ۳-۵: روسازی دالخط بتنی مدل شده بر روی عرشه پل ۶۰
- شکل ۳-۶: مدل روسازی نردبانی ۶۰
- شکل ۳-۷: مدل ریل ۶۱
- شکل ۳-۸: مدل محور ۶۱
- شکل ۳-۹: مدل بوژی لوکوموتیو ۶۲
- شکل ۳-۱۰: مدل بوژی واگن ۶۲
- شکل ۳-۱۱: مدل بوژی لوکوموتیو و محورها ۶۳
- شکل ۳-۱۲: مدل بوژی واگن و محورها ۶۳
- شکل ۳-۱۳: مدل بدنه لوکوموتیو ۶۴
- شکل ۳-۱۴: مدل بدنه واگن ۶۴
- شکل ۳-۱۵: مدل کامل بدنه و بوژی‌ها و محورهای لوکوموتیو ۶۵
- شکل ۳-۱۶: مدل کامل بدنه و بوژی‌ها و محورهای واگن ۶۵

- شکل ۳-۱۷: الگوی مش‌بندی اجزا قطار ۶۶
- شکل ۳-۱۸: صفحه جاذب ارتعاش ۶۷
- شکل ۳-۱۹: نمونه کامل مونتاژ شده ۶۸
- شکل ۳-۲۰: تنظیمات منوی Step ۶۹
- شکل ۳-۲۱: فنرهای هرتز و اندرکنش آن‌ها با ریل ۷۱
- شکل ۳-۲۲: نمونه ای از فنرهای هرتز ۷۲
- شکل ۳-۲۳: بارگذاری در مرکز ثقل بدنه، بوژی و چرخ‌ها ۷۵
- شکل ۳-۲۵: مدل مش‌بندی کامل پل ۷۹
- شکل ۳-۲۶: شکل مدی عرشه پل در مد اول ۸۰
- شکل ۳-۲۷: شکل مدی عرشه پل در مد دوم ۸۰
- شکل ۳-۲۸: شکل مدی عرشه پل در مد سوم ۸۱
- شکل ۳-۲۹: شکل مدی عرشه پل در مد چهارم ۸۱
- شکل ۳-۳۰: شکل مدی عرشه پل در مد پنجم ۸۲
- شکل ۳-۳۱: شکل مدی عرشه پل در مد ششم ۸۲
- شکل ۳-۳۲: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۱۰۰ سانتی‌متری ۸۳
- شکل ۳-۳۳: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۹۰ سانتی‌متری ۸۳
- شکل ۳-۳۴: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۸۰ سانتی‌متری ۸۳

- شکل ۳-۳۵: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۷۰ سانتی‌متری ۸۳
- شکل ۳-۳۶: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۶۰ سانتی‌متری ۸۴
- شکل ۳-۳۷: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۵۰ سانتی‌متری ۸۴
- شکل ۳-۳۸: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۴۰ سانتی‌متری ۸۴
- شکل ۳-۳۹: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۳۰ سانتی‌متری ۸۴
- شکل ۳-۴۰: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۲۰ سانتی‌متری ۸۵
- شکل ۳-۴۱: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۱۰ سانتی‌متری ۸۵
- شکل ۳-۴۲: محل سنسورها در آزمایش میدانی ۸۷
- شکل ۴-۱: نقاط استخراج داده‌ها بر روی دهانه وسط پل ۹۱

| | |
|--|------|
| فهرست نمودارها | صفحه |
| نمودار ۱-۳: روند اعمال سرعت در طول زمان تحلیل | ۷۳ |
| نمودار ۲-۳: روند اعمال بار در طول زمان تحلیل | ۷۳ |
| نمودار ۳-۳: پروسه حل اندرکنش پل و قطار در نرم افزار آباکوس | ۷۴ |
| نمودار ۴-۳: مقایسه داده‌های حاصل از آزمایش میدانی و داده‌های استخراج‌شده از نرم‌افزار آباکوس در نقطه | |
| مرکزی دهانه (سرعت ۲۶۰ کیلومتر بر ساعت) | ۸۸ |
| نمودار ۱-۴: نمودار درختی نحوه انجام مدل‌سازی | ۹۰ |
| نمودار ۱-۴: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت | |
| ۳۰ کیلومتر بر ساعت) | ۹۲ |
| نمودار ۲-۴: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت | |
| ۸۰ کیلومتر بر ساعت) | ۹۳ |
| نمودار ۳-۴: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت | |
| ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت) | ۹۴ |
| نمودار ۴-۴: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت | |
| ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت) | ۹۵ |
| نمودار ۵-۴: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت | |
| ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت) | ۹۶ |

- نمودار ۴-۶: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت) ۹۷
- نمودار ۴-۷: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت) ۹۸
- نمودار ۴-۸: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت) ۹۹
- نمودار ۴-۹: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۰۰
- نمودار ۴-۱۰: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۰۱
- نمودار ۴-۱۱: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۰۲
- نمودار ۴-۱۲: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۰۳
- نمودار ۴-۱۳: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۰۴

- نمودار ۴-۱۴: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۰۵
- نمودار ۴-۱۵: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۰۶
- نمودار ۴-۱۶: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۰۷
- نمودار ۴-۱۷: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۰۸
- نمودار ۴-۱۸: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۰۹
- نمودار ۴-۱۹: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۱۰
- نمودار ۴-۲۰: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۱۱
- نمودار ۴-۲۱: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۱۴ تن) ۱۱۲

- نمودار ۴-۲۲: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۰ تن) ۱۱۳
- نمودار ۴-۲۳: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۵ تن) ۱۱۴
- نمودار ۴-۲۴: تأثیر سرعت و بارمحوری بر میزان حداکثر شتاب قائم نقطه BMP3 در روسازی نردبانی ۱۱۵
- نمودار ۴-۲۵: تأثیر سرعت و بارمحوری بر میزان حداکثر جابجایی قائم نقطه BMP3 در روسازی نردبانی ۱۱۶
- نمودار ۴-۲۶: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۵ تن) ۱۱۷
- نمودار ۴-۲۷: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۰ تن) ۱۱۸
- نمودار ۴-۲۸: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۵ تن) ۱۱۹
- نمودار ۴-۲۹: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۱۴ تن) ۱۲۰

- نمودار ۴-۳۰: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۰ تن) ۱۲۱
- نمودار ۴-۳۱: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۵ تن) ۱۲۲
- نمودار ۴-۳۲: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر جابجایی قائم نقاط محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۱۴ تن) ۱۲۳
- نمودار ۴-۳۳: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر جابجایی قائم نقاط محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۰ تن) ۱۲۴
- نمودار ۴-۳۴: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر جابجایی قائم نقاط محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۵ تن) ۱۲۵
- نمودار ۴-۳۵: مقایسه تأثیر روسازی‌ها بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۲۶
- نمودار ۴-۳۶: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۲۷
- نمودار ۴-۳۷: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۲۷

- نمودار ۴-۳۸: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۲۸
- نمودار ۴-۳۹: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۲۸
- نمودار ۴-۴۰: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۰
- نمودار ۴-۴۱: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۰
- نمودار ۴-۴۲: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۱
- نمودار ۴-۴۳: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۱
- نمودار ۴-۴۴: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۳
- نمودار ۴-۴۵: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۳

- نمودار ۴-۴۶: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۸۰۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۳
- نمودار ۴-۴۷: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۴
- نمودار ۴-۴۸: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۴
- نمودار ۴-۴۹: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۵
- نمودار ۴-۵۰: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۶
- نمودار ۴-۵۱: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۶
- نمودار ۴-۵۲: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۷
- نمودار ۴-۵۳: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۷
- نمودار ۴-۵۴: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت) ۱۳۸

فصل ۱

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

امروزه درحالی که پیشرفت تنها لازمه بقای کشورها می‌باشد، دولت‌ها به اتفاق به این باور رسیده‌اند که بدون تعامل با یکدیگر، پیمودن این مسیر سخت و چالش برانگیز دور از ذهن خواهد بود. گسترش افقی و روزافزون شهرها، به ویژه شهرهای صنعتی و کلان‌شهرها یکی از پیامدهای ناگزیر این پیشرفت می‌باشد و باعث شده است که نیاز به یک پل ارتباطی بیش از پیش نمایان شود. حمل‌ونقل یکی از ابتدایی‌ترین و در عین حال مهم‌ترین گزینه‌های ارتباطی می‌باشد که خود به سه نوع حمل‌ونقل جاده‌ای، حمل‌ونقل هوایی و حمل‌ونقل ریلی تقسیم می‌گردد.

در این میان حمل‌ونقل ریلی با توجه به دارا بودن مزیت‌های نسبی در مقایسه با سایر روش‌ها، در بین کشورهای توسعه‌یافته از مقبولیت بیشتری برخوردار می‌باشد. حمل‌ونقل ریلی در مقایسه با حمل‌ونقل جاده‌ای از لحاظ اجرایی دارای آزادی عمل کمتری می‌باشد، لذا درصد استفاده از ابنیه فنی در آن در مقایسه با حمل‌ونقل جاده‌ای بیشتر می‌باشد. از جمله‌ی مهم‌ترین ابنیه فنی خط‌آهن، پل‌ها هستند که به دلیل اهمیت اجرا، از متخصصین سازه، زلزله، ژئوتکنیک، هیدرولوژی و غیره استفاده می‌گردد تا رفتار و واکنش اجزای پل در برابر تمامی بارهای وارده بر آن شناسایی و در طراحی منظور شود. بارهای وارده نیز در پل‌های راه‌آهن از لحاظ بار محوری، سرعت و حجم ترافیک سالیانه متفاوت بوده و رفتار دینامیکی کاملاً متفاوتی در مقایسه با پل‌های جاده‌ای دارند، لذا شناخت و بررسی هرچه دقیق‌تر این ویژگی‌ها، باعث افزایش عمر روسازی خط‌آهن، سرویس‌دهی بهتر پل، کاهش ارتعاشات و در نهایت باعث افزایش راحتی سفر خواهد شد.

۱-۲- بیان مسئله

سیستم حمل‌ونقل سریع‌السیر، یکی از ضروریات عصر جدید می‌باشد که حمل‌ونقل ریلی سریع‌السیر از زیر مجموعه این سیستم می‌باشد. امروزه کمتر کشوری وجود دارد که دارای راه‌آهن نباشد، ولی کشورهایی که دارای راه‌آهن سریع‌السیر باشند نیز، انگشت‌شمار هستند. کشور عزیزمان ایران دارای مناطق کوهستانی متعدد می‌باشد، در نتیجه نیاز به طراحی پل‌های مختلف، کاهش زمان سفر همگام با افزایش امنیت سفر و به

کارگیری سیستم حمل و نقل سریع‌السیر بیش از پیش ضرورت پیدا می‌کند. لذا برآن شدیم تا اثرات عبور قطار سریع‌السیر بر روی پل در حضور سیستم‌های مختلف روسازی را مورد بررسی قرار دهیم.

خطوط سریع‌السیر، همواره باید از لحاظ بهره‌وری و ایمنی در شرایط بهینه قرار داشته‌باشند. همان‌طور که اشاره شد، از جمله مزایای این خطوط نسبت به خطوط ریلی معمولی، سرعت بالای آن می‌باشد. از طرفی، همین سرعت بالا همراه با بار محوری بیشتر، زمینه‌ساز بروز مشکلاتی در خطوط ریلی سریع‌السیر خواهد شد. در سرعت‌های بالای قطار، هر بار عبور وسیله نقلیه باعث وارد آمدن ضربات دینامیکی از طرف چرخ بر سازه خط و همچنین تأثیر آن بر روی پل خواهد شد. سیستم روسازی در پل‌های راه‌آهن دارای انواع مختلف می‌باشد که می‌توان به روسازی‌های سنتی بالاستی، دال خط بتنی و روسازی نردبانی اشاره نمود. در این بین روسازی نردبانی دارای مزایای مناسبی همانند حجم کمتر مصالح مصرفی، انعطاف‌پذیری مناسب، مقاومت جانبی بالاتر در مقابل واژگونی (حتی در پیچ‌های تند و سرعت بالا) و جذب ارتعاش قابل توجه می‌باشد. لذا نیاز می‌باشد مزایا و معایب این سیستم در مقابل سایر سیستم‌های روسازی به منظور امکان تصمیم‌گیری بهینه در انتخاب روسازی، مورد بررسی قرار گیرد.

۳-۱- سوالات تحقیق

۱. اثرات استفاده از روسازی نردبانی در مقایسه با سایر انواع روسازی بر اندرکنش پل و قطار سریع‌السیر چگونه می‌باشد؟
۲. افزایش سرعت چه تأثیری بر پارامترهای دینامیکی سیستم‌های مختلف روسازی در مقایسه با یکدیگر دارد؟
۳. پارامترهای بار محوری چه تأثیری بر اندرکنش دینامیکی قطار و پل دارد؟
۴. سرعت‌های بحرانی متناظر با پاسخ‌های پل در دهانه‌های مختلف و سیستم‌های مختلف روسازی به چه صورت می‌باشد؟

۴-۱- فرضیات تحقیق

این پژوهش، با تکیه بر یکسری فرضیات اولیه به انجام خواهد رسید که در ذیل بدان اشاره می‌نماییم:

- پلی که قرار است مورد مدل‌سازی قرار گیرد، یک پل جعبه‌ای بتنی دو خطه با دهانه ساده می‌باشد که در خطوط راه‌آهن سریع‌السير کشور چین به وفور مورد استفاده قرار گرفته‌است. در بخش اعتبار سنجی، پل با دهانه ۲۴ متر و در بخش آنالیز حساسیت، پل با دهانه های ۲۴ و ۳۲ متر مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- بار وارده به صورت قطار متحرک^۱ بوده و اندرکنش بین چرخ وسیله نقلیه و ریل با فنر هرتز مدل‌سازی خواهد شد.
- قطار مورد استفاده در پژوهش، قطار سریع‌السير چاینا استار^۲ ساخت کشور چین می‌باشد. بار استاتیکی میانگین برای لوکومتیو برابر ۱۹۵ کیلونیوتن و برای واگن‌ها برابر ۱۴۲/۵ کیلونیوتن می‌باشد. هر واگن دارای بوژی دومحوره بوده و دارای چهار چرخ محور می‌باشد. درجات آزادی هر وسیله نقلیه در حالت سه بعدی جمعاً برابر ۲۷ فرض می‌شود.
- روسازی نردبانی، از نوع روسازی نردبانی شناور اجرا شده بر روی بستر بتنی مسطح همراه با صفحات فلزی انتخاب می‌شود. روسازی بالاستی از نوع استاندارد بوده و روسازی دال خط نیز از نوع پکت^۳ با اتصالات ارتجاعی پاندرول می‌باشد.

۵-۱- مواد و روش‌ها (روش تحقیق)

روش تحقیق از نوع تحقیقی- توصیفی می‌باشد. پروژه از نوع کاربردی است.

متدولوژی (روش انجام کار):

به منظور مدل‌سازی دقیق، نیاز به ورود نتایج آزمایش‌های مقاومت مصالح و همچنین نتایج تست‌های میدانی دینامیکی می‌باشد که برای پل مدنظر نتایج این آزمایشات وجود دارد. مدل‌سازی کامل سازه پل با استفاده از

^۱ Moving Train

^۲ China Star

^۳ Pact

نرم‌افزار المان محدودی آباکوس^۱، برای بررسی نتایج ایجاد شده در قسمت‌های مختلف سازه‌ی پل پرداخته خواهد شد تا بتوان شرایط موجود پل را از دیدگاه تحلیل اجزاء محدود به طور کامل مورد بررسی قرار داد. در ادامه ارزیابی پل تحت شرایط آنالیز حساسیت مختلف تحت عبور قطار در حضور سه نوع روسازی نردبانی، دال خط بتنی و روسازی سنتی بالاستی انجام پذیرفته و نتایج به تفصیل تشریح خواهد شد. همچنین خاصیت سه نوع روسازی نام برده در میزان ارتعاشات منتقل شده از وسیله نقلیه ریلی به پل، مورد مطالعه قرار گرفته و بهینه‌ترین نوع روسازی ریلی انتخاب خواهد شد. در انتها، سرعت‌های بحرانی در سه نوع روسازی استخراج شده و تمهیداتی نیز در این زمینه پیشنهاد خواهد شد.

۱-۶- نتایج مورد انتظار

با توجه به ماهیت پژوهش انجام گرفته، انتظار می‌رود که با توجه به این که روسازی نردبانی نسبت به دو روسازی دال خط بتنی و بالاستی دارای خصوصیات بهتری در جذب ارتعاشات می‌باشد، لذا بهبود نتایج دینامیکی خط را نتیجه خواهد داد. همچنین افزایش سرعت باعث افزایش مقادیر پارامترهای دینامیکی خط خواهد شد.

۱-۷- معیار ارزیابی موفقیت تحقیق

با توجه به اینکه پژوهش انجام شده با استناد به پژوهش‌های معتبر بین‌المللی و نیز مطابق با استانداردهای علمی انجام گرفته‌است، و همچنین به دلیل آشنایی با خواص دینامیکی سیستم‌های روسازی نردبانی، دال خط بتنی و سنتی بالاستی، می‌توان محدوده صحیح نتایج به‌دست آمده را پیش‌بینی نمود. با توجه به اهداف و سوالات پژوهش حاضر در این فصل، سعی به بررسی پل جعبه‌ای پیش‌تنیده *Gouhe* (شکل ۱-۱ و ۲-۱) واقع در کشور چین نموده و یافتن پاسخ‌های آن تحت شرایط مختلف وضعیت فعلی بهره‌برداری، بار محوری و سرعت پرداخته خواهد شد. در انتها پاسخ‌های نهایی پل توسط نرم‌افزار سه‌بعدی آباکوس استخراج شده و با یکدیگر مقایسه می‌گردد.

^۱Abaqus

با توجه به نتایج فصل چهارم و سوالات و اهداف مطرح شده در فصل اول، نتایج نهایی استخراج شده و پاسخ سوالات ارائه خواهد گردید.



شکل ۱-۱: تصویر پل Gouhe تحت عبور قطار سریع السیر چاینا استار.



شکل ۱-۲: زاویه‌ای دیگر از پل Gouhe.

فصل ۲

بررسی منابع و پیشینه موضوع

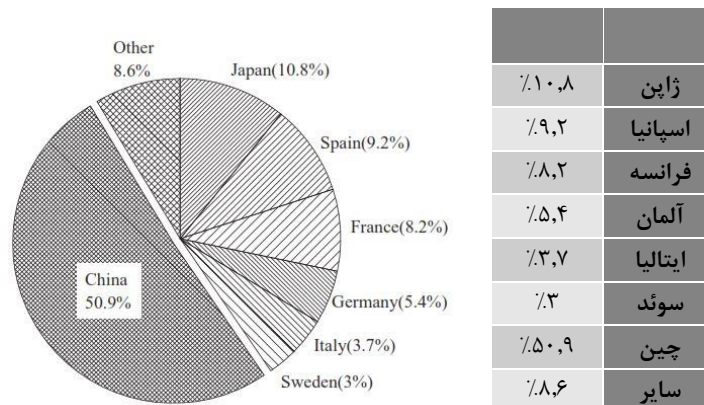
۲-۱- مقدمه

در صنعت حمل‌ونقل، خطوط ریلی به عنوان اقتصادی‌ترین و ایمن‌ترین وسیله همواره جایگاه ویژه‌ای داشته است که با توجه به نیاز جهانی جهت حمل و نقل سریع مسافر، بهبود کیفیت زندگی و کمک به رشد اقتصادی، خطوط سریع‌السیر هر روزه گسترش بیشتری می‌یابد. می‌توان گفت اولین راه حمل‌ونقل سریع بشر، راه‌آهن بوده‌است که قدمت آن بیشتر از جاده‌ها و اتومبیل است. از تاریخ حرکت اولین قطار در نیمه اول قرن نوزدهم میلادی در انگلستان تا به امروز تغییرات بسیار زیادی چه در راه‌سازی و ابنیه راه و چه در قطارها ایجاد شده‌است و می‌توان این دوره را در دو دسته زمانی جای داد، دوره قطارهای با سرعت‌های پایین و دوره قطارهای سریع‌السیر.

طبق استاندارد اروپا به خطوطی که سرعت مجاز سیر ناوگان بر روی آن بیش از ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت باشد خطوط سریع‌السیر گفته می‌شود، در حالی که انجمن راه‌آهن ایالات متحده آمریکا سرعت ۱۴۵ کیلومتر بر ساعت را به عنوان مرز قطارهای معمولی و قطارهای سریع‌السیر در نظر می‌گیرد. گرچه در حال حاضر این سرعت سیر با گذشت زمان در حال افزایش می‌باشد. عمر خطوط سریع‌السیر اکنون از مرز ۵۴ سال می‌گذرد. هر چند از افتتاح اولین خط کشور ژاپن در سال ۱۹۶۴ به نام شین‌کانسن^۱ برای المپیک توکیو، بین دو شهر توکیو و اوساکا تا فراگیر شدن آن در سال ۱۹۸۱ با عنوان TGV در کشور فرانسه مدت نسبتاً طولانی طی شد. لیکن در حال حاضر توسعه این خطوط با سرعت قابل توجهی ادامه دارد. در قاره اروپا خط‌آهن سریع‌السیر در ابتدا در بسیاری از کشورها توسعه یافته و به یک سرویس حمل‌ونقل بومی بدل شد. در طول چند دهه گذشته، جمعاً سیزده کشور به خصوص در قاره اروپا و آسیای شرقی سیستم حمل‌ونقل ریلی را بسط داده‌اند. نمونه‌های بین‌المللی از این کشورها ثابت کرده‌است که قطارهای سریع‌السیر توانایی دستیابی به سرعت بالای ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت در قسمت مسافری را دارا می‌باشند که می‌توانند زمان سفر را کاهش دهند. در کل جهان ساخت‌وساز خطوط سریع‌السیر هنوز یک روند در دست اقدام می‌باشد که بسیاری از کشورها از جمله کشور ایالات متحده آمریکا و استرالیا [۱-۴] برنامه‌های آتی توسعه شبکه خطوط

^۱Shinkansen

سریع‌السیر را وضع کرده‌اند. داده‌های نظرسنجی که به وسیله اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن‌ها (UIC) جمع‌آوری شده‌است نشان می‌دهد که کشور چین در حال حاضر پیشتاز ساخت‌وساز خط‌آهن سریع‌السیر بوده و تا سال ۲۰۱۸ با بیش از ۲۵۰۰۰ کیلومتر خط، طولانی‌ترین شبکه راه‌آهن سریع‌السیر جهان را دارا می‌باشد. خطوط سریع‌السیر این کشور شامل خطوط ارتقاء یافته موجود با سرعت طراحی میانگین ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت به طول ۳۲۰۹ کیلومتر و نیز خطوط جدید با سرعت متوسط طراحی ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت به طول ۹۳۵۶ کیلومتر می‌باشد. با توجه به برنامه‌ریزی کشور چین تا سال ۲۰۲۰ طول کلی شبکه خطوط سریع‌السیر تکمیل شده و از مرز ۲۰۰۰۰ کیلومتر عبور خواهد کرد و مرکز استان‌ها و همچنین شهرهای بزرگ که جمعیتی را که بیش از ۵ میلیون نفر [۵] دارند به هم متصل خواهد کرد. در شکل ۱-۲ سهم کشورهای پیشرفته از خطوط سریع‌السیر نشان داده شده‌است.



| | |
|---------|-------|
| زاین | ۱۰٫۸٪ |
| اسپانیا | ۹٫۲٪ |
| فرانسه | ۸٫۲٪ |
| آلمان | ۵٫۴٪ |
| ایتالیا | ۳٫۷٪ |
| سوئد | ۳٪ |
| چین | ۵۰٫۹٪ |
| سایر | ۸٫۶٪ |

شکل ۱-۲: مقایسه درصدی طول مسیر خطوط سریع‌السیر بر حسب کشور [۵].

راه‌اندازی قطار سریع‌السیر پروژه‌های عظیم و با اهمیت بوده و به عنوان یکی از ایمن‌ترین و مؤثرترین سیستم‌های حمل‌ونقل محسوب می‌گردد. بنابراین پیش از شروع احداث و بهره‌برداری، لازم است تا کلیه بسترهای آن در کشور مهیا شود.

پل‌ها از جمله مهم‌ترین قسمت‌های زیرساختی خطوط سریع‌السیر به خصوص داخل کلان‌شهرها و نیز مناطق کوهستانی به حساب می‌آید، بنابراین شناخت صحیح رفتار دینامیکی پل برای پیش‌بینی واقعی پاسخ سازه در برابر بارهای جدید، از جمله قطارهای سریع‌السیر، ضروری است و باعث رسیدن به یک طراحی

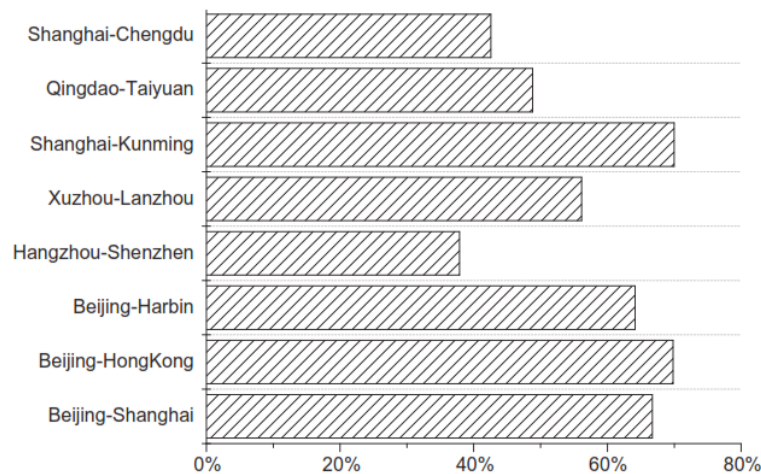
اقتصادی برای سازه‌های جدید یا شناسایی منطقی پل‌های در حال سرویس و تعمیر می‌شود. طراحی پل‌های خطوط سریع‌السیار در مقایسه با پل‌های عادی راه‌آهن، محدودیت‌های بیشتری از نظر سرویس‌دهی به لحاظ نیاز همواری خط و پایداری قطار می‌طلبد. با توجه به این‌که بار زنده پل‌های خطوط سریع‌السیار در حدود ۴۵ الی ۶۵ درصد بیشتر از پل‌های راه‌آهن معمولی است، در طراحی کنترل تغییرمکان در مقایسه با ظرفیت حمل بار از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. [۶-۱۱] به علاوه انتظار می‌رود پل‌ها دوام بیشتری، نگهداری کمتر، و ظاهری دلپذیرتری نیز داشته باشند.

در کشور چین نیز پل‌ها بیش از ۵۰ درصد از طول کلی خطوط سریع‌السیار را به خود اختصاص می‌دهند. دلیل استفاده‌ی این حجم از پل این است که پل‌ها از اختلال خط جدید با خطوط موجود جلوگیری کرده و همچنین فضای زمین را نیز کمتر اشغال خواهند کرد [۶]. شکل ۲-۲ درصد پل‌های موجود در روسازه خطوط سریع‌السیار اصلی کشور چین را نشان می‌دهد.

در این مطالعه سعی شده بندهای آئین‌نامه‌ی ایران در نظر گرفته شود و در صورت نیاز از آئین‌نامه اروپا نیز استفاده شده است. بارهای وارده بر پل‌های راه‌آهن از لحاظ بار محوری، سرعت و حجم ترافیک سالیانه متفاوت بوده و رفتار دینامیکی کاملاً متفاوتی در مقایسه با پل‌های جاده‌ای دارند. بحث اندرکنش دینامیکی پل-قطار از جمله مباحثی است که در دهه‌های اخیر توجه متخصصین و صاحب نظران مهندسی سازه و راه‌آهن را به خود معطوف کرده است. دینامیک پل‌های راه‌آهن به مطالعه تنش‌ها و تغییرشکل‌ها می‌پردازد. از مهمترین پارامترهایی که در تنش‌های دینامیکی پل‌های راه‌آهن مؤثرند می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

مشخصات فرکانسی سازه پل‌ها (طول، جرم و سختی اعضای آن)، مشخصات فرکانسی وسائط نقلیه (جرم‌های معلق و ثابت چرخ و محور، سختی فنرها)، ضریب میرایی پل‌ها و وسائط نقلیه، سرعت وسائط نقلیه، ناهمواری‌های خط و غیره. وسائط نقلیه نه تنها بارهای قائم را به پل‌ها وارد می‌سازد بلکه نیروهای طولی و عرضی ناشی از حرکت را نیز به پل‌ها وارد می‌کند. تحت اثر چنین نیروهایی، افزایش یا کاهش در تغییرشکل‌های پل در مقایسه با نیروهای استاتیکی بوجود می‌آید. در طراحی عملی چنین اثراتی به وسیله ضریب دینامیکی بیان می‌گردد.

احداث شبکه راه‌های ارتباطی و توسعه صنعت حمل‌ونقل، از مهم‌ترین عوامل پیشرفت اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی هر کشور می‌باشند. معمولاً در مسیر هر قطعه راه یا راه‌آهن، متناسب با شرایط منطقه تعدادی پل ساخته می‌شود که هزینه هر واحد طول آن‌ها به مراتب بیشتر از طول مشابه راه و یا راه‌آهن متصل به آن‌هاست. از این‌رو مطالعه دقیق رفتار پل‌ها در برابر انواع بارهای وارده از اهمیتی ویژه برخوردار است.



شکل ۲-۲: درصد پل‌های موجود در روسازه خطوط سریع‌السیر اصلی کشور چین [۶].

با توجه به اینکه کشور چین یکی از کشورهای پیشرو و مهم این صنعت می‌باشد، لذا معرفی مختصر در مورد سیستم خط آهن سریع‌السیر این کشور خالی از لطف نخواهد بود.

۲-۲- تاریخچه خطوط راه‌آهن سریع‌السیر کشور چین

گسترش خطوط سریع‌السیر کشور چین را می‌توان به پنج فاز تقسیم کرد [۱۱]:

۱. از اوایل سال ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۳، یک دهه امکان‌سنجی به جهت سیاسی از جانب وزارت راه‌آهن اسبق کشور چین.

۲. از سال ۱۹۹۴ تا ۱۹۹۷، یک دوره سه ساله مطالعات گسترده فنی توسط دانشگاه‌های مادر و آژانس‌های تحقیقاتی وابسته به وزارت اسبق راه‌آهن اسبق.

۳. از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲، یک سری مطالعات تجربی که بر روی خطوط سریع‌السیر نمونه انجام پذیرفت. او این خط سریع‌السیر، خط چین هوان دو^۱ به شِن یانگ^۲ در سال ۱۹۹۹ ساخته شد که دارای سرعت متوسط ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت بود.
۴. از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷، یک سری از مشخصات طراحی بر مبنای درس‌هایی که از تجربیات سرتاسر کشور و مشاوره جهانی آموخته‌شد، منتشر گردید.
۵. از سال ۲۰۰۸ تا به امروز، خطوط برجسته‌ای به اتمام رسیده و ساخت‌وسازهای در مقیاس بزرگ هنوز هم در حال ساخت می‌باشند. به عنوان مثال یک خط مسافری به طول ۱۱۳٫۵ کیلومتر که بیجینگ^۳ و تیانجین^۴ را به هم متصل می‌نماید برای بازی‌های المپیک ۲۰۰۸ با سرعت متوسط ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت افتتاح گردید. برای سال ۲۰۲۰، انتظار یک خط ۱۲۰۰۰ کیلومتری دور از ذهن نخواهد بود. این سیستم خط شامل چهار کریدور شمالی- جنوبی و چهار کریدور شرقی- غربی برای مرتفع کردن نیازهای این مناطق می‌باشد. شکل ۲-۳ سیستم شبکه خطوط ریلی سریع‌السیر این کشور تا سال ۲۰۲۰ را نشان می‌دهد.

^۱Qinhuangdao^۲Shenyang^۳Beijing^۴Tianjin



شکل ۲-۳: سیستم شبکه خطوط ریلی سریع‌السیر کشور چین تا سال ۲۰۲۰ [۱۱].

۳-۲- کلیات طراحی

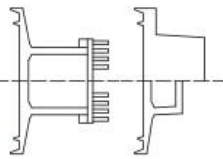
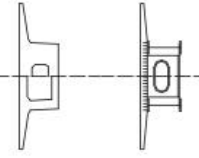
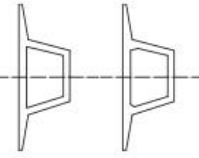
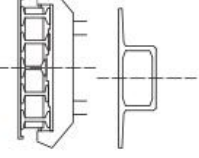
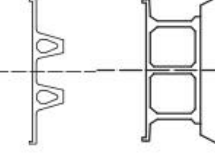
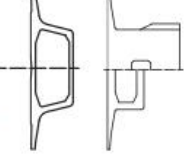
ساخت‌وساز سریع معمولاً در کنار یک طرح سازه‌ای معمول به جزئیات اجرایی و شیوه اجرا نیز نیازمند می‌باشد. در شکل ۲-۵ ویژگی‌های کلیدی مختلف طراحی پل‌های معمول خطوط سریع‌السیر موجود در شش کشور باهم مقایسه شده‌اند. در مشخصات طراحی پل‌های خطوط سریع‌السیر کشور چین، دهانه کوتاه به صورت یک پل تک‌دهانه‌ای کوچک‌تر از ۳۰ متر تعریف می‌شود. پل‌های رایج خطوط سریع‌السیر چین را دو نوع پل با تیر یکسره و تیر با تکیه‌گاه ساده تشکیل می‌دهند. طراحی و ساخت این دو نوع سازه‌ای، سالیان سال بهبود پیدا کرده و در نهایت به عنوان یک طرح صنعتی به بلوغ رسیده‌است. به عنوان یک نتیجه، پروسه طراحی و ساخت‌وساز سریع می‌تواند با استفاده از مجموعه‌ای کامل از طرح‌های ساخت، مراحل ساخت‌وساز و برنامه نگهداری به‌دست آید.

۴-۲- محدودیت‌های سرویس‌دهی

وزارت راه‌آهن اسبق چین براساس دروس آموخته‌شده از اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن‌ها (UIC) و موسسه آلمان (DIN) و در کنار تعداد زیادی از مطالعات تجربی دانشگاه‌های مادر کشور چین [۱۳ و ۱۴]، یک سری از مشخصات طراحی را برای استانداردسازی بیان نموده‌است. محدودیت‌های آستانی (محدودیت‌های بازه‌ای) برای پل‌های با روسازی بدون بالاست (بتنی) بیشتر از پل‌های با روسازی بالاستی می‌باشد، چرا که تنظیم صافی سطح روسازی عرشه بدون بالاست مشکل می‌باشد. محدودیت‌های سرویس‌دهی در طراحی پل‌های خطوط سریع‌السیر در شکل ۴-۲ آورده شده‌است.

| Contents | Ballast track | Ballastless track |
|--|---|--|
| Design life | 100 years | 100 years |
| Live load | ZK (0.8 UIC) | ZK (0.8 UIC) |
| Vertical deflection of beam (mm) | ≤ 2.0 | $L/1400$ (250 km/h) ~ $L/1600$ (350 km/h), $L \leq 40$ m $L/1400$ (250 km/h) ~ $L/1900$ (350 km/h), $40 \text{ m} < L \leq 80$ m $L/1000$ (250 km/h) ~ $L/1500$ (350 km/h), $L > 80$ m |
| Relative beam end vertical rotation in neighboring beams (%) | ≤ 0.4 | ≤ 0.2 (cantilever beyond support ≤ 0.55 m) ≤ 0.3 (0.55 m < cantilever beyond support ≤ 0.75 m) |
| Beam end horizontal rotation (%) | ≤ 0.1 | ≤ 0.1 |
| Lateral deflection of beam (mm) | $L/1400$ ($L \leq 80$ m) $L/1000$ ($L > 80$ m) | $L/1400$ ($L \leq 80$ m) $L/1000$ ($L > 80$ m) |
| Vertical deflection of track/3 m (mm) | 1.5 | 1.5 |
| Short-term substructure settlement (mm) | 30 | 20 |
| Uneven settlement between neighboring supports (mm) | 15 | 5 |
| Camber after laying track (mm) | 20 | 10 ($L \leq 50$ m) Min. ($L/5000$, 20) ($L \leq 50$ m) |

شکل ۴-۲: ضوابط سرویس‌دهی در پل‌های خطوط سریع‌السیر [۱۳ و ۱۴].

| | Japan | France | Germany | Spain | Italy | China |
|-------------------------------|---|---|---|--|---|---|
| Beam type by material | Reinforced concrete, prestressed concrete, steel-concrete hybrid, steel | Reinforced concrete, prestressed concrete, steel-concrete hybrid, steel | Prestressed concrete | Prestressed concrete, steel-concrete hybrid | Prestressed concrete, steel-concrete hybrid | Prestressed concrete |
| Typical cross-section diagram | T girder, box-girder  | Box-girder  | Box-girder  | T girder, box-girder  | Box-girder  | Box-girder  |
| Typical span | Simply supported: 24.2 m, 29.2 m, 34.2 m, 39.2 m and 44.2 m Continuous: (3 + 3 × 6 + 3) m, (4 - 5) × 8 m, (4 - 10) × 10 m, 5 × 15 m Rectangular wall or circular wall | Simply Supported: ≤25 m Continuous: 40-80 m | Simply Supported: 25 m, 44 m and 58 m | Simply Supported: 26.6 m Continuous: 45 m | Simply Supported: 24 m, 33.6 m, 43.2 m and 55.0 m | Simply Supported: 32 m Continuous: 40-100 m Round ended wall |
| Typical pier | Rectangular wall or circular wall | Rectangular wall or circular wall | Rectangular wall | Rectangular wall | Rectangular wall | Round ended wall |
| Typical foundation | Single pile, pile group and spread footing | Pile group Spread footing | Single pile Pile group Cantilever | Single pile Pile group Cantilever | Single pile Cantilever | Pile group Precast Cantilever |
| Typical construction method | Precast Cast-in-place | Precast Cantilever Cast-in-place | Cast-in-place Launching | Cast-in-place Launching | Cast-in-place Launching | Precast Cantilever |

شکل ۲-۵: مقایسه ویژگی‌های کلیدی پله‌ای خطوط راه‌آهن پرسرعت شش کشور [۱۲].

چهارمورد از نگرانی‌های به‌وجود آمده و تأثیرگذار در پارامترهای کلیدی طراحی عبارت‌است از:

- ۱- تغییرشکل قائم تیر که می‌تواند باعث ایجاد نوسانات بزرگ قطار سریع‌السیر شود [۱۶ و ۱۵].
- ۲- دوران انتهایی تیر که می‌تواند باعث ناپایداری خط گردد [۱۷ و ۱۸].
- ۳- تغییرشکل‌های طولانی مدت که می‌تواند باعث ایجاد سطح ناهموار خط شده و عملکرد قطارهای سریع‌السیر را به خطر بیاندازند [۱۹ و ۲۰].
- ۴- تغییرشکل طولی زیرسازه که به جهت کنترل رفتار غیرخطی بین خط پیوسته، روسازه پل و همچنین اطمینان از پایداری خط به کار می‌رود [۲۱-۲۳].

یک سری از ضوابط دینامیکی نیز توسط مشخصات طراحی به منظور اطمینان از پایداری قطار ایجاد شده‌است که در شکل ۲-۶ نشان داده شده‌است.

| Contents | Criteria |
|---|---|
| Fundamental frequency of simple beam (Hz) | $>80/L_\varphi$ ($L_\varphi \leq 20$ m) $>23.58L_\varphi^{-0.592}$ (20 m $\leq L_\varphi \leq 96$ m) |
| Derailed coefficient | ≤ 0.8 |
| Wheel loading reducing rate | ≤ 0.6 |
| Peak acceleration (g) | 0.35 (Ballast track) 0.5 (Ballastless track) |
| Vehicle vertical acceleration (g) | ≤ 0.13 |
| Vehicle transverse acceleration (g) | ≤ 0.10 |
| Sperling's ride index | ≤ 2.5 (very good) 2.5-2.75 (good) 2.75-3.0 (satisfactory) |

شکل ۲-۶: ضوابط طراحی دینامیکی برای پل‌های خطوط سریع‌السیر [۱۴].

زمانی که فرکانس اصلی یک سازه کمتر از مقادیر مجاز باشد، در آنالیزهای عددی کوپل قطار- سازه پارامترهای دیگر جدول ۲-۳ همچون ایمنی قطار در سرعت‌های بالا مورد بررسی قرار می‌گیرند. ضریب خروج از خط، یکی دیگر از پارامترهای عمومی اندازه‌گیری پایداری چرخ‌های وسیله نقلیه ریلی می‌باشد [۱۴]. نرخ کاهش بارگذاری چرخ برای کنترل نیروی نامناسب چرخ‌های طرفین قطار سریع‌السیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عبارتی همه این پارامترها برای ارزیابی کیفیت سواری و راحتی سفر وسایل نقلیه ریلی به کار می‌روند. پس به‌طور کلی، سه مورد از مهمترین محدودیت‌ها در طراحی پل‌های خطوط سریع‌السیر سختی قائم، دوران انتهایی تیر و سختی طولی پایه‌ها می‌باشند.

۲-۵- روسازی‌های متداول

عمده سازه‌های استفاده‌شده برای این منظور، دو نوع عرشه می‌باشد. در اوایل ۱۹۹۰، وزارت راه‌آهن اسبق چین پروژه همه‌جانبه و متعددی بر روی ده نوع پل مختلف [۲۴] آغاز نمود که شامل پل تیری با تکیه‌گاه ساده (۲۴ و ۳۲ متری)، پل با تیر یک‌سره (۲×۲۴ متر، ۳×۲۴ متر، ۲×۳۲ متر و ۳×۳۲ متر، که هر دو از تیرهای با تکیه‌گاه ساده و درجا تشکیل شده‌اند)، می‌باشد. آزمایش‌های تجربی و آنالیزهای عددی بسیار گسترده در کنار ارزیابی‌های اقتصادی برای شناسایی بهترین نوع سازه از نظر اقتصادی و سازه‌ای انجام شد [۶ و ۲۴]. نتایج حاصله نشان دادند که پل‌های تیری با تکیه‌گاه ساده بهترین گزینه برای ساخت‌وساز بزرگ و حجیم می‌باشد. سپس دو نوع پل تیری با تکیه‌گاه ساده با طول‌های ۲۴ و ۳۲ متر در مقیاس واقعی و بر روی خطوط آزمایشی سریع‌السییر مورد مطالعه تجربی قرار گرفته و در نهایت این نوع از تیرهای با تکیه‌گاه ساده به طور کامل مورد قبول واقع شده و به طور گسترده در ساخت خطوط سریع‌السییر مورد استفاده قرار گرفتند. (لازم به یادآوری می‌باشد که پل مورد استفاده این تحقیق نیز پل تیری با تکیه‌گاه ساده و طول دهانه ۲۴ می‌باشد).

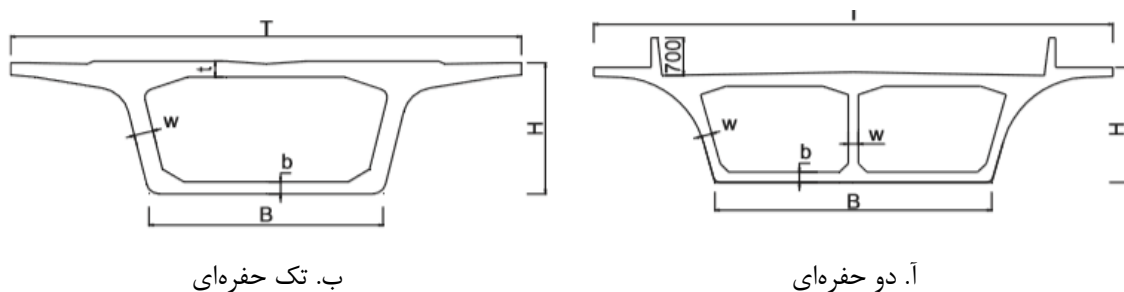
۲-۵-۱- تیر با تکیه‌گاه ساده

تیر با تکیه‌گاه ساده می‌تواند بر اساس سرعت طراحی، نوع خط، دهانه اصلی و تراز قرارگیری نیز تقسیم گردد. دسته‌بندی تیر با تکیه‌گاه ساده در پل‌های خطوط سریع‌السییر در شکل ۲-۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۷: دسته‌بندی تیر با تکیه‌گاه ساده در پل‌های خطوط سریع‌السییر [۲۴].

مقطع جعبه‌ای تک حفره‌ای برای کلیه خطوط مسافربری سریع‌السیر و کمتر برای خطوط مختلط باری- مسافری استفاده می‌شود. حال آن‌که انواع مقطع جعبه‌ای دو حفره‌ای بیشتر برای خطوط داخل شهر استفاده می‌گردد. مطالعات تجربی و عددی گسترده‌ای برای رسیدن به این ساختار بندی به انجام رسیده‌است. به عنوان مثال مقطع عرضی این نوع از پل دارای عرض ۳,۱۴ متر بر روی خطوط آزمایشی با سرعت ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد که در سال ۲۰۰۸ به اتمام رسیده‌است، همانند قطعه بیجینگ- تیانجین و بخش ووهان- گووانگژو. در سال ۲۰۰۸، حذف خطوط نگهداری بال‌های کناری عرض عرشه به میزان ۱۲ متر کاهش داد؛ چراکه قطارهای سریع‌السیر ممکن است مسئله ایمنی برای مهندسی نگهداری ایجاد کند [۲۵] (فراهم نمودن ایمنی قطارهای سریع‌السیر مهم‌تر و حساس‌تر از قطارهای عادی می‌باشد). دو نوع مقطع عرضی معمول برای تیرهای با تکیه‌گاه ساده در شکل ۲-۸ نشان داده شده‌است.



ب. تک حفره‌ای

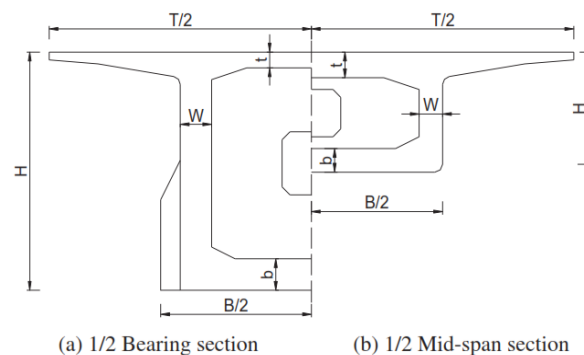
آ. دو حفره‌ای

| Section Type | Width (mm) | 350 km/h | | 250 km/h | |
|----------------|------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| | | Ballast | Ballastless | Ballast | Ballastless |
| (a) Single Box | T | 12600 | 12000 | 13000 | 11600 |
| | B | 5500 | 5500 | 5740 | 5300 |
| | H | 3072 | 3078 | 2700 | 2700 |
| | t | 384 | 300 | 340 | 285 |
| | b | 280 | 280 | 300 | 280 |
| | w | 450 | 450 | 475 | 450 |
| (b) Double Box | Item | 250 km/h | | | |
| | (mm) | Ballast | | Ballastless | |
| | T | 12200 | | 11600 | |
| | B | 6500 | | 6500 | |
| | H | 2700 | | 2700 | |
| | t | 240 | | 240 | |
| | b | 240 | | 240 | |
| w | 240 | | 240 | | |

شکل ۲-۸: مقطع عرضی متداول تیر با تکیه‌گاه ساده در خطوط سریع‌السیر کشور چین [۲۵].

۲-۵-۲- تیر یک سره

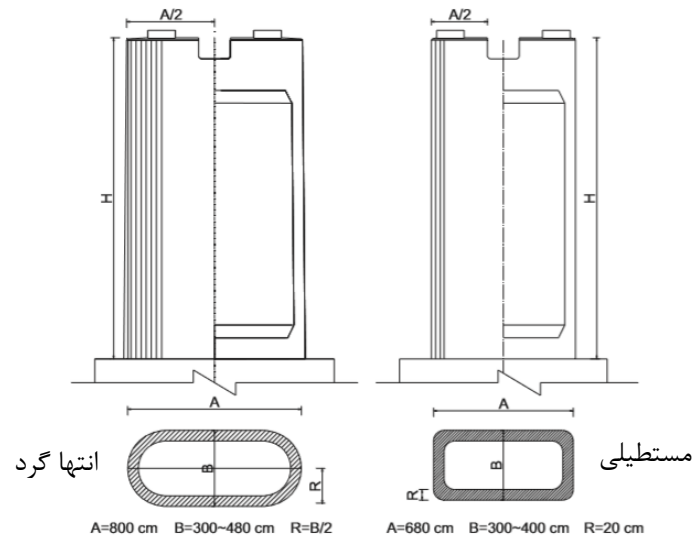
پل‌های با تکیه‌گاه یک سره از جمله مورد بعدی در ساخت و ساز سریع برای راه آهن سریع السیر می‌باشد که می‌تواند دارای عمق ثابت و یا متغیر باشد (شکل ۲-۹). تیرهای با عمق ثابت معمولاً از دوبا سه دهانه تشکیل شده و تیرهای یک سره با عمق متغیر معمولاً شامل دو یا سه دهانه می‌باشند. اما این نوع از پل‌ها تنها مناسب مکان‌هایی است که نشست پایه دارای حساسیت کم بوده و یا برای اتصال قطعات بین پل‌ها و تونل‌ها به کار گرفته شود. تیرهای یک سره با عمق متغیر بیشتر در دهانه‌های اصلی با طول ۴۸، ۵۶، ۶۴، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۸ متر مورد استفاده قرار گرفته است [۶]، حال آن‌که ترتیب استفاده از دهانه (۳۲+۴۸+۳۲ متر) بسیار در طراحی تیرهای یک سره رایج تر می‌باشد. به عنوان مثال این گونه دهانه بندی بیش از ۳۰ درصد از ۲۹۱ تیر یک سره استفاده شده در بخش بیجینگ- شاهنگهای را تشکیل می‌دهد.



شکل ۲-۹: تیرهای یک سره متداول با عمق متغیر در خطوط سریع السیر کشور چین [۱۲].

۲-۶- زیرسازه‌های مرسوم (پایه‌های متداول)

پایه‌های مرسوم برای تیرهای با تکیه‌گاه ساده و تیرهای یک سره بر اساس مقطع عرضی شامل دور گرد، گرد، مستطیلی و مستطیلی دوبر تقسیم می‌گردد [۲۶ و ۲۷]. پرکاربردترین شکل مورد استفاده برای پایه‌ها دو نوع دور گرد و مستطیلی بوده که پایه‌های پل مورد بحث نیز از نوع دور گرد می‌باشد (شکل ۲-۱۰). انتخاب شالوده پل راه آهن سریع السیر در ابتدا بستگی به نوع خاک محل پروژه دارد. گذشته از نیازهای مقاومت و پایداری باید توجه‌های ویژه به نشست‌های نامتقارن شالوده به منظور نیازهای همواری پل‌های راه آهن سریع السیر انجام پذیرد.



شکل ۲-۱۰: دو نوع از پایه‌های متداول در خطوط سریع‌السیر کشور چین [۲۸].

۲-۷- روش‌های معمول ساخت

روش‌های ساخت‌وساز متنوعی بر اساس چالش‌های به وجود آمده در محل ساخت پروژه‌ها تعریف و توسعه داده شده‌اند (شکل ۲-۱۱: ب و ج). تیرهای با تکیه‌گاه ساده معمولاً در کارخانه‌های محلی به صورت پیش‌ساخته تولید می‌شوند. این کارخانه‌ها می‌توانند در هر ۲۸ الی ۴۰ کیلومتر قرار گرفته و همزمان پروسه ساخت‌وساز را حمایت نمایند. سپس تیرها به وسیله ماشین‌های نصب در محل خود قرار داده‌شوند. (شکل ۲-۱۱: آ) دمای سطح تیر در زمان ساخت و عمل‌آوری باید کمتر از 60°C بوده و اختلاف دمای درون و بیرون باید کمتر از 15°C باشد.



آ. پیش‌ساخته و نصب



ب. ماشین نصب متحرک

ج. درجا

شکل ۲-۱۱: ساخت‌وساز تیر با تکیه‌گاه ساده در پل‌های خطوط سریع‌السیر کشور چین [۲۹].

گزینه‌های متعدد برای ساخت پل‌های راه‌آهن سریع‌السیر شامل روش طره، روش درجا، روش انتقالی و دورانی قابل دسترس می‌باشند (شکل ۲-۱۲: آ، ب و ج). تیرهای با عمق یکنواخت معمولاً با روش ساخت درجا یا روش انتقالی ساخته می‌شوند. روش ساخت درجا یک شیوه مقرون به صرفه بوده که مناسب برای پل‌های با فاصله کم در زمین‌های هموار با شرایط خاک خوب می‌باشد؛ حال آن‌که روش انتقالی نیز زمان ساخت‌وساز را با نصب شاه‌تیرهای پیش‌ساخته کاهش می‌دهد. ساخت‌وساز هر سازه با ساخت تیرهای با تکیه‌گاه ساده دابل آغاز شده و سپس به سیستم پیوسته متصل می‌گردد. روش طره نیز به وفور برای تیرهای با عمق متغیر استفاده می‌گردد چرا که دارای مزیت‌های نسبی درمقایسه با روش‌های دیگر از نظر راحتی ساخت‌وساز در محل می‌باشد [۲۹]. در موارد مخصوص روش دورانی برای پل‌های بر روی دره‌ها، رودخانه‌ها و خطوط با عرض زیاد استفاده می‌گردد.



آ. روش درجا



ب. روش طره



ج. روش دورانی

شکل ۲-۱۲: روش‌های ساخت متداول برای تیرهای یک سره در خطوط سریع‌السیر [۲۹].

۲-۸- فرکانس طبیعی پل‌های راه‌آهن

مهم‌ترین مشخصه دینامیکی پل‌های راه‌آهن فرکانس‌های طبیعی آن‌ها می‌باشد که در واقع حساسیت پل‌ها را به بارهای دینامیکی نشان می‌دهد.

فرکانس‌های طبیعی به وسیله تعداد ارتعاشات در واحد زمان اندازه‌گیری می‌شوند و واحد آن هرتز (Hz) می‌باشد که نشان‌دهنده تعداد سیکل‌های به وجود آمده در ثانیه می‌باشد. سیستم‌های مکانیکی با جرم گسترده دارای بی‌نهایت فرکانس طبیعی هستند و تنها کوچکترین فرکانس دارای کاربرد عملی است. اگر نیروهای محرک وارد بر سیستمی حاوی یک طیف فرکانس باشد، سازه تنها فرکانس‌های نزدیک به فرکانس طبیعی خود را انتخاب کرده و نسبت به آن‌ها عکس‌العمل نشان می‌دهد و این نشان‌دهنده این است که مهم‌ترین مشخصه دینامیکی یک سازه فرکانس طبیعی آن می‌باشد [۳۰].

۲-۹- میرایی پل‌های راه آهن

میرایی خاصیتی مطلوب و پسندیده برای مواد ساختمان و سازه می‌باشد که در اکثر حالات پاسخ دینامیکی را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود پل پس از عبور وسیله نقلیه یا هر محرک دیگری به وضعیت تعادل خود برسد. دلایل فیزیکی میرایی بسیار پیچیده می‌باشد. در حین ارتعاشات انرژی از حالتی به حالت دیگر تغییر می‌یابد. (انرژی پتانسیل به انرژی سینماتیکی و بالعکس) و قسمتی از انرژی به وسیله تغییر شکل‌های پلاستیک مواد از بین رفته و یا به حالت دیگر هم‌چون حرارتی، آکوستیک و غیره تغییر می‌یابد. در این راه، انرژی به وجود آمده از عبور وسیله نقلیه در محیط پراکنده می‌شود.

منشاء میرایی سازه‌های پل‌ها هم داخلی و هم خارجی است. منابع داخلی میرایی شامل اصطکاک داخلی لزجی مواد ساختمان که در طول تغییر شکل به وجود می‌آید، خواص غیرهمگن مواد، ترک‌ها و غیره می‌باشد. منابع خارجی میرایی پل شامل اصطکاک نشیمن گاه‌ها و تکیه گاه‌ها، اصطکاک روسازی راه خصوصاً بالاست، اصطکاک در اتصالات سازه، مقاومت آیرودینامیکی سازه، خواص ویسکوالاستیک خاک‌ها و سنگ‌های زیر و یا کنار پایه‌های پل و غیره می‌باشد.

بدیهی است که تعداد منابع میرایی ارتعاشات پل‌های راه آهن زیاد است و به حساب آوردن تمامی آن‌ها در محاسبات مهندسی غیرممکن است. میرایی بستگی به جنس سازه (فولادی، بتنی مسلح، بتنی پیش‌تنیده) و وضعیت سازه (وجود ترک، بالاست و غیره) دارد. همچنین بزرگی میرایی بستگی به دامنه ارتعاشات دارد. معمولاً مؤلفه ارتعاشات تحمیلی با نیروهای خارجی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بزرگتر از ارتعاشات پل‌ها پس از عبور وسیله نقلیه از پل می‌باشد. بدین ترتیب، میرایی در حوزه فرکانس‌های پایین (تا ۵۰ هرتز) بستگی کمی به فرکانس ارتعاش دارد و این محدوده‌ای است که اغلب پل‌های راه آهن در آن ارتعاش می‌کنند [۳۰].

۲-۱۰- تأثیر سرعت وسیله نقلیه در پاسخ دینامیکی پل‌ها

سرعت وسائط نقلیه مهم‌ترین پارامتر مؤثر در تنش‌های دینامیکی پل‌های راه آهن می‌باشد. در کل، تنش‌های دینامیکی در پل‌ها با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. اداره تحقیق و آزمایشات (URE) اتحادیه جهانی راه‌آهن‌ها (UIC)، برنامه‌های تحقیقاتی متعددی را در این زمینه با بررسی تنش‌ها، خستگی، سروصدا و

اثراتش بر راحتی انسان، انجام داده است. همچنین راه‌آهن ملی ژاپن پل‌های خود را تحت سرعت‌های بالا مورد آزمایش قرار داده است [۳۰].

۲-۱۱- مشخصات مسأله دینامیکی

حل دینامیکی این‌گونه مسائل نسبت به مدل استاتیکی مشابه عموماً سخت‌تر و پیچیده‌تر می‌باشد. در این نوع از مسائل بزرگی، جهت و موقعیت بارهای دینامیکی با زمان تغییر می‌کند که در نتیجه پاسخ سازه نسبت به بار متحرک نیز نسبت به زمان تغییر می‌کند. در مسائل دینامیکی نیروهای اینرسی و میرایی، به نیروهای به‌وجود آمده در اثر سختی سازه که در حالت استاتیکی مد نظر قرار دارند اضافه می‌شوند. نیروی اینرسی در واقع نیروی مقاومی است که در اثر شتاب وارده به سازه به‌وجود می‌آید. اگر نیروهای اینرسی به عنوان بخشی از کل نیرو در محاسبات در نظر گرفته شوند، بدان معنی است که تحلیل دینامیکی صورت گرفته‌است و اگر نیروی اینرسی آنقدر کوچک باشد که بتوان از آن صرف‌نظر کرد، می‌توان مسأله را به صورت استاتیکی در نظر گرفت، اگرچه بار خارجی و پاسخ سازه نسبت به زمان متغیر باشد.

۲-۱۲- پدیده تشدید در پل‌های راه‌آهن

تحلیل دینامیکی پل در مواردی که امکان رخ‌دادن پدیده تشدید می‌باشد، ضروری است. رزونانس یا تشدید پدیده مخربی است که در سرعت‌های بالا و در اثر تکرار بار چرخ در فواصل زمانی منظم رخ می‌دهد. در پدیده تشدید ارتعاشات بیش از حد مجاز عرشه ممکن است موجب از بین رفتن تماس بین چرخ و ریل، ناپایداری لایه بالاست، پیدایش ترک و خرد شدگی در بتن و افزایش تنش در المان‌های سازه پل گردد. برای طراحی پل‌های راه‌آهن سریع‌السير اثرات دینامیکی شامل پدیده تشدید باید مورد توجه قرار بگیرند. عموماً در سرعت‌های کمتر از ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت امکان وقوع رزونانس کم بوده و نیاز به در نظر گرفتن آن نیست. ماکزیمم پاسخ‌های دینامیکی در سرعت‌هایی که تشدید رخ می‌دهد، ایجاد می‌شود. رزونانس زمانی ایجاد می‌شود که فرکانس بارگذاری به فرکانس طبیعی سازه نزدیک شود. با افزایش سرعت عبور قطار از روی پل فرکانس تحریک بار به فرکانس طبیعی یکی از مدهای ارتعاشی پل نزدیک می‌شود. وقتی که تشدید رخ

می‌دهد مقادیر پاسخ دینامیکی به شدت افزایش می‌یابد. تعداد بارهای عبوری با فاصله یکسان، میرایی سازه، فواصل بارها، سرعت عبور و مشخصات سازه در وقوع تشدید و مقادیر پاسخها تأثیر دارد. مخصوصاً مقادیر پاسخها در نقاط پیک بسیار متأثر از مقدار میرایی سازه می‌باشد. هر چه میرایی سازه کمتر باشد، مقادیر جوابها در پیک بزرگتر خواهد بود. در این مواقع بررسیها و تحلیل‌های دقیق مورد نیاز می‌باشد [۳۴]، [۳۵].

۲-۱۳- ضریب تأثیر دینامیکی

پاسخ دینامیکی سازه عموماً با ضرایبی به نام ضریب تأثیر دینامیکی ارائه می‌شود. این ضریب در واقع نسبت پاسخهای سازه در حالت تحلیل دینامیکی به حالت استاتیکی را نشان می‌دهد. عموماً پاسخها در حالت دینامیکی در مقایسه با بارهای استاتیکی افزایش می‌یابد. اکثراً ضریب تأثیر را به عنوان نسبت پاسخهای ماکزیمم تعریف می‌کنند.

$$DAF = \left(\frac{(R_d)_{max}}{(R_s)_{max}} \right) \quad (۲-۴)$$

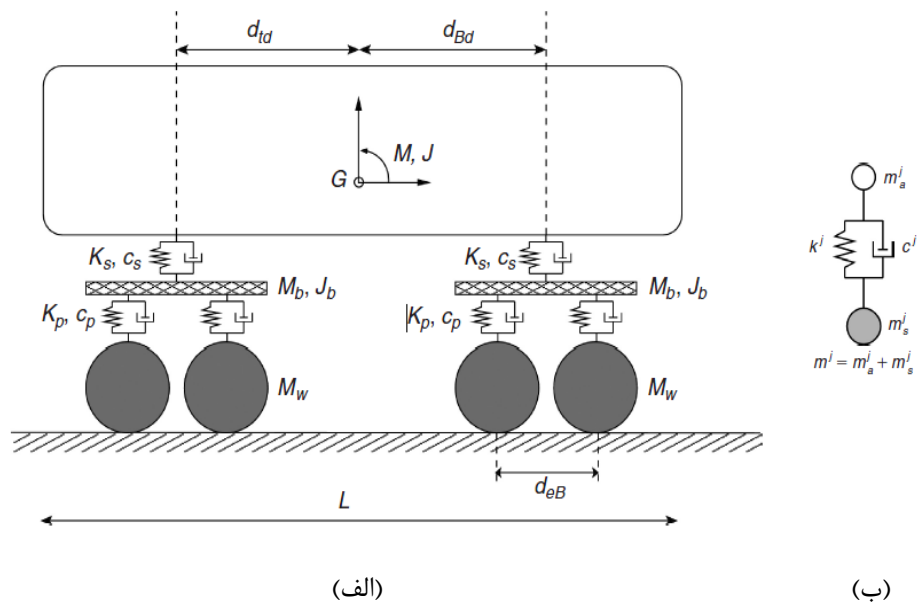
که در رابطه فوق DAF ضریب تأثیر دینامیکی، $(R_d)_{max}$ ماکزیمم پاسخ دینامیکی سازه و $(R_s)_{max}$ ماکزیمم پاسخ سازه در حالت استاتیکی نشان می‌دهد.

در گذشته جهت طراحی پل‌های راه‌آهن در آیین‌نامه‌ها و استانداردهای طراحی پل از همین ضرایب تأثیر دینامیکی استفاده می‌شد. اگرچه استفاده از این ضرایب می‌تواند طراحی را بسیار ساده و کم‌هزینه کند اما نمی‌تواند تمام پارامترهای مؤثر بر پاسخ دینامیکی سازه را در نظر بگیرد. برای به دست آوردن رفتار واقعی و دقیق‌تر از پل‌های راه‌آهن سریع‌السیار باید از تحلیل دینامیکی با استفاده از نرم‌افزارهای اجزا محدود بهره برد تا بتوان تمام اثرات دینامیکی بر روی یک پل خاص را بررسی کرد [۳۴]، [۳۵].

۲-۱۴- تحلیل دینامیکی با در نظر گرفتن اندرکنش پل و قطار

اگر بخواهیم مدلی ارائه کنیم که به واقعیت نزدیک‌تر باشد باید به گونه‌ای باشد که اثر تغییر شکل‌های پل بر روی واگن عبوری و همچنین تأثیر مشخصات دینامیکی واگن بر معادلات دینامیکی حاکم بر مسئله را در نظر

بگیرد. در این روش دیگر قطار با یک سری بار با مقدار ثابت مدل نمی‌شود بلکه مجموعه‌ای از جرم‌های نقطه‌ای شامل بدنه، بوژی و محورها، فنرها و میراگرهایی که در اتصالات بدنه به بوژی و بوژی به محور چرخ‌ها وجود دارند می‌باشد. یک مدل کلی از واگن سنتی چهار محوره در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده‌است. واگن شامل سیستم تعلیق اولیه با سختی و میرایی K_p و C_p ، سیستم تعلیق ثانویه با سختی و میرایی K_s و C_s ، جرم چرخ‌ها M_w ، جرم بوژی M_b و J_b ، جرم بدنه واگن M و J می‌باشد.



شکل ۲-۱۳: الف) مدل کامل اندرکنش پل و قطار، ب) مدل ساده‌شده اندرکنش.

البته همیشه نیاز نیست مدل با تمام جزئیات بالا ارائه گردد، همان‌طور که در شکل ۲-۱۳ (ب) دیده می‌شود، می‌توان از یک مدل ساده‌تر که برای هر چرخ فقط سیستم تعلیق اولیه و جرم معادل معلق و غیرمعلق استفاده کرد.

۲-۱۵- روسازی نردبانی^۱

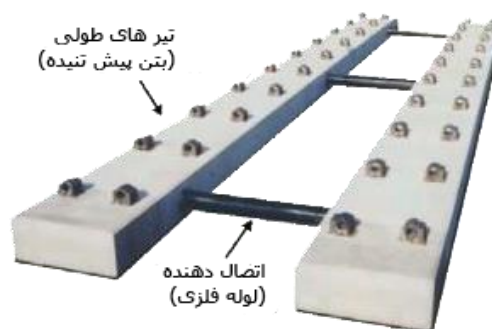
تراورس‌ها، دال‌ها، سیستم اتصالات ریل نقشی بسیار مهم در اندرکنش بین ریل‌ها و بستر ایفا می‌کنند. عواملی مانند ایمنی خط، اقتصادی بودن طرح در هنگام دوره‌های ساخت و تعمیر و نگهداری و آلودگی

^۱Ladder Track

محیط زیست از جهاتی مانند آلودگی صوتی و ارتعاشی در انتخاب یک سیستم بهینه تأثیرگذار می‌باشد. سیستم روسازی نردبانی که نوآوری جدیدی در مقایسه با روسازی‌های معمول بالاستی به‌شمار می‌رود که در آن از یک تراورس نردبانی استفاده می‌شود که اثرات بسیار عمده‌ای در بهبود موارد بالا را دارد [۳۸].

۱۶-۲- ساختار تراورس نردبانی

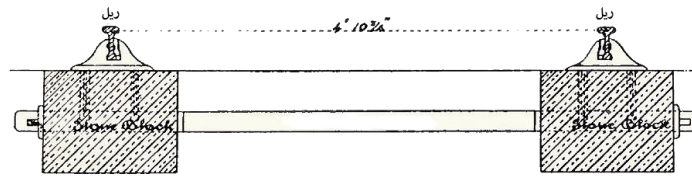
همان‌گونه که در شکل ۱۴-۲ مشاهده می‌شود، تراورس نردبانی از دو تیر طولی پیش‌تنیده بتنی و لوله‌های فلزی عرضی اتصال‌دهنده تشکیل شده‌است. ضمناً تراورس‌های نردبانی دارای طول‌های مشخصی مانند ۶، ۹، ۱۲ متر می‌باشند.



شکل ۱۴-۲: سیستم تراورس نردبانی [۳۸].

لوله‌های عرضی اتصال‌دهنده که همان لوله‌های فلزی با ضخامت ورق بالا^۱ هستند، تیر طولی بتنی را به صورت اتصالی صلب به تیر طولی بتنی موازی با آن‌ها متصل می‌کنند. با قرار دادن لوله‌های فلزی عرضی بین کابل‌های پیش‌تنیده‌ای^۲ که نزدیک به سطح بالا و پایین تیرهای طولی وجود دارند، این اتصالات صلب ایجاد می‌گردند. در ادامه میلگردهای کافی در داخل تیرهای پیش‌تنیده طولی و در محل اطراف لوله‌های فلزی عرضی قرار داده می‌شود و بتن با مقاومت بالا ریخته می‌شود تا یکپارچگی کامل ایجاد شود. در شکل ۱۵-۲ نحوه اتصال لوله‌های عرضی فلزی به تیرهای بتنی طولی نشان داده شده‌است.

^۱Thick- Walled
^۲Prestressing Strands



شکل ۲-۱۵: نحوه اتصال لوله فلزی عرضی به تیر بتنی طولی در تراورس نردبانی [۳۸].

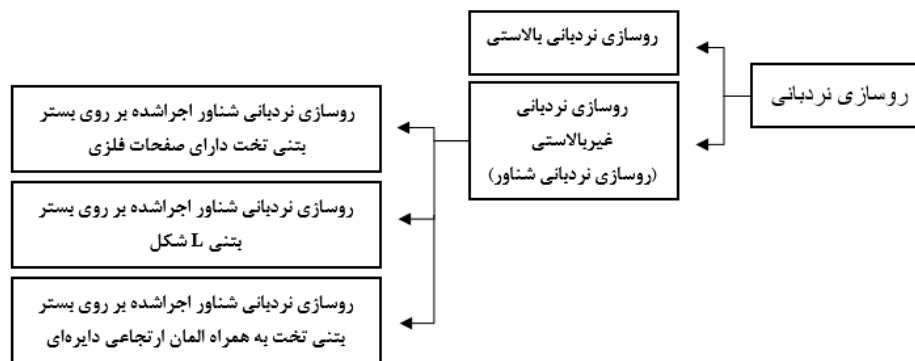
البته این سیستم اتصالات عرضی در برخی از موارد می‌تواند دارای تنوع بیشتری باشد که در ادامه توضیحات مفصل‌تری در رابطه با آن‌ها داده می‌شود. حال اگر در یک سیستم روسازی به‌جای استفاده از تراورس‌های معمولی^۱ از تراورس‌های نردبانی استفاده گردد، به آن سیستم روسازی سیستم روسازی نردبانی اطلاق می‌گردد [۳۸].

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، در این تحقیق از سه نوع روسازی نردبانی، دال‌خط بتنی و بالاستی استفاده شده‌است. ولی با توجه به محوری بودن موضوع سیستم روسازی نردبانی، مختصراً به توضیح این نوع روسازی می‌پردازیم.

۲-۱۷- سیستم روسازی نردبانی

به دلیل استفاده از تراورس نردبانی در روسازی نردبانی، در مقایسه با روسازی‌هایی که از تراورس‌های معمولی استفاده می‌کنند، توزیع بار بسیار بهتری صورت می‌گیرد و در واقع تمام بستر به‌صورت یکنواخت تحت اثر بار قرار می‌گیرد. در واقع مفهوم اساسی سازه‌ای روسازی نردبانی از ترکیب قرار گرفتن ریل‌های فلزی بر روی تیرهای بتنی طولی تشکیل شده‌است. یکی از مهمترین و بارزترین امتیاز روسازی نردبانی، افزایش صلبیت و پایداری سازه خط در مقابل کمانش‌های جانبی خط حتی در قوس‌های شدید و سرعت‌های بالا می‌باشد. الگوریتم اراخ شده در شکل ۲-۱۶، انواع روسازی‌های نردبانی استفاده شده در دنیا را دسته‌بندی کرده‌است. در ادامه توضیحاتی نیز داده شده‌است.

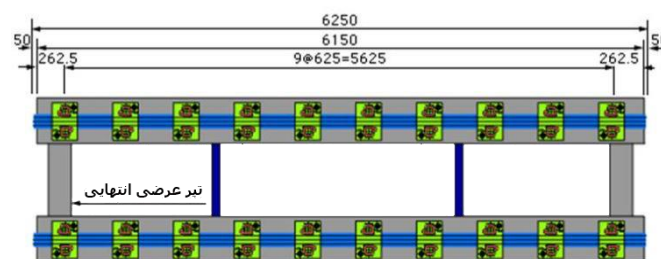
^۱Crosstie



شکل ۲-۱۶: انواع سیستم روسازی نردبانی [۳۸].

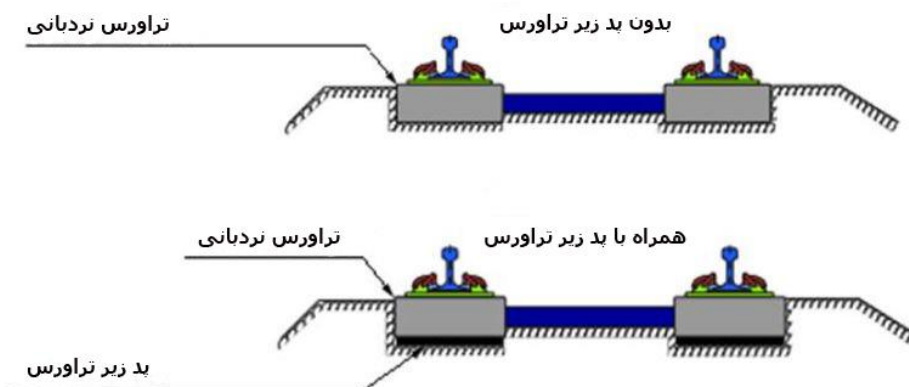
۲-۱۷-۱- روسازی نردبانی بالاستی

زمانی که خط تحت بهره‌برداری قرار گرفته، از قرار گرفتن تراورس نردبانی بر روی بالاست ایجاد شده باشد به این سیستم، روسازی نردبانی بالاستی گفته می‌شود. همان‌گونه در بخش قبل بدان اشاره شد، تراورس نردبانی دارای طول مشخص می‌باشد. در روسازی‌های نردبانی بالاستی در ابتدا و انتهای هر تراورس نردبانی، تیرهای بتنی در راستای عرضی به‌عنوان تیرهای انتهایی اجرا می‌شود. در شکل ۲-۱۷ نمونه‌ای از تراورس نردبانی طراحی شده به همراه تیرهای عرضی بتنی و انتهایی مشاهده می‌شود [۳۸].



شکل ۲-۱۷: تیرهای عرضی بتنی اجرا شده در انتهای تراورس نردبانی [۳۸].

روسازی نردبانی بالاستی به دو صورت کلی می‌تواند اجرا شود. مطابق شکل ۲-۱۸، در حالت عادی در زیر تیرهای طولی بتنی هیچ‌گونه پدی استفاده نمی‌شود، ولی به منظور کاهش میزان ارتعاشات منتقل‌شده می‌توان در زیر تیرهای طولی بتنی از لایه‌های لاستیکی (پد) استفاده شود.



شکل ۲-۱۸: استفاده از پد در زیر تیرهای طولی بتنی در روسازی نردبانی بالاستی [۳۸].

به دلیل کاهش بار دینامیکی انتقال یافته به بالاست در روسازی بالاستی هزینه‌های نگهداری در مقایسه با روسازی بالاستی معمولی به شدت کاهش می‌یابد. تحت یک سری آزمایشات، ثابت شده‌است که اگر یک قطار باری با وزن بالا و سرعت مشخص از روی یک خط بالاستی معمولی و یک خط بالاستی نردبانی عبور کند، تحت تعداد عبورهای یکسان، زمانی که خط بالاستی معمولی نیاز به پنج بار زیرکوبی دارد خط بالاستی نردبانی به هیچ‌گونه زیرکوبی نیاز ندارد و تیرهای بتنی طولی آن هیچ‌گونه ترکی به چشم نمی‌خورد. به عنوان یک گزینه دیگر باید عنوان کرد که زمانی از روسازی بالاستی معمولی استفاده می‌شود می‌بایست که در محل‌های نزدیک به دهانه پل‌ها سختی خط به طور نسبی افزایش یافته و در واقع یک ناحیه انتقال^۱ ایجاد شود. اما با استفاده از روسازی نردبانی بالاستی دیگر نیازی به ایجاد ناحیه انتقال نمی‌باشد. همان‌گونه که در قبل بدان اشاره شد، افزایش مقاومت جانبی خط در روسازی نردبانی بالاستی در مقایسه با روسازی بالاستی معمولی از ویژگی‌های بسیار بارز آن می‌باشد. نمونه‌هایی از روسازی‌های نردبانی بالاستی اجرا شده در شکل ۲-۱۹ مشاهده می‌شود [۳۸].

^۱Transient Zone



شکل ۲-۱۹: روسازی نردبانی بالاستی [۳۸].

۲-۱۷-۲- روسازی نردبانی بدون بالاست

سیستم روسازی نردبانی بدون بالاست بیشتر به عنوان سیستم روسازی نردبانی شناور^۱ شناخته می‌شود (شکل ۲-۲۰). این سیستم روسازی می‌تواند در حالت‌های مختلفی طراحی و اجرا می‌شود. از امتیازات عمده این سیستم می‌توان به کاهش شدید میزان ارتعاشات ایجاد شده^۲، افزایش سرعت ساخت، کاهش هزینه ساخت و همچنین در مواردی خاص کاهش وزن سازه خط^۳ اشاره کرد. در واقع علت کاهش شدید میزان ارتعاشات در این سیستم، قرار دادن یک سری المان‌های ارتجاعی^۴ در فواصل مشخص و ثابت از یکدیگر در زیر تیرهای طولی تراورس‌های نردبانی می‌باشد. در حقیقت با استفاده از این مکانیزم تراورس نردبانی فقط از طریق یک‌سری میراکننده با میرایی زیاد و سختی کم به بستر سازه خط متصل می‌شوند و باعث کاهش شدید میزان ارتعاشات می‌شود [۳۸].



شکل ۲-۲۰: روسازی نردبانی شناور [۳۸].

^۱Floating Ladder Track

^۲Vibration Proof

^۳Light Weight

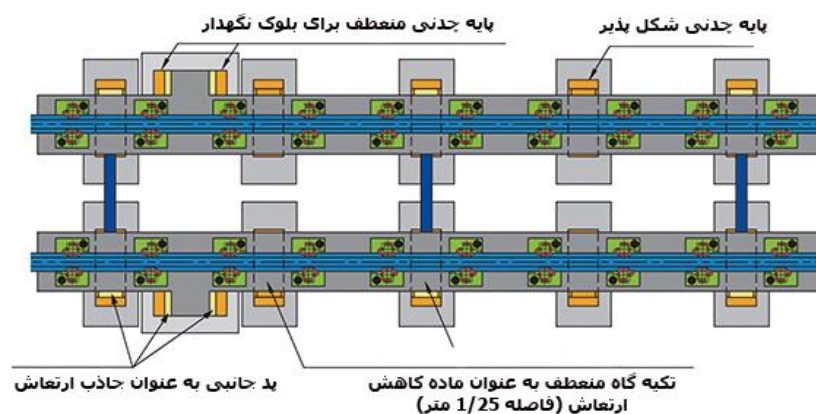
^۴Resilient

تاکنون این سیستم بسته به نوع بستر زیر سیستم روسازی به سه شکل مختلف اجرا شده است. در ادامه در رابطه با هر یک از سیستم‌ها توضیحاتی داده خواهد شد.

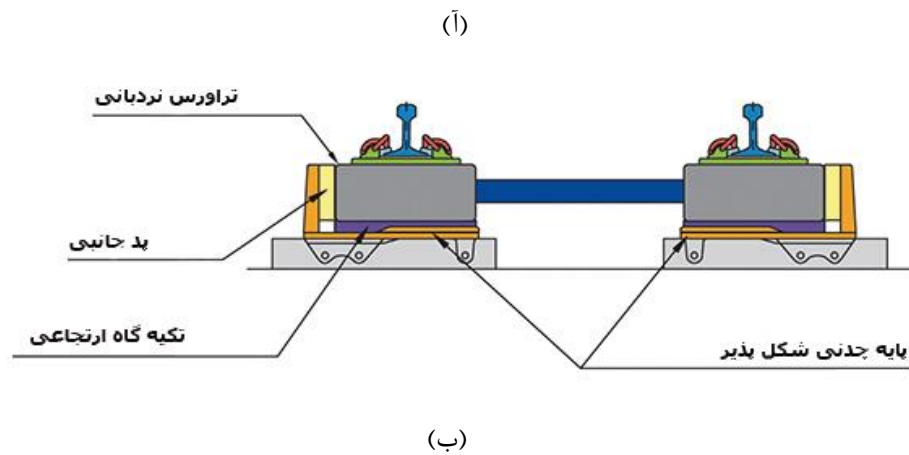
۲-۱۷-۲-۱- روسازی نردبانی شناور اجرا شده بر روی بستر بتنی تخت دارای صفحات

فلزی

در این نوع سیستم به منظور پیاده‌سازی روسازی نردبانی، همان‌گونه که در (شکل ۲-۲۱: آ) مشاهده می‌شود، روسازی نردبانی بر روی یک بستر بتنی تخت که بر روی سطح آن یک سری صفحات فلزی^۱ در فواصل مشخص و ثابت قرار دارد اجرا می‌شود. این صفحات فلزی که بر روی بستر بتنی قرار دارند، به کمک بولتهایی که یک طرف آن‌ها به صفحه متصل است و طرف دیگر آن‌ها در داخل بستر بتنی قرار دارد مهار می‌شوند. سپس تراورس نردبانی که در زیر آن دارای یک سری المان‌های ارتجاعی وجود دارد، بر روی بستر بتنی اجرا می‌شود. محل قرارگیری المان ارتجاعی زیر تراورس نردبانی، دقیقاً بر روی صفحات فلزی قرار گرفته روی بستر بتنی می‌باشد. همان‌گونه که در (شکل ۲-۲۱: ب) مشاهده می‌شود، در محل‌هایی که المان‌های ارتجاعی قائم زیر تراورس نردبانی قرار دارند، در راستای عرضی نیز یک سری پدهای ارتجاعی وجود دارند تا میزان ارتعاش را در راستای عرضی کاهش دهند. در این مدل روسازی نردبانی دیگر نیازی به اجرای تیرهای بتنی عرضی در ابتدا و انتهای تراورس نردبانی نمی‌باشد [۳۸].



^۱Ductile Cast iron pedestal



شکل ۲-۲۱: روسازی نردبانی شناور اجراشده بر روی بستر بتنی تخت دارای صفحات فلزی [۳۸].

در شکل ۲-۲۲ نمونه اجراشده این سیستم را مشاهده می‌نمایید.

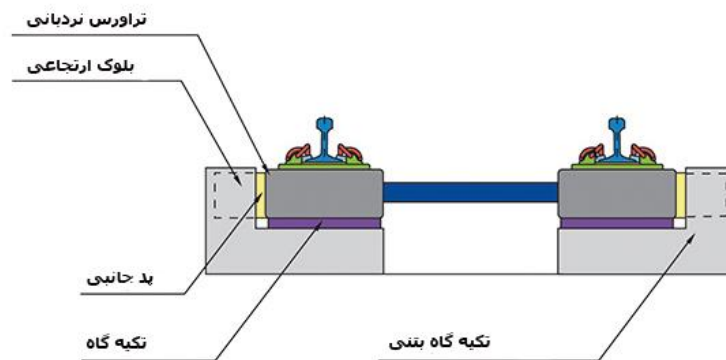


شکل ۲-۲۲: روسازی نردبانی شناور اجراشده بر روی بستر بتنی تخت دارای صفحات فلزی [۳۸].

۲-۲-۱۷-۲- روسازی نردبانی شناور اجراشده بر روی بستر بتنی L شکل

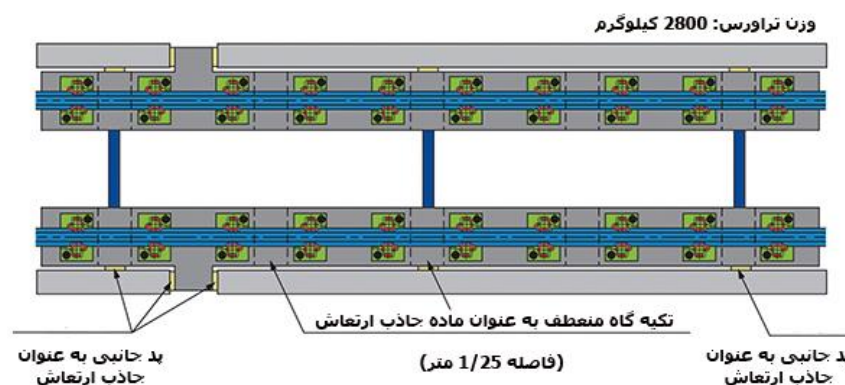
این نوع سیستم روسازی، مشابه سیستم روسازی ذکر شده در بالا می‌باشد با این تفاوت که شکل بستر بتنی از حالت تخت به حالت L تغییر شکل پیدا کرده و صفحات فلزی روی بستر حذف شده‌اند. این نوع سیستم اکثراً در پل‌ها به منظور کاهش ارتعاشات منتقل شده به پل و همچنین کاهش وزن سازه اجرا می‌شود. در

شکل ۲-۲۳، جزئیات اجرای این سیستم در مقطع عرضی مشاهده می‌شود [۳۸].



شکل ۲-۲۳: جزئیات اجرای روسازی نردبانی شناور اجراشده بر روی بستر بتنی L شکل [۳۸].

همان‌گونه که در شکل ۲-۲۳ مشاهده می‌شود، بستر بتنی زیر تراورس نردبانی به صورت L شکل می‌باشد و در زیر تیرهای طولی بتنی تراورس نردبانی المان‌های ارتجاعی به کار رفته‌است. در بین تیرهای طولی بتنی تراورس نردبانی و جداره قائم بستر بتنی نیز المان ارتجاعی به کار گرفته می‌شود و باعث کاهش ارتعاش در راستای عرضی می‌شود. در شکل ۲-۲۴ پلانی از دتایل یک تراورس نردبانی به کار رفته در این سیستم ملاحظه می‌شود.



شکل ۲-۲۴: جزئیات اجرای روسازی نردبانی شناور اجراشده بر روی بستر بتنی L شکل [۳۸].

همان‌گونه که در شکل ۲-۲۴ مشاهده شد، در فواصلی ثابت جداره قائم بستر L شکل حذف شده و تیرهای طولی تراورس نردبانی دارای لبه‌ای اضافه خواهند بود که به پایداری بیشتر سازه خط کمک می‌کند. ضمناً نیازی به اجرای تیرهای بتنی عرضی در ابتدا و انتهای تراورس نردبانی است. در شکل ۲-۲۵ نمونه‌ای از اجرای این سیستم مشاهده می‌شود [۳۸].



شکل ۲-۲۵: نمونه‌ای از اجرای روسازی نردبانی شناور اجراشده بر روی بستر بتنی L شکل [۳۸].

۲-۱۷-۳- روسازی نردبانی شناور اجراشده بر روی بستر بتنی تخت به همراه المان

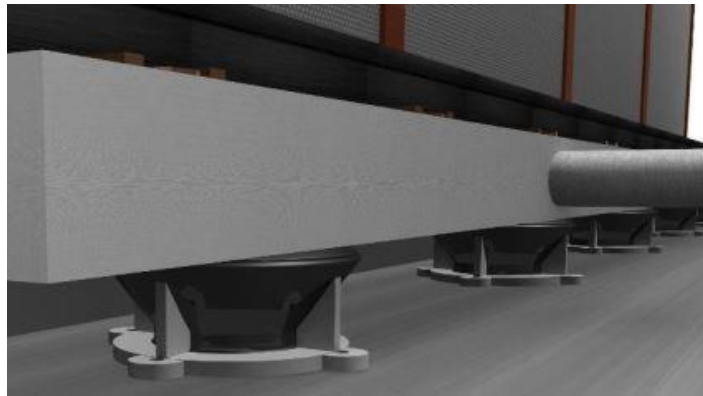
ارتجاعی دایره‌ای

این سیستم که نمونه‌ای جدیدتر نسبت به سیستم‌های قبلی می‌باشد، دقیقاً مانند سیستم نردبانی با صفحات فلزی می‌باشد، با این تفاوت که صفحات فلزی که بر روی بستر بتنی اجرا می‌شوند، حذف شدند و ضمناً به جای استفاده از پدهای لاستیکی در زیر تیرهای طولی تراورس نردبانی از یک سری المان‌های ارتجاعی دایره‌ای که در فواصل ثابتی از یکدیگر قرار گرفته‌اند استفاده می‌شود (شکل ۲-۲۶).

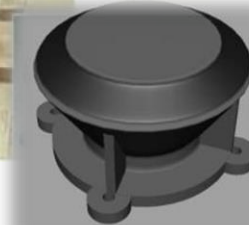
این المان‌های ارتجاعی دایره‌ای شکل قابلیت بسیار بالایی در جذب ارتعاشات و میرا کردن آن‌ها را دارا هستند. زمانی که نیاز به کاهش شدید ارتعاش در منطقه‌ای موجود باشد، استفاده از این سیستم گزینه بسیار مناسبی می‌باشد. در این سیستم نیازی به اجرای تیرهای بتنی عرضی در ابتدا و انتهای تراورس نردبانی نیست و در راستای عرضی استفاده از لوله‌های فولادی عرضی کافی می‌باشد [۳۸].



(آ)



(ب)

المان
ارتجاعی
دایره ای

(ج)

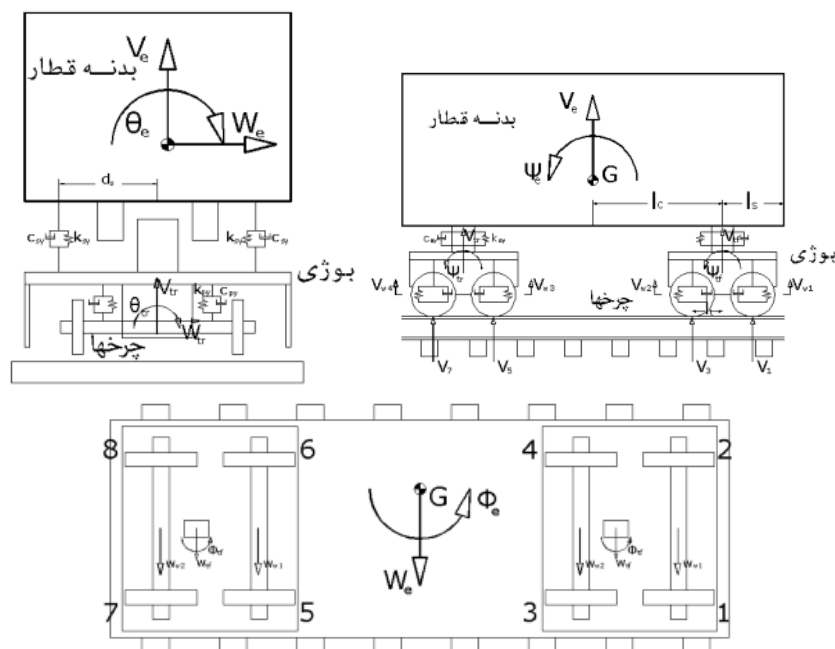
شکل ۲-۲۶: مدل روسازی نردبانی شناور به همراه المان ارتجاعی دایره‌ای [۳۸].

۲-۱۸- پیشینه پژوهش

امروزه در اکثر کشورهای صنعتی به دلیل صرف‌جویی‌های اقتصادی چشمگیر، استفاده از قطارهای سنگین در حال توسعه و گسترش می‌باشد. مسلماً در چنین مسیرهایی، نیاز به خطی پایدار با قابلیت اعتماد بالا خواهیم داشت. از طرفی خط و زیرسازهای آن، بزرگترین سرمایه راه‌آهن می‌باشد که هزینه نگهداری و تعمیر آن درصد قابل توجهی از هزینه بهره‌برداری را شامل می‌شود. رفع عیب و ثابت ماندن فرم هندسی اولیه و طراحی شده، خود باعث افزایش ضریب ایمنی برای حرکت قطارها بوده و شرایط حرکت و سرعت سیر قطارها را مساعد می‌کند. از این‌رو انتخاب سیستم‌های روسازی مناسب و بهینه و شناخت نحوه عملکرد آن‌ها تحت اثر

عبور وسیله نقلیه ریلی به منظور کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری، از ابتدا مورد توجه دانشمندان، پژوهشگران و صنعتگران حمل و نقل ریلی بوده‌است. لذا مختصر توضیح درمورد پژوهش‌هایی که قبلاً برای همین منظور انجام شده‌اند، می‌تواند مفید واقع شود.

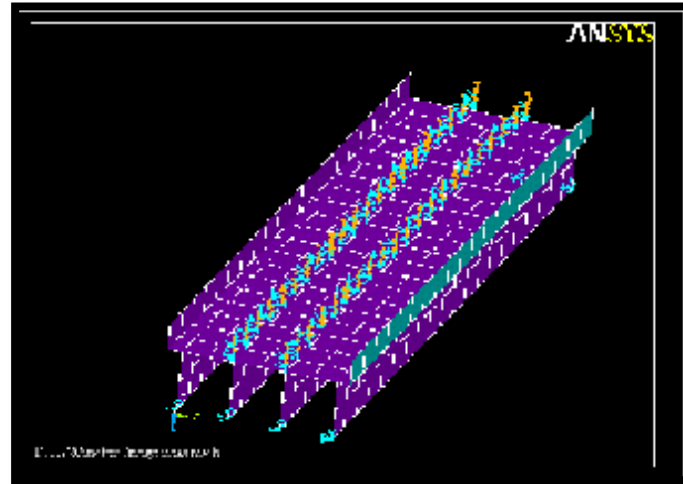
خسرو برگی و علیرضا آقابزرگی [۳۷] یک مدل رفتاری کامل سه‌بعدی متشکل از مجموعه عوامل موثر (قطار، ریل و سازه پل) با در نظر گرفتن اثر اندرکنش موجود بین مجموعه پل و قطار ارائه نمودند. قطار سریع‌السیر مورد بررسی در این پژوهش، از نوع شینکانسن (SKS) سری ۳۰۰ بوده که در طبقه بندی قطارهای آیین‌نامه‌ای به دلیل وجود دو بوژی در هر واگن به همراه دوجفت محور می‌توان آن را از نوع قطارهای سریع‌السیر رایج به‌شمار آورد. مشخصات سه‌بعدی مدل یکی از واگن‌های این قطار از نما در شکل ۲-۲۷ ارائه شده‌است.



شکل ۲-۲۷: نمایش سه‌بعدی مدل یکی از واگن‌های قطار [۳۷].

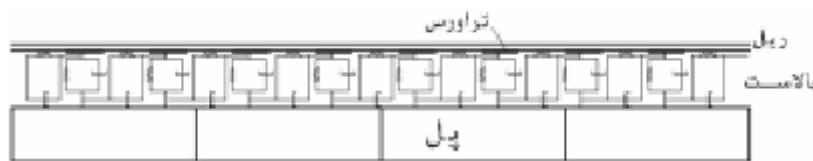
در این پژوهش جهت مدل‌سازی پل، در بررسی پاسخ‌های دینامیکی آن تحت اثر عبور قطار سریع‌السیر، از سه نمونه مدل پل با دهانه‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری شامل چهار تیر اصلی استفاده شده‌است. این پل‌های بتنی که با تکیه‌گاه‌های ساده از دو طرف مهار شده‌اند، مطابق با آیین‌نامه‌های جدید پل‌های خطوط

سریع‌السير راه‌آهن تحت آنالیز دینامیکی قرار گرفته‌اند. مدل پل موردنظر که در نرم افزار انسیس^۱ مدل‌سازی شده‌است، در شکل ۲-۲۸ نشان داده شده‌است.



شکل ۲-۲۸: مدل‌سازی پل مورد نظر با استفاده از نرم افزار انسیس [۳۷].

شکل شماتیک مدل‌سازی بالاست که برای مدل‌سازی آن از المان‌های فنر-میراگر که اثر آن‌ها در دو جهت قائم و افقی در نظر گرفته شده در شکل ۲-۲۹ نشان داده شده‌است.



شکل ۲-۲۹: مدل‌سازی بالاست با استفاده از فنر و میراگر [۳۷].

برای ارزیابی پدیده رزونانس در عملکرد پل، با اعمال سرعت‌های متفاوت قطار، برای بررسی اثرات اندرکنش موجود بین دو مجموعه پل و قطار که مورد مطالعه این تحقیق بوده، مدل پل ۲۰ متری در دو حالت در سرعت‌های مختلف بررسی شده‌اند. در حالت اول همه جزئیات پل و قطار، بوژی، سیستم‌های تعلیق‌های اولیه و ثانویه و بالاست در مدل در نظر گرفته شده‌اند. اما در حالت دوم اثر کلیه جزئیات ذکر شده نادیده گرفته

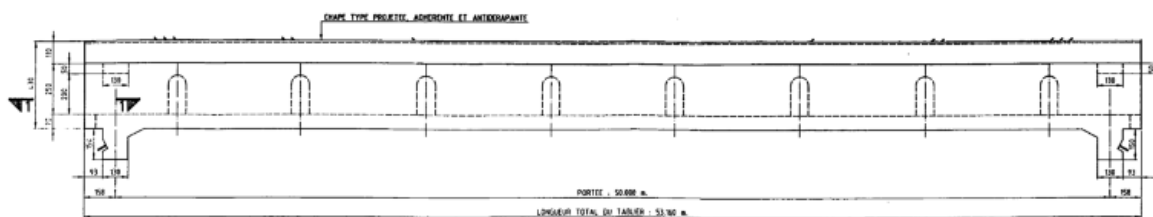
^۱Ansys

شده‌اند و در واقع پاسخ دینامیکی پل تحت اثر بار عبوری قطار با مدل جرم متحرک مورد مطالعه قرار گرفته‌است.

با توضیحات مختصری که در مورد این پژوهش بیان شد، می‌توان از مهمترین نتایجی که حاصل شده‌است به موارد زیر اشاره نمود:

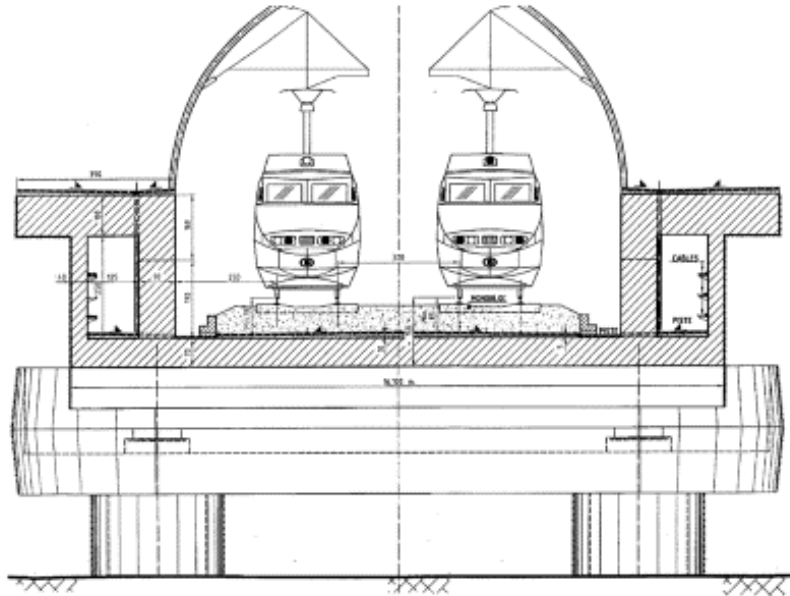
- پاسخ مدل‌هایی که در آنها اثر اندرکنش لحاظ شده‌است و اثرات جزئیات موجود در حالت واقعی صرف نظر نشده‌است، مقدار کمتر با کاهش تقریبی ۱۰ درصدی نسبت به حالت در نظر گرفتن مدل جرم متحرک ارائه می‌دهند.
- با توجه به هزینه بالای محاسباتی و زمانی این رویکرد، در صورتی که فقط پاسخ پل مدنظر باشد، می‌توان با روش بار یا جرم متحرک نیز آنالیز را انجام داد.

هی شیا، جی دِ روک^۲ و همکاران [۴۰]، آنالیز دینامیکی بر روی پل راه‌آهن سریع‌السیر آنتوئینگ^۳ واقع مابین شهر بروکسل و پاریس که دارای روسازی سنتی بالاستی می‌باشد، تحت عبور قطار را انجام داده و سپس پاسخ‌های دینامیکی پل و قطار با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود محاسبه نمودند. پل مورد آزمایش از تیرهای پیش‌تنیده بتنی دو دهانه با تکیه‌گاه ساده و با دهانه‌های ۵۰ متری و قطعه‌های U شکل تشکیل شده‌است (در اشکال ۲-۳۰ و ۲-۳۱ مقاطع طولی و عرضی پل را مشاهده می‌نمایید). سرعت قطار نیز بین ۲۵۶ تا ۳۱۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده‌است. جهت صحت‌سنجی نتایج حاصله از مدل‌سازی نرم‌افزاری، در اندازه‌گیری‌های میدانی برای یافتن پاسخ‌های دینامیکی پل از شتاب‌سنج‌های لیزری و کرنش‌سنج‌ها استفاده شده‌است.



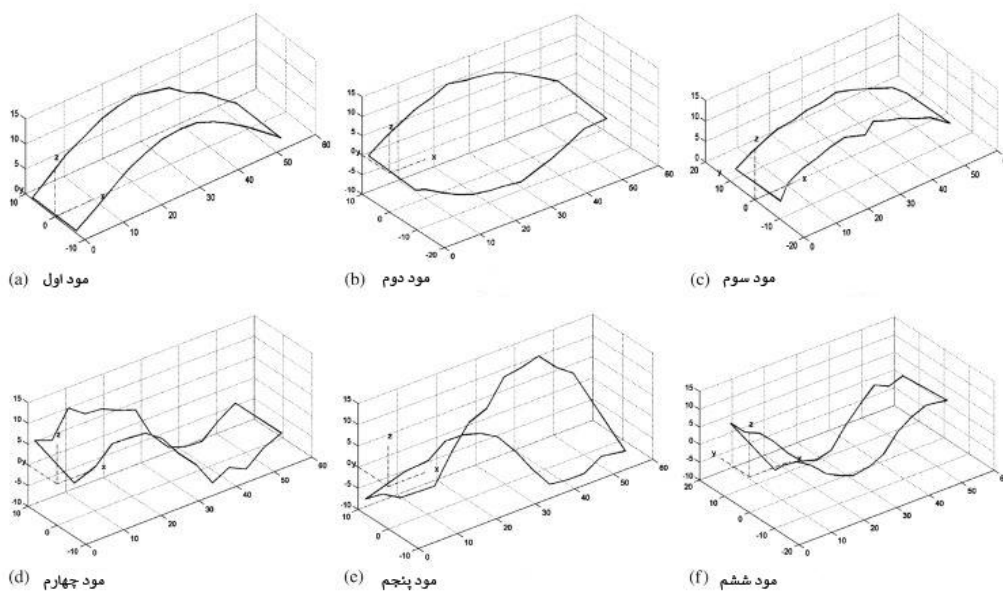
شکل ۲-۳۰: نمایی از مقطع طولی پل با دهانه ۵۰ متری با مقطع U شکل [۴۰].

^۱He Xia
^۲G. De Roeck
^۳Antoing



شکل ۲-۳۱: نمایی از مقطع عرضی پل مورد بررسی [۴۰].

در این پژوهش، مدل‌سازی در نرم‌افزار مطلب و به صورت سه‌بعدی انجام پذیرفته و انواع مدهای تغییرشکل پل تحت عبور قطار، استخراج شده است که در شکل ۲-۳۲ مشاهده می‌کنید.



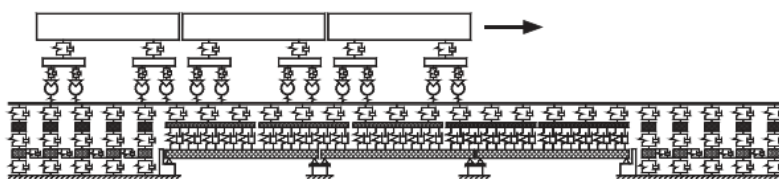
شکل ۲-۳۲: مدهای تجربی پل استخراج شده از نرم‌افزار مطلب [۴۰].

Mode

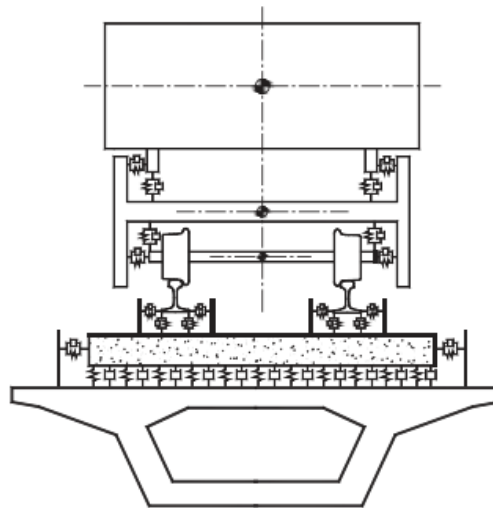
از مهمترین نتایج این پژوهش می‌توان به این مورد اشاره کرد که قطار با اتصالات مفصلی ویژگی‌های دینامیکی خوبی از خود نشان داده و نیز داده‌های اندازه‌گیری شده و استخراج شده از مدل‌سازی رایانه‌ای دارای تطابق قابل قبول بودند.

وانمینگ ژای، هی شیا و همکاران [۴۱] یک چهارچوب منطقی جهت بررسی سیستماتیک اندرکنش دینامیکی قطار سریع‌السیر - خط و پل با هدف آنالیز و ارزیابی کردن ایمنی و راحتی سیر قطارها از روی پل ارائه نموده‌اند که یقیناً برای طراحی پل‌های راه‌آهن سریع‌السیر ضروری می‌باشند.

با توجه به اینکه مدل‌سازی پل، وسیله نقلیه ریلی و روسازی خط دامنه بسیار گسترده‌ای دارد و ولی در این پژوهش با در نظر گرفتن فرضیاتی جهت ساده‌سازی مدل، مدل‌سازی را به انجام رسانده شده‌است. در این پژوهش با مدل‌سازی پل مرکب با تکیه‌گاه‌های ساده همراه با دال خط بتنی و روسازی بالاستی، اندرکنش دینامیکی قطار سریع‌السیر، خط و پل، را استخراج نموده و همچنین ارتعاش سازه خط نیز در مدل‌سازی مورد توجه قرار گرفته‌است. تصاویر شماتیک فرضیات مدل را در شکل‌های (۲-۳۳ و ۲-۳۴) مشاهده می‌نمایید.



شکل ۲-۳۳: مقطع جانبی در مدل اندرکنش دینامیکی قطار سریع‌السیر، پل و سازه خط [۴۱].

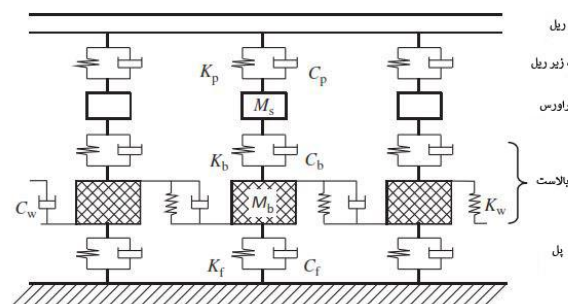


شکل ۲-۳۴: مقطع عرضی در مدل اندرکنش دینامیکی قطار سریع‌السیر، پل و سازه خط [۴۱].

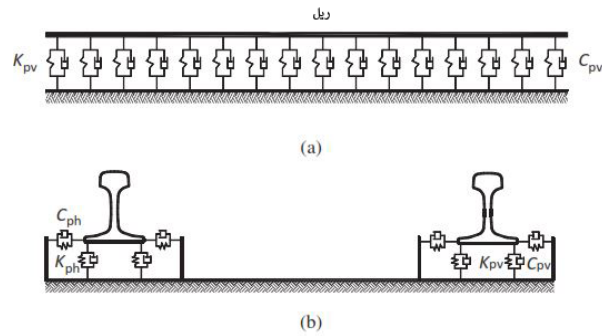
در مورد مدل‌سازی وسیله نقلیه نیز فرضیاتی برای ساده‌سازی مدل در نظر گرفته شده‌است که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- عبور قطار از روی پل با سرعت ثابت انجام پذیرفته و ارتعاش کششی وسیله نقلیه و نیز اندرکنش دینامیکی با وسایط نقلیه ریلی هم‌جوار نادیده گرفته شدند.
- بدنه وسیله نقلیه، بوژی‌ها و چرخ محورها صلب و غیرالاستیک فرض شدند.
- بدنه وسیله نقلیه در سه جهت نسبت به مرکز جرم‌اش متقارن می‌باشد.

مدل‌سازی روسازی بالاستی و ریل به صورت تیر اولر-برنولی بوده و اندرکنش بین اجزای روسازی نیز به کمک فنر و کمک فنر مدل شده‌اند. در اشکال ۲-۳۵ و ۲-۳۶، شکل شماتیک مدل‌سازی روسازی بالاستی و روسازی غیر بالاستی دال خط بتنی نمایش داده شده‌است.

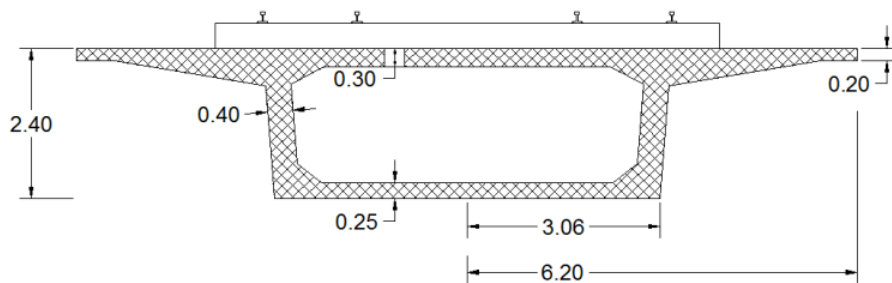


شکل ۲-۳۵: مدل خط بالاستی راه‌آهن سریع‌السیر [۴۱].

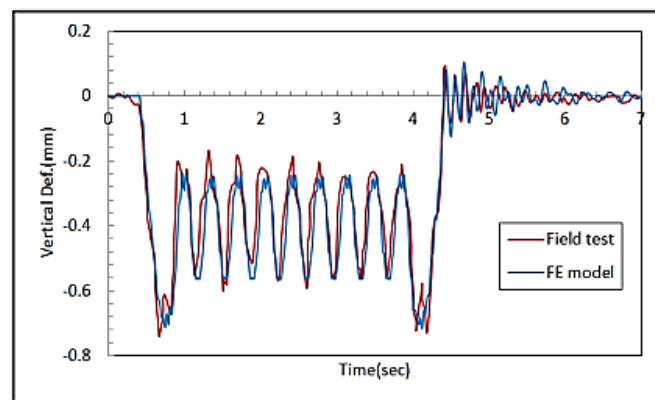


شکل ۲-۳۶: مدل خط دال خط بتنی راه آهن سریع السیر (a) مقطع عرضی (b) نمای پایانی [۴۱].

جهانگیری و ذاکری^۱ [۳۶] در پژوهشی با استفاده از مدل سازی سه بعدی المان محدودی پل شاهتیر بتنی راه آهن سریع السیر و کالیبره کردن آن به وسیله نتایج آزمایشات میدانی پرداختند (شکل ۲-۳۷).



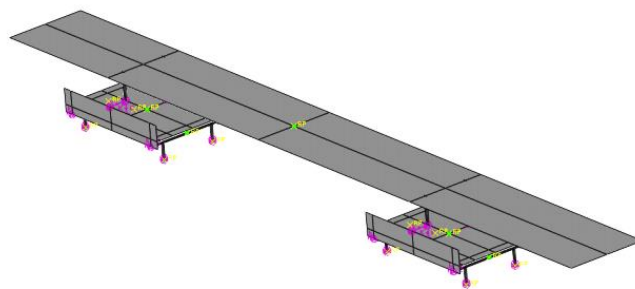
شکل ۲-۳۷: مقطع پل شاهتیر بتنی [۳۶].



شکل ۲-۳۸: صحت سنجی مدل تحت عبور قطار با سرعت ۲۶۰ کیلومتر بر ساعت [۳۶].

^۱M.Jahangiri & J.A. Zakeri
^۲Calibration

ایشان به بررسی اثرات سرعت قطار با استفاده از تحلیل دینامیکی سیستم قطار-پل تحت عبور قطار سریع‌السیر به صورت یک‌طرفه و دوطرفه در بازه سرعت ۱۲۰-۲۶۰ کیلومتر بر ساعت پرداختند (شکل ۲-۳۹) و به این نتیجه رسیدند که محل مدهای عبور یک‌طرفه و دوطرفه بر روی پل متفاوت است و ماکزیمم مقدار در مد عبوری دوطرفه بزرگتر از یک‌طرفه می‌باشد. ایشان در طول پژوهش خود از بارگذاری به صورت قطار متحرک بهره جستند که موجب افزایش دقت مدل‌سازی شده‌است. در شکل ۲-۳۹ مدل سه بعدی قطار متحرک نشان داده شده‌است.



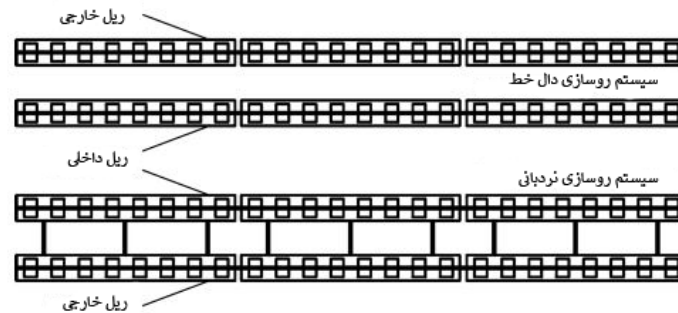
شکل ۲-۳۹: مدل سه بعدی قطار متحرک [۳۶].

آقایان هی شیاء، یوشو دنگ^۱ و همکاران [۴۲]، رفتار دینامیکی یک نوع پل پایه بلند با روسازی نردبانی را تحت عبور قطار سریع‌السیر مورد بررسی قرار داده‌اند که کل فرایند حرکت قطار، از طریق این پل در سرعت‌های مختلف شبیه‌سازی شده و پاسخ‌های دینامیکی پل با روسازی نردبانی و همچنین ایمنی سیر محاسبه شده‌اند. برای مقایسه پاسخ‌های دینامیکی پل با روسازی دال‌خط، تأثیر روسازی نردبانی بر کاهش ارتعاشات پل مورد آنالیز قرار گرفته‌است.

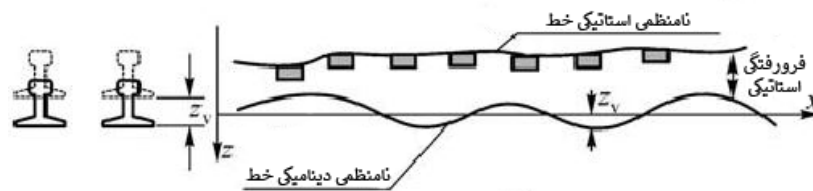
در این پژوهش پل، روسازی و قطار یکبار به صورت عددی مدل‌سازی شده و بار دیگر داده‌ها توسط سنسورهایی نیز که در محل پل کارگذاری شده بود، استخراج شده و در نهایت نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. در ادامه نتایج با یکدیگر مقایسه شده و نتیجه‌گیری نهایی حاصل شده‌است. به این ترتیب می‌توان اشاره کرد که روسازی نردبانی ویژگی بهتری در جذب ارتعاشات در مقایسه با روسازی دال‌خط و نیز تأثیر کمتری در

^۱He Xia
^۲Yushu DENG

کاهش پاسخ‌های دینامیکی پل و همچنین قطار از خود نشان می‌دهد. در نهایت مشخص شد که با افزایش سرعت قطار، روسازی نردبانی بهتر در جذب ارتعاشات عمل می‌نماید. در شکل ۲-۴۰، سیستم روسازی مورد استفاده در خط و در شکل ۲-۴۱، شکل شماتیک ناهمواری خط نشان داده شده‌است.

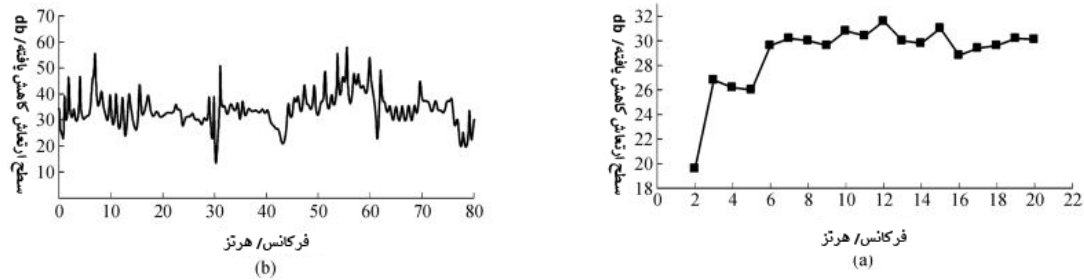


شکل ۲-۴۰: سیستم نردبانی آزمایشی نصب شده در خط ۵ مترو بیژینگ [۴۱].



شکل ۲-۴۱: تصویر شماتیک ناهمواری‌های استاتیکی و دینامیکی خط [۴۲].

شکل ۲-۴۲ (a) سطح کاهش ارتعاش خط تحت بار هارمونیک می‌باشد، که نشان می‌دهد که در محدوده ۲-۲۰ هرتز، سطح ارتعاش کاهش یافته حدود ۲۰ دسی‌بل در ۲ هرتز و ۲۵ دسی‌بل در بیش از ۲ هرتز است. شکل ۲-۴۲ (b)، سطح کاهش ارتعاش تحت بار ضربه‌ای است، نشان می‌دهد که در باند فرکانسی ۰-۸۰ هرتز، سطوح کاهش ارتعاش بیش از ۲۰ هرتز است، به جز آن‌هایی که حدود ۳۰ هرتز است که در حدود ۱۵ دسی‌بل می‌باشد. نتایج نهایی با در نظر گرفتن ارتعاش ریل به صورت صفر دسی‌بل استخراج شده‌است. در نهایت در این آزمایش‌ها، توانایی مناسب روسازی نردبانی در کاهش ارتعاشات به خوبی نمایان شد.



شکل ۲-۴۲: (a) سطح کاهش ارتعاش تحت بارهای مختلف، بار هارمونیک،
(b) بار ضربه‌ای [۴۲].

شیا، نان ژان و گوئیدو دروک^۱ [۴۲] آنالیز دینامیکی بر روی پل خط آهن سریع‌السیر تحت عبور قطار با اتصالات مفصلی انجام دادند (شکل ۲-۴۳). هدف از این پژوهش استخراج پاسخ‌های دینامیکی پل و وسیله نقلیه ریلی بوده‌است. برای انجام این پژوهش فرضیاتی که در نظر گرفته شده عبارتند از: عدم وجود جابجایی نسبی بین روسازی و عرشه پل، چشم پوشی از تأثیرات الاستیک بالاست، پدهای زیر ریل و اتصالات. این پژوهش به دو صورت مدل‌سازی عددی و مدل‌سازی از طریق نرم افزار المان محدود انجام شده‌است (شکل ۲-۴۴). نتایجی که به دست آمد به صورت زیر می‌باشد:

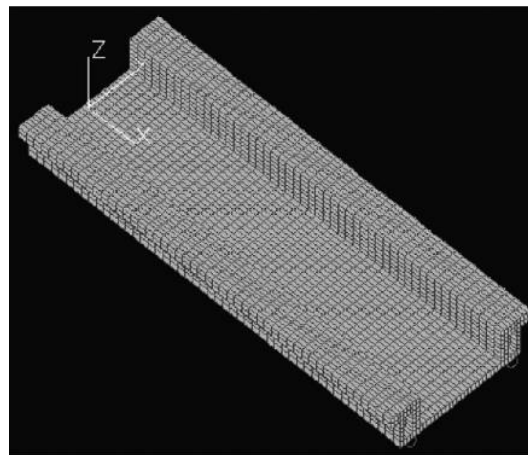
- آنالیز عددی و مدل‌سازی نرم افزاری دارای هم‌پوشانی قابل قبولی بوده و ویژگی‌های ارتعاشی اصلی پل و وسیله نقلیه ریلی را به درستی منعکس می‌نماید.
- پل آنتوتیگ^۲ دارای خصوصیات دینامیکی عالی می‌باشد. نسبت تغییرشکل به دهانه این پل کمتر از پل‌های مشابه در کشور چین می‌باشد. همچنین تغییرشکل قائم عرشه، شتاب قائم و جانبی عرشه و وسیله نقلیه ریلی به صورت ایمن و با آسایش تشخیص داده شدند.
- قطار با اتصالات مفصلی خصوصیات حرکتی خوبی در سرعت بالا از خود نشان داد که کمک شایانی به کاهش ضربه وارده به عرشه پل می‌کند.

^۱Guido De Roeck

^۲Antoing



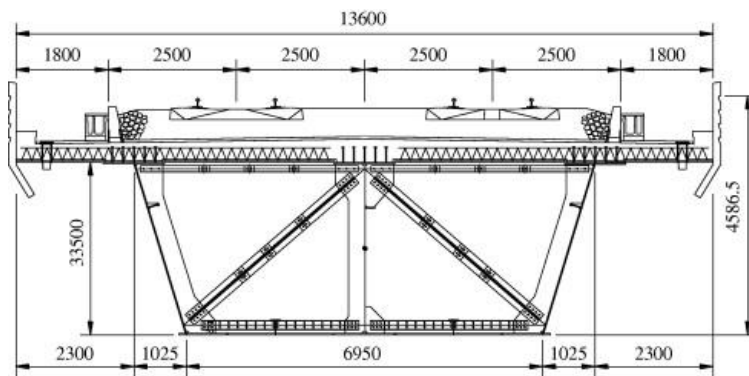
شکل ۲-۴۳: نمایی از پل آنتوئینگ [۴۳].



شکل ۲-۴۴: مدل المان محدود عرشه U شکل [۴۳].

هی شیا، کی لی یو، جی دی روک و همکاران [۴۴] اثر عبور قطار بر روی پل سسیا^۱ واقع در خط سریع‌السیار تورینو-میلانو و دارای روسازی بالاستی را مورد بررسی قرار دادند. مواردی که در این پژوهش زیر نظر گرفته شدند عبارتند از پدیده تشدید، ایمنی سیر و پایداری قطار بر روی پل. لازم به ذکر است که در این پژوهش مطالعات میدانی انجام شده و با مدل‌های نرم‌افزاری مقایسه شده‌است. در آخر نتایج نشان داد که این پل هم در جهت قائم و هم در جهت افقی دارای سختی کافی می‌باشد و ضوابط طراحی عبوری وسیله نقلیه سریع‌السیار را مرتفع می‌سازد. قطار مورد نظر نیز از لحاظ دینامیکی برای خطوط سریع‌السیار قابل قبول و ایمن تشخیص داده‌شد. در ادامه جزئیات این پل در اشکال ۲-۴۵ تا ۲-۴۷ نشان داده شده‌است.

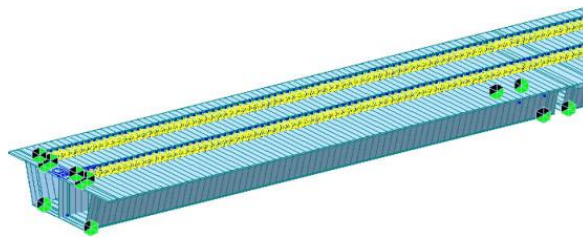
^۱Sesia Viaduct



شکل ۲-۴۵: مقطع عرضی پل سسیا [۴۴].



شکل ۲-۴۶: نمایی کلی از پل خط آهن سسیا [۴۴].



شکل ۲-۴۷: مدل المان محدود عرشه پل سسیا [۴۴].

فصل ۳

مواد و روش‌ها

۳-۱- مقدمه

افزایش روزافزون نیازهای بشر و تلاش برای برآورده ساختن آن‌ها، منجر به خلق مسائل تازه و پیچیده‌ای در همه‌ی زمینه‌های علمی و فنی شده که که حوزه‌ی مهندسی مکانیک و سازه نیز از این امر مستثنی نبوده‌است.

در اغلب موارد، نیاز به طراحی و تحلیل قطعات با هندسه و اخیراً خواص پیچیده تحت بارگذاری‌های نامنظم وجود دارد که به‌کارگیری روش‌های کلاسیک موجود (به عنوان مثال روش تئوری الاستیسیته در مورد توزیع تنش) منجر به یافتن معادلات حاکم بسیار پیچیده با شرایط مرزی و اولیه‌ی متنوع است که که عملاً حل این معادلات از روش تحلیلی را غیرممکن می‌سازد.

از همین روست که روش‌های عددی متنوعی برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم به سیستم‌ها ایجاد و امروزه به طرز وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

بنسبه به نوع روش عددی مورد استفاده و نوع المان‌بندی، روش‌های مختلفی نظیر حجم محدود^۱، اجزاء محدود^۲، تفاضل محدود^۳ و غیره حاصل شده‌است.

هرکدام از روش‌های فوق‌الذکر، در قالب نرم‌افزارهای متنوع به کاربران عرضه می‌شود. روشی که در اغلب مسائل مکانیک جامدات مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش اجزاء محدود است که در قالب نرم‌افزارهایی چون انسیس^۴، آباکوس^۵، نسترن^۶ و غیره قابل استفاده‌است. در این تحقیق به منظور مدل‌سازی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده‌است.

^۱Finite Volume
^۲Finite Element
^۳Finite Difference
^۴Ansys
^۵Abaqus
^۶Nastran

۳-۲- معرفی نرم افزار آباکوس

آباکوس یک مجموعه از برنامه‌های بسیار توانمند می‌باشد که مبتنی بر روش اجزاء محدود، قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارا می‌باشد. ایده اصلی نرم‌افزار در از دکتری آقای دیوید هبیت در سال ۱۹۷۲ میلادی، تحت عنوان "مکانیک محاسباتی بر پایه روش اجزاء محدود" در دانشگاه براون ارائه شد.

این نرم افزار دارای مجموعه المان‌های بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان به صورت مجازی توسط این المان‌ها مدل کرد. همچنین دارای مدل‌های مواد مهندسی بسیار زیادی است که در مدل‌سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن تقویت شده، فوم‌های فلزی و نیز شکننده و همچنین مواد موجود در زمین نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می‌سازد.

نظر به این‌که آباکوس یک ابزار مدل‌سازی عمومی و گسترده می‌باشد، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل‌های مکانیک جامدات و سازه (تنش- تغییر مکان) نمی‌شود. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان مسائل مختلفی نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل حرارتی اجزای الکتریکی، آکوستیک، مکانیک خاک و پیزوالکتریک را مورد مطالعه قرار داد.

استفاده از نرم‌افزار آباکوس با وجود این‌که مجموعه قابلیت‌های بسیار گسترده‌ای در اختیار کاربر قرار می‌دهد، کار نسبتاً ساده‌ای می‌باشد. پیچیده‌ترین مسائل را می‌توان به آسانی مدل کرد. به عنوان مثال مسائل شامل بیش از یک جز را می‌توان با ایجاد مدل هندسی هر جزء و سپس مونتاژ اجزاء مختلف مدل کرد. در اغلب مدل‌سازی‌ها، حتی مدهای با درجه غیرخطی بالا، کاربر می‌بایست تنها داده‌های مهندسی نظیر هندسه مسئله، رفتار مادی مربوط به آن، شرایط مرزی و بارگذاری آن مسئله را تعیین کند. در یک تحلیل غیرخطی، آباکوس به طور اتوماتیک میزان نمو بار و تلوئانس همگرایی را انتخاب و همچنین در طول تحلیل مقادیر آن‌ها را جهت دستیابی به یک جواب صحیح تعدیل می‌کند. در نتیجه کاربر به ندرت می‌بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مسئله را تعیین کند [۳۹].

نرم‌افزار آباکوس دارای دو حلگر اصلی جهت تحلیل مسائل است:

ABAQUS/ Standard -

ABAQUS/ Explicit -

آباکوس/ استاندارد، یک دستوالعمل حل عمومی اجزاء محدود می‌باشد که می‌تواند مسائل خطی و غیرخطی مختلفی شامل پاسخ استاتیکی، دینامیکی، حرارتی و یا الکتریکی اجزای یک مدل را تحلیل کند. آباکوس/ ضمنی یک دستوالعمل ویژه برای حل مسائل اجزای محدود می‌باشد که از روش دینامیکی صریح در حل عددی استفاده می‌کند. این روش برای تحلیل مسائل گذار و کوتاه دینامیکی برخورد و انفجار مناسب است. همچنین این روش برای تحلیل مسائل با درجه غیرخطی بالا شامل تغییر شرایط تماس مناسب می‌باشد [۳۹].

۳-۳- مقایسه روش‌های ضمنی و صریح در مسائل وابسته به زمان

آباکوس/ استاندارد و آباکوس/ ضمنی قادر به حل طیف وسیعی از مسائل می‌باشد. مشخصات روش‌های ضمنی و صریح تعیین می‌کند که کدام روش برای یک مسئله مناسب خواهد بود. در مورد مسائلی که می‌توان که هر دو روش را به کار برد، بازدهی و مدت زمان کمتر حل است که باعث می‌شود یکی از دو روش را انتخاب کنیم.

در هر دو روش ضمنی و استاندارد معادله تعادل دینامیکی (معادله حرکت) به صورت زیر می‌باشد:

$$M\ddot{u} = P - I \quad (۱-۳)$$

که در آن M ماتریس جرم، P برآیند نیروهای خارجی و I برآیند نیروهای داخلی می‌باشد. همچنین \ddot{u} شتاب گره مورد نظر می‌باشد.

^۱ABAQUS/Standard

^۲ABAQUS/Explicit

هر دو روش حل شتاب گره‌ها را محاسبه می‌نماید و در هر دو روش نحوه محاسبات مربوط به المان‌ها نیز یکسان است. تفاوت دو روش در نحوه محاسبه شتاب‌های گره‌ها می‌باشد. در روش ضمنی معادله تعادل در زمان $t + \Delta t$ اعمال می‌شود. حال آنکه در روش صریح این معادله در زمان t مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۴- فضای مدل‌سازی

نرم افزار آباکوس قابلیت مدل‌سازی در سه فضای سه‌بعدی، دو و نیم‌بعدی و دوبعدی را دارد که هر کدام از آن‌ها قابلیت مدل‌سازی شکل‌های متفاوتی را دارد که در پژوهش حاضر به مدل‌سازی در فضای سه‌بعدی پرداخته شده است.

در این حالت مدل هندسی قطعه در دستگاه سه‌بعدی X-Y-Z ترسیم می‌شود و شامل انواع مختلف شکل‌های Solid، Shell Wire و Point می‌باشد.

۳-۵- انواع المان‌ها از نظر تغییر شکل پذیری

در تحلیل‌های المان محدودی انتخاب نوع قطعه مکانیکی از نظر تغییر شکل پذیری دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد و بسته به هدف از تحلیل و رفتار مورد انتظار از قطعه، المان‌ها می‌توانند متفاوت باشند.

از نظر تغییر شکل پذیری چهار نوع المان به ترتیب زیر وجود دارد:

- Deformable

- Discrete rigid

- Analytical rigid

- Eulerian

در پژوهش حاضر به توجه به هدف از تحلیل، دو نوع المان Deformable در مدل‌سازی پل و Discrete rigid در مدل‌سازی قطار و صفحات میراکننده و همچنین صفحات زیر ریل استفاده شده است.

۳-۵-۱- نوع Deformable

با استفاده از این المان، قطعه مورد نظر به عنوان یک قطعه تغییر شکل‌پذیر معرفی می‌شود. تمام قطعاتی که

در طبیعت وجود دارند، قطعات تغییر شکل‌پذیر هستند. در واقع هیچ جسم کاملاً صلبی در طبیعت وجود ندارد، اما با توجه به میزان تغییر شکل‌پذیری می‌توان برخی از اجسام را نسبت به اجسام دیگر صلب در نظر گرفت. یک قطعه تغییر شکل‌پذیر، قطعه‌ای است که تحت بارهای مکانیکی، حرارتی و الکتریکی تغییر شکل می‌دهد.

۲-۵-۲- نوع Discrete rigid

با انتخاب این المان، قطعه مورد نظر به عنوان یک جسم کاملاً صلب در نظر گرفته می‌شود. این گونه قطعات در مسائل تماس به عنوان قطعاتی که تغییر شکل نمی‌یابند، استفاده می‌شوند.

۳-۶- تعیین خواص مواد

مواد از نظر ویژگی‌های تماس به دسته‌های مختلف تقسیم می‌شوند؛ اما آنچه که در بین مواد مختلف مشترک است، طبیعت آن از قانون هوک در تغییر شکل‌های ارتجاعی است. دسته‌بندی مواد از نظر ویژگی‌های الاستیک با توجه به تعداد ضرایب ماتریس ضرایب الاستیک همچنین نحوه محاسبه این ضرایب انجام می‌شود.

مواد در پنج حالت به شکل زیر می‌باشند:

- مواد ایزوتروپیک
- مواد ارتوتروپیک
- مواد ایزوتروپیک جانبی
- مواد ارتوتروپیک تنش صفحه‌ای
- مواد کاملاً غیر ایزوتروپیک

با توجه به مصالح استفاده شده در پل و قطار، مواد استفاده شده در کل پروژه، مواد با خاصیت ایزوتروپیک می‌باشد. مواد ایزوتروپیک موادی هستند که مدول الاستیسیته آن‌ها در تمام جهات یکسان است [۳۹].

۳-۷- نوع تحلیل گر در آباکوس

روش اجزا محدود در واقع یک روش حل معادله دیفرانسیل است. هنگامی که معادله دیفرانسیل مورد نظر مشخص باشد، ماتریس سختی که در واقع نتیجه حل معادله در حوضه المان است برای هر نوع المان مشخص خواهد بود. نرم‌افزارهای المان محدودی مانند آباکوس در واقع مجموعه‌ای از ماتریس‌های سختی برای المان‌های مختلف برای حل معادلات دیفرانسیل مشخصی را در اختیار دارند. آنچه که در مسائل مختلف با هم تفاوت دارد، شرایط مرزی و بارگذاری و دامنه پاسخ است نه معادله حاکم. به عنوان مثال در تمام مسائل استاتیکی معادله دیفرانسیل حاکم یکسان است و تنها شرایط مرزی، بارها و دامنه (شکل هندسی) تغییر می‌کند. انتخاب نوع تحلیل به معنای انتخاب معادله دیفرانسیل حاکم بر مسئله می‌باشد. با معلوم شدن معادله دیفرانسیل و نوع المان، ماتریس سختی المان نیز معلوم می‌شود و با توجه به هندسه مسأله، شرایط مرزی و بارها، ماتریس سختی کل تشکیل داده می‌شود و سپس مسئله حل می‌گردد.

آباکوس دارای انواع تحلیل از جمله تحلیل عمومی و تحلیل خطی است که هر کدام چندین نوع تحلیل را شامل می‌شود که بسته به هدف از تحلیل هر کدام به صورت جداگانه و یا مشترک در یک تحلیل استفاده می‌شود.

۳-۷-۱- تحلیل عمومی

- (۱) Coupled temp-displacement: تحلیل مسائل دما و جابجایی همزمان
- (۲) Coupled thermal-electric: تحلیل مسائل انتقال گرما و الکتریسیته همزمان
- (۳) Coupled thermal-electrical-structural: تحلیل مسائل انتقال گرما، الکتریسیته و سازه همزمان
- (۴) Direct cyclic: تحلیل مسائل بارگذاری چرخه‌ای
- (۵) Dynamic, Implicit: تحلیل مسائل دینامیکی به روش ضمنی
- (۶) Dynamic, Explicit: تحلیل مسائل دینامیکی به روش صریح
- (۷) Dynamic, temp-disp, Explicit: تحلیل مسائل دما و جابجایی به روش صریح

- (۸) Geostatic: تحلیل‌های ژئواستاتیک
- (۹) Heat transfer: تحلیل مسائل انتقال حرارت
- (۱۰) Mass diffusion: تحلیل مسائل نفوذ جرم
- (۱۱) Soils: تحلیل مکانیک خاک
- (۱۲) Static, General: تحلیل مسائل استاتیکی خطی و غیرخطی
- (۱۳) Static, Riks: تحلیل مسائل کمانش غیرخطی
- (۱۴) Visco: تحلیل مسائل ویسکوالاستیک

۳-۷-۲- تحلیل خطی

- (۱) Buckle: تحلیل مسائل کمانش خطی
- (۲) Frequency: تحلیل مسائل ارتعاش آزاد
- (۳) Static, Linear Perturbation: تحلیل مسائل استاتیکی خطی
- (۴) Steady state dynamic, Direct: تحلیل مسائل پایدار دینامیکی

در پژوهش حاضر در میان انواع تحلیل‌های اشاره شده، از سه نوع تحلیل Dynamic Implicit, Static و Frequency به ترتیب برای تحلیل اثرات وزن پل، تحلیل دینامیکی حرکت قطار بر روی پل و تحلیل مدال مورد استفاده قرار گرفته شده است.

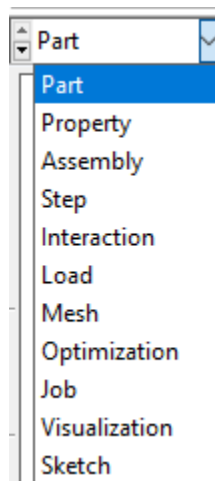
۳-۸- مفهوم اندرکنش

اندرکنش، برهم‌کنش، هم‌کنشی و یا تعامل عملی است بین دو یا چند موجودیت، شیء، پدیده یا فرایند که اثر متقابل بر هم دارند رخ می‌دهد. هنگامی که دو یا چند چیز به کنش و واکنش با هم می‌پردازند، گویند که آن‌ها با یکدیگر اندرکنش دارند. اندرکنش در اجسام می‌تواند حالت آن‌ها را تغییر داده یا بر نحوه انجام تحول اجسام تأثیر بگذارد. همچنین در پدیده‌ها اندرکنش موجب به وجود آمدن پارامترهای اضافی می‌شود که باید در محاسبات در نظر گرفته شوند. در مدل‌سازی چنان که بین دو سطح از دو جسم مختلف اندرکنش تعریف

نشود، در هنگام برخورد آن دو جسم به یکدیگر، نیرویی انتقال پیدا نمی‌کند و آن دو جسم از یکدیگر عبور می‌کنند. ساده‌ترین نوع اندرکنش دو سطح، نیروهای تماسی هستند که بین دو سطح مبادله می‌شوند.

۳-۹- مدل‌سازی در نرم افزار آباکوس

مدل‌سازی این تحقیق با استفاده از نرم افزار آباکوس ۲۰۱۸ انجام یافته‌است. محیط‌های اصلی نرم‌افزار آباکوس عبارت است از:



- Part
- Property
- Assembly
- Step
- Interaction
- Load
- Mesh
- Job
- Visualization
- Sketck

شکل ۳-۱: محیط‌های ده‌گانه نرم‌افزار آباکوس

۳-۹-۱- محیط Part

در محیط Part مدل‌سازی هندسی قطعات انجام می‌گیرد. هر پارت در واقع بخشی از هندسه یک مدل است که از کنار هم قرارگیری آن‌ها هندسه کل مدل شکل می‌گیرد. مدل‌سازی این تحقیق به صورت زیر می‌باشد:

۱- عرشه پل

۲- روسازی (لایه بالاست، دالخط بتنی، نردبانی)

۳- تراورس

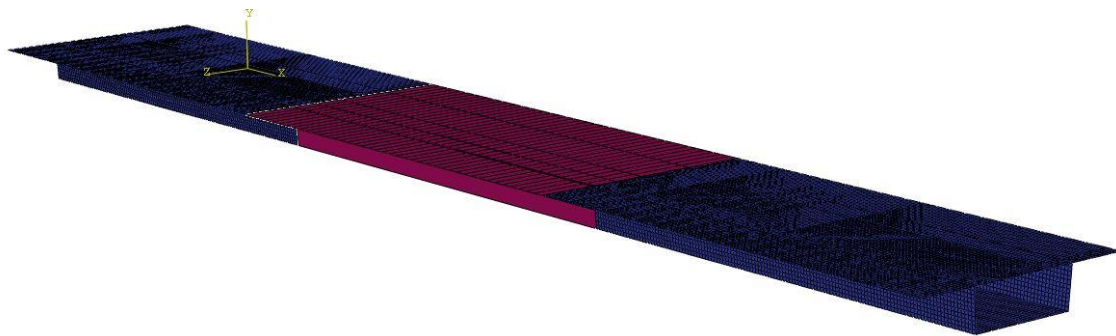
۴- ریل

۵- مدل قطار (شامل بدنه، بوژی، چرخ محورها)

۶- صفحات جاذب ارتعاش انتهای ریل

۳-۹-۱-۱- عرشه پل

پارت مربوط به عرشه پل، یک مقطع جعبه‌ای بتنی می‌باشد که به صورت غشائی^۱ مدل می‌شود. عرشه پل دارای طول ۲۴,۶ متر، دارای عرض عرشه ۱۲,۴ متر و عرض قسمت نشیمن‌گاهی عرشه برابر ۵,۸ متر می‌باشد.



شکل ۳-۲: مدل عرشه پل.

۳-۹-۱-۲- روسازی (لایه بالاست، دالخط بتنی، نردبانی)

۳-۹-۱-۲-۱- مدل سازی لای بالاست

پارت مربوط به لایه بالاست دارای مقطع دوزنقه می‌باشد که به اندازه ۲۴,۶ متر امتداد یافته و بر روی سه دهانه قرار می‌گیرد. ضلع پایینی این روسازی برابر ۱۱ متر و ضلع بالایی آن ۸,۲ متر می‌باشد. فضاهای خالی در قسمت فوقانی این پارت برای جایگذاری تراورس‌ها تعبیه شده‌است.

^۱Shell

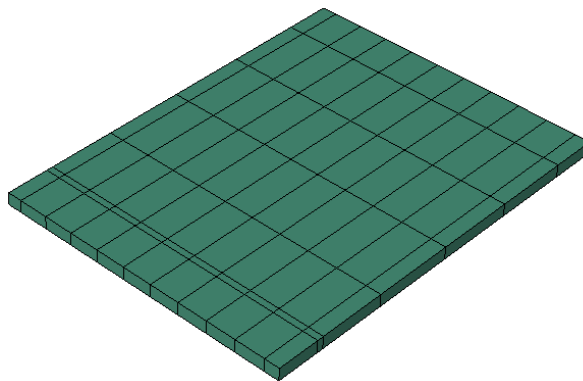
با توجه به این که ضخامت تراورس برابر ۲۲ سانتی متر می‌باشد، ضخامت لای بالاست برابر ۵۷ انتخاب گردیده است که با توجه به نشریه ۳۰۱ مشخصات فنی و عمومی روسازی راه آهن، قابل قبول می‌باشد. در شکل ۳-۳ روسازی بالاستی نشان داده شده است.



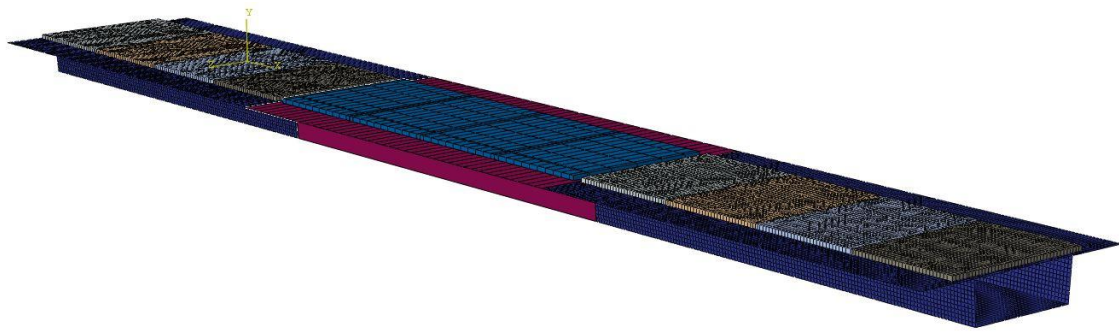
شکل ۳-۳: روسازی بالاستی

۳-۹-۱-۲-۲-مدل سازی روسازی دالخط بتنی

پارت مربوط به روسازی دالخط بتنی به صورت صلب مدل سازی شده است. که دارای طول ۶ متر، عرض ۸ متر و ضخامت ۰,۲۵ متر می‌باشد. در اشکال ۲-۳ و ۳-۳، روسازی دالخط بتنی و نحوه پیاده کردن آن بر روی عرشه پل را مشاهده می‌نمایید.



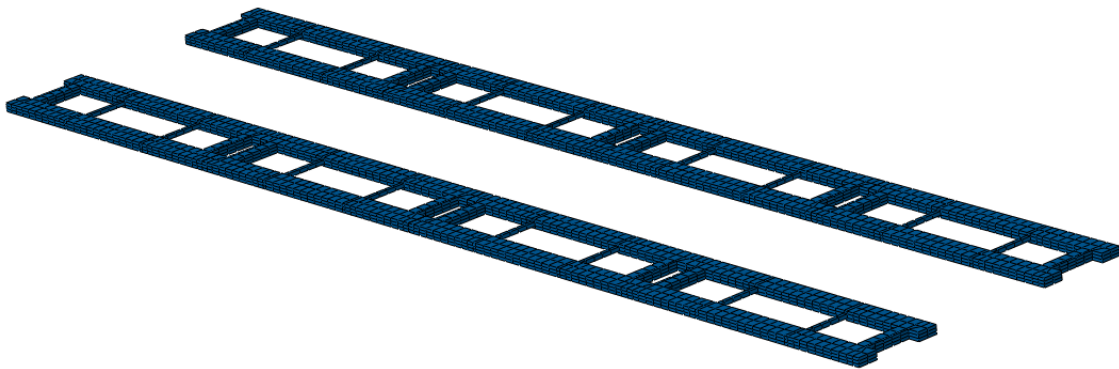
شکل ۳-۴: روسازی دالخط بتنی مدل شده



شکل ۳-۵: روسازی دالخط بتنی مدل شده بر روی عرشه پل

۳-۹-۱-۲-۳- مدل‌سازی روسازی نردبانی

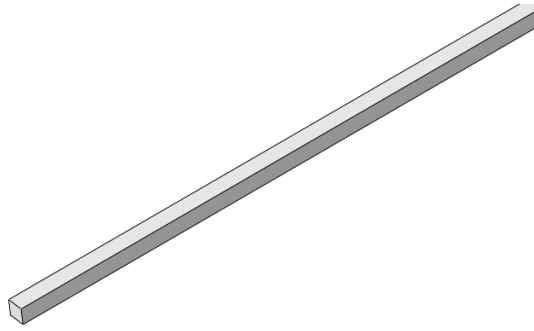
پارت مربوط به روسازی نردبانی به صورت صلب مدل‌سازی شده‌است. که دارای طول ۶ متر، عرض ۹۵.۱ متر و ضخامت ۰,۱۸۵ متر می‌باشد.



شکل ۳-۶: مدل روسازی نردبانی.

۳-۹-۱-۳- ریل

ریل UIC60 برای مدل‌سازی انتخاب شده‌است و پارت مربوط به آن یک مکعب می‌باشد. ابعاد مقطع این مکعب به نحوری انتخاب شده‌است که ممان اینرسی حول محور افقی گذرنده از مرکز سطح مقطع این مکعب برابر با ممان اینرسی حول محور افقی گذرنده از مرکز سطح مقطع ریل UIC60 باشد. مقطع ریل دارای عرض و ارتفاع ۰,۱۳۸۲ متر و طول ۶۱۹,۱ متر انتخاب شده‌است تا یک لوکوموتیو به همراه سه واگن در فاصله ۳,۵ متری از مدل بر روی ریل جای گیرد.



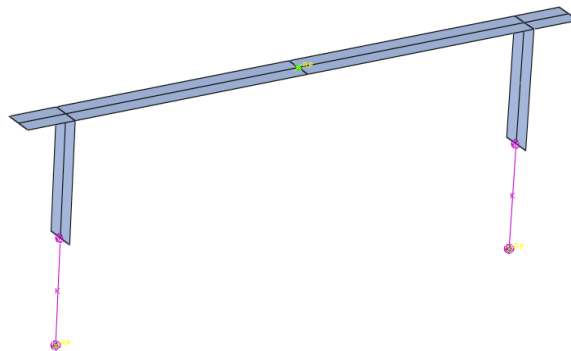
شکل ۳-۷: مدل ریل

۳-۹-۱-۴- مدل قطار

پارت‌های مربوط به قطار به صورت غشایی و بدون اختصاص مصالح مدل‌سازی شده‌است. دلیل عدم اختصاص مصالح به پارت‌های قطار این مورد می‌باشد که در مدل‌سازی کلی، اهمیت جزئیات قطار نسبت به مدل عرشه پل و روسازی پایین‌تر می‌باشد. در ادامه، جزئیات مدل‌سازی قطار ارائه می‌گردد.

۳-۹-۱-۴-۱- مدل‌سازی محور

به منظور مدل‌سازی محور از المان‌های صلب به صورت المان صفحه استفاده می‌گردد. همچنین فنرها و میراگرهایی برای اتصال محور به بوژی در جهات قائم و افقی در نظر گرفته شده‌است که در شکل ۳-۸ ارائه شده‌است.

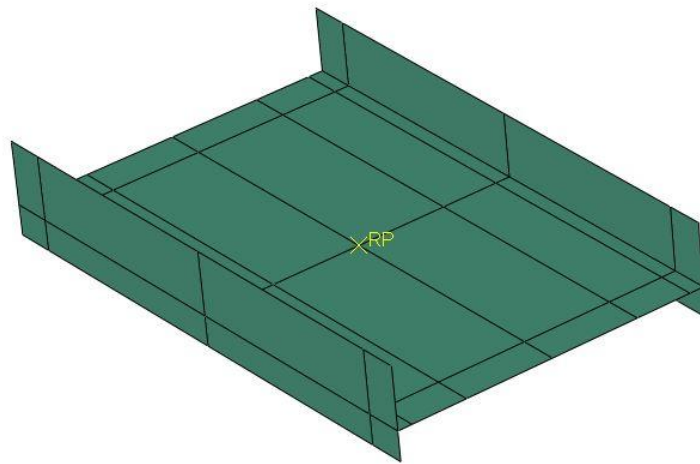


شکل ۳-۸: مدل محور.

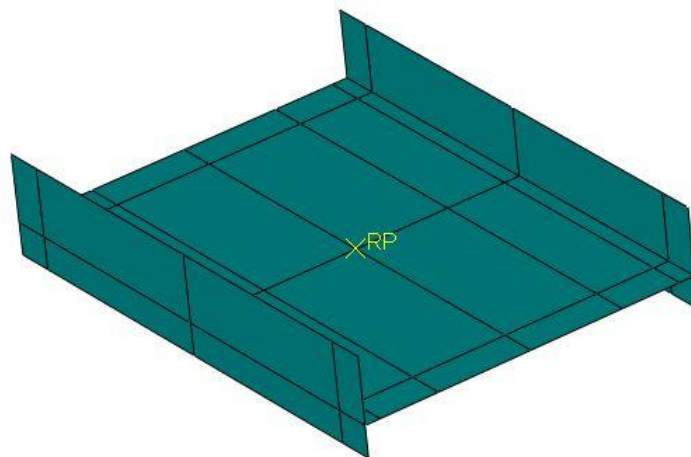
'Discrete Rigid

۳-۹-۱-۴-۲- مدل‌سازی بوژی لوکوموتیو و واگن

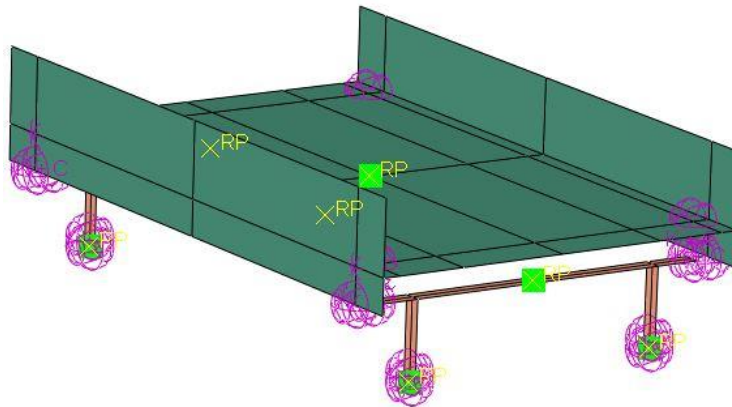
در مدل‌سازی بوژی‌ها نیز از المان‌های صلب به صورت المان صفحه استفاده گردیده‌است. همچنین فنرها و میراگرهایی برای اتصال بوژی به محورها و به بدنه در جهات قائم و افقی در نظر گرفته شده که در اشکال ۳-۹ الی ۳-۱۲ ارائه شده‌است.



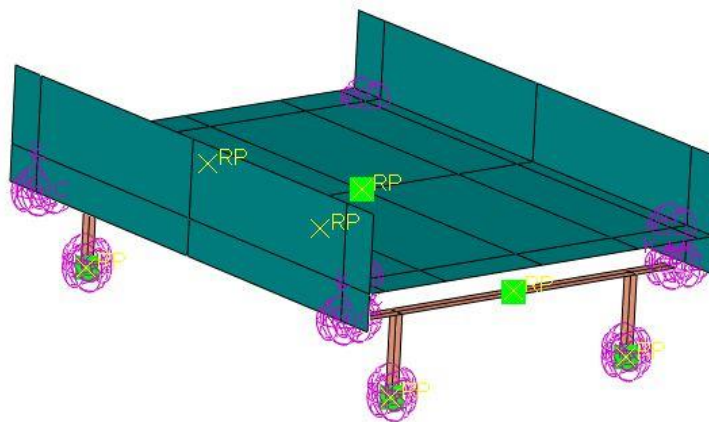
شکل ۳-۹: مدل بوژی لوکوموتیو.



شکل ۳-۱۰: مدل بوژی واگن.



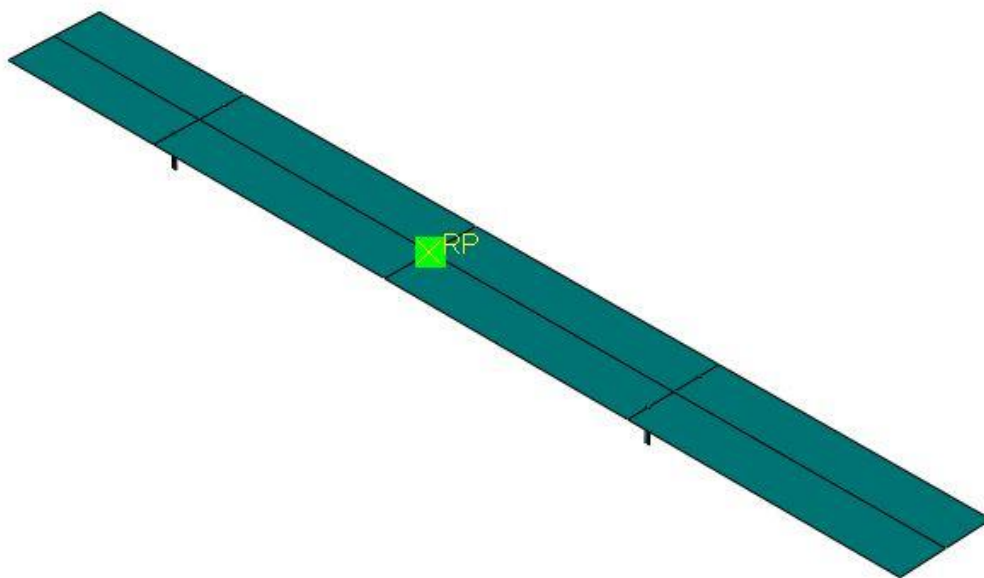
شکل ۳-۱۱: مدل بوژی لوکوموتیو و محورها.



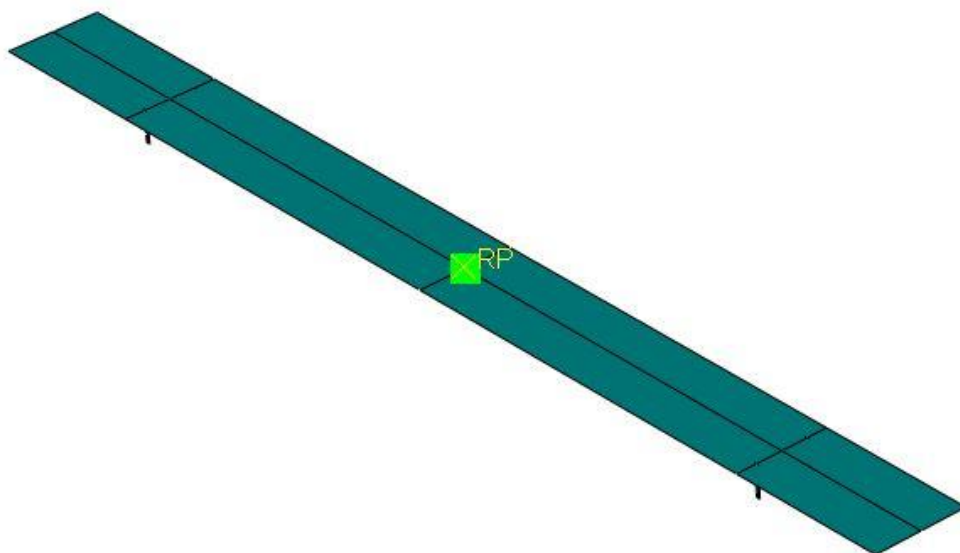
شکل ۳-۱۲: مدل بوژی واگن و محورها.

۳-۹-۱-۴-۳- مدل‌سازی بدنه لوکوموتیو و واگن

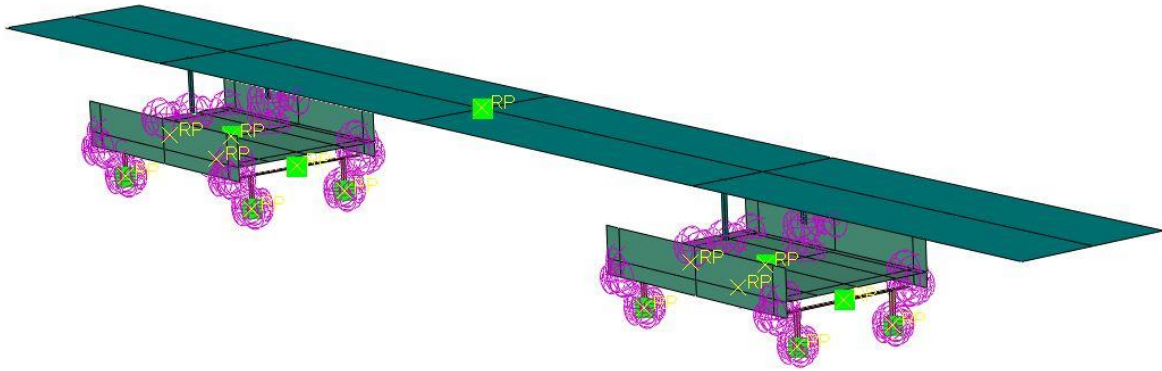
در مدل‌سازی این بخش نیز از المان‌های صلب به صورت المان صفحه استفاده می‌گردد. همچنین فنرها و میراگرهایی برای اتصال بدنه به بوژی در جهات قائم و افقی در نظر گرفته شده‌است که در شکل ۳-۱۳ و شکل ۳-۱۶ ارائه شده‌اند و همچنین مش‌بندی اجزای قطار نیز در اشکل ۳-۱۷ نشان داده شده‌است.



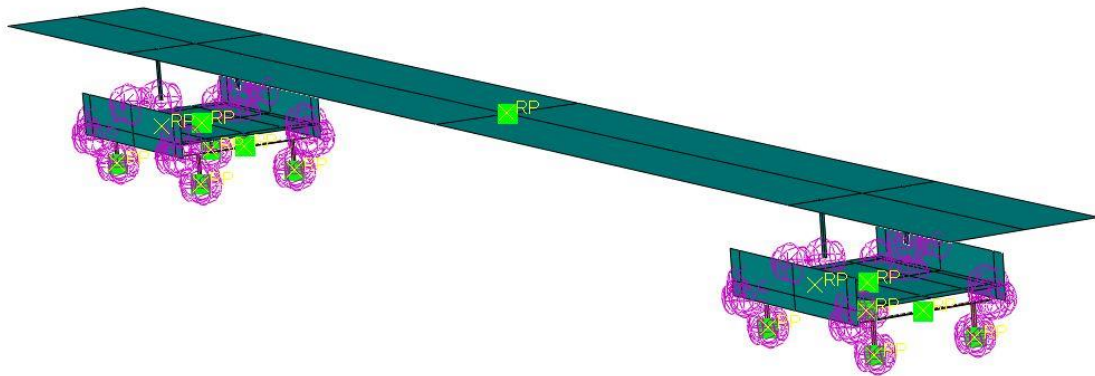
شکل ۳-۱۳: مدل بدنه لوکوموتیو.



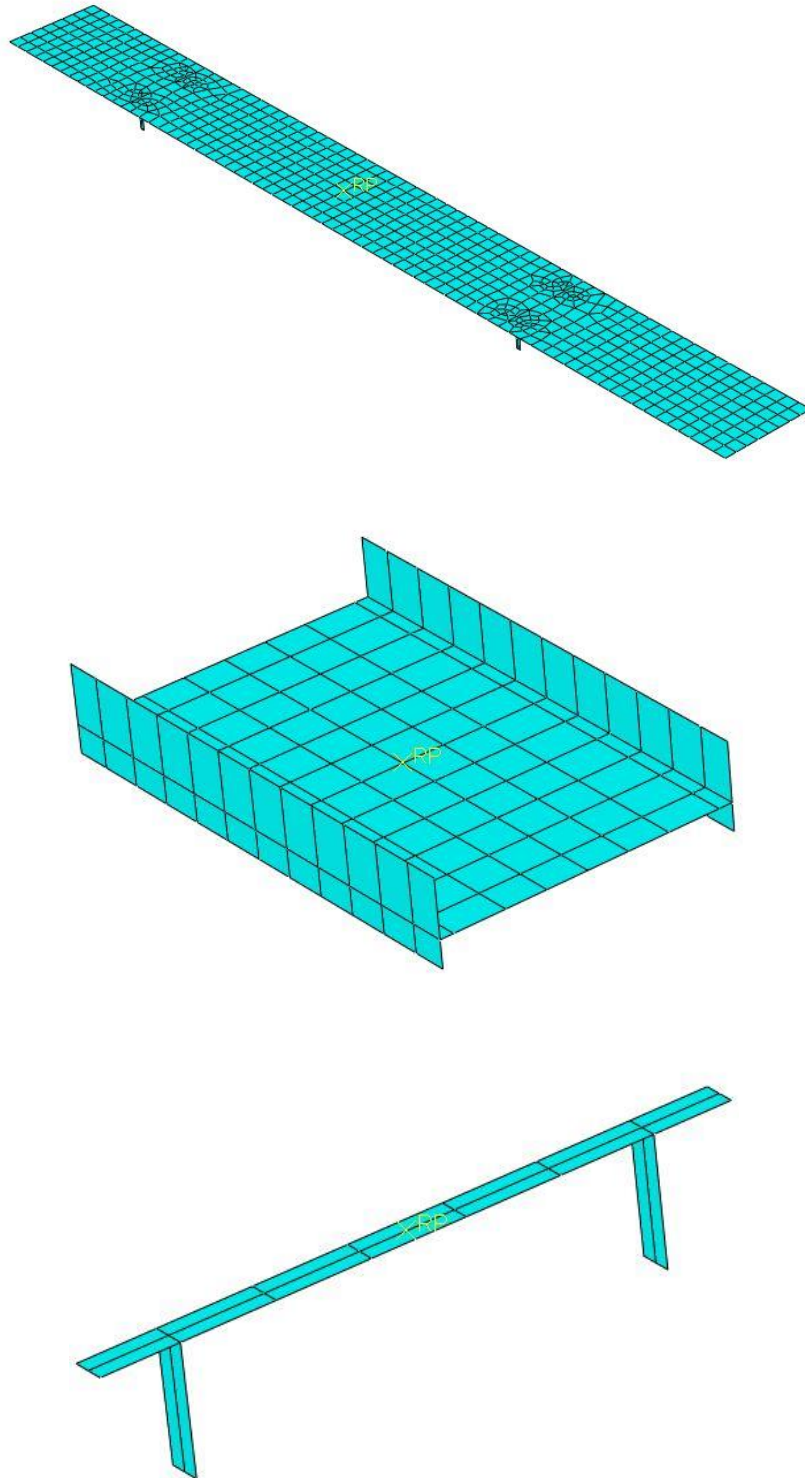
شکل ۳-۱۴: مدل بدنه واگن.



شکل ۳-۱۵: مدل کامل بدنه و بوژی‌ها و محورهای لوکوموتیو.



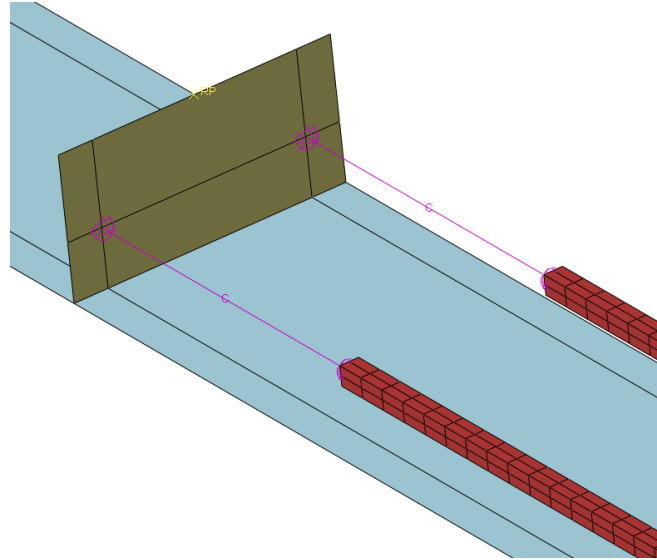
شکل ۳-۱۶: مدل کامل بدنه و بوژی‌ها و محورهای واگن.



شکل ۳-۱۷: الگوی مش‌بندی اجزا قطار.

۳-۹-۱-۵- صفحات جاذب ارتعاش انتهایی ریل

این صفحات صرفاً برای میرایی ارتعاش انتهایی ریل مدل‌سازی شده و به صورت غشایی و بدون مصالح مدل شده‌اند. صفحات جاذب داری عرض ۲ متر و ارتفاع ۱ متر می‌باشد که در شکل ۳-۱۸ نمایش داده شده‌است.



شکل ۳-۱۸: صفحه جاذب ارتعاش

۳-۹-۲- محیط Property

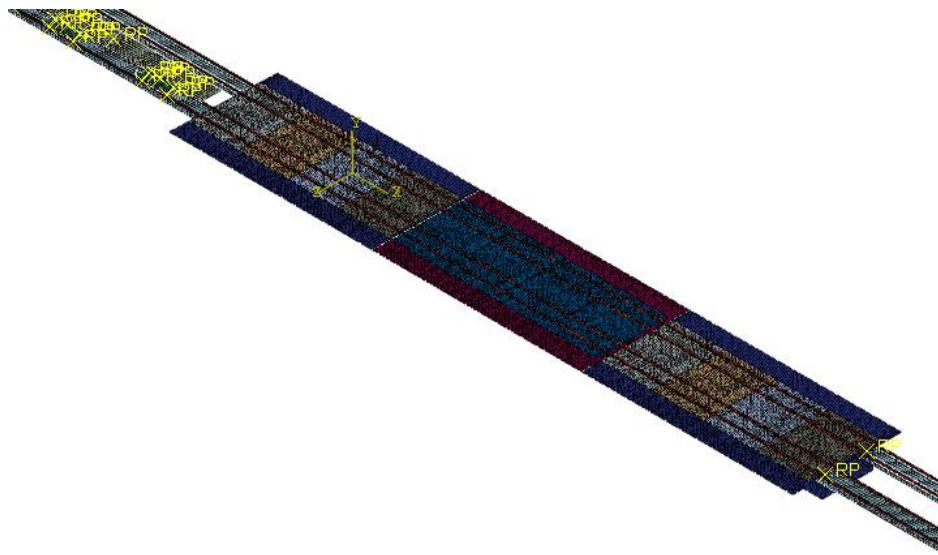
در این محیط خصوصیات مصالح تعریف می‌شوند و سپس این خصوصیات به پارتهای مربوطه اختصاص داده می‌شوند. خصوصیات مصالح شامل: جرم مخصوص، ضریب پواسن، مدول الاستیسیته و میرایی می‌باشد که در جدول ۳-۱ آورده شده‌است.

| اجزاء مدل | جرم مخصوص (kg/m^3) | ضریب پواسن | مدول الاستیسیته (mpa) | میرایی |
|----------------|------------------------|------------|-----------------------|--------------------------------------|
| بتن عرشه پل | ۲۴۰۰ | ۰,۱۶۷ | ۶۵۰۰۰ | $\alpha = 0,929$ $\beta = 0,0007$ |
| بتن دالخط بتنی | ۲۵۰۰ | ۰,۱۶۷ | ۲۵۰۰۰ | - |
| بتن نردبانی | ۳۹۵۴,۷ | ۰,۱۶۷ | ۲۸۳۰۰ | - |
| بالاست | ۱۹۰۰ | ۰,۳ | ۳۰۰ | - |
| تراورس | ۲۵۰۰ | ۰,۱۵ | ۲۹۰۰۰ | - |
| ریل | ۷۸۵۰ | ۰,۳ | ۲۱۰۰۰۰ | - |

جدول ۳-۱: خصوصیات مصالح

۳-۹-۳- محیط Assembly

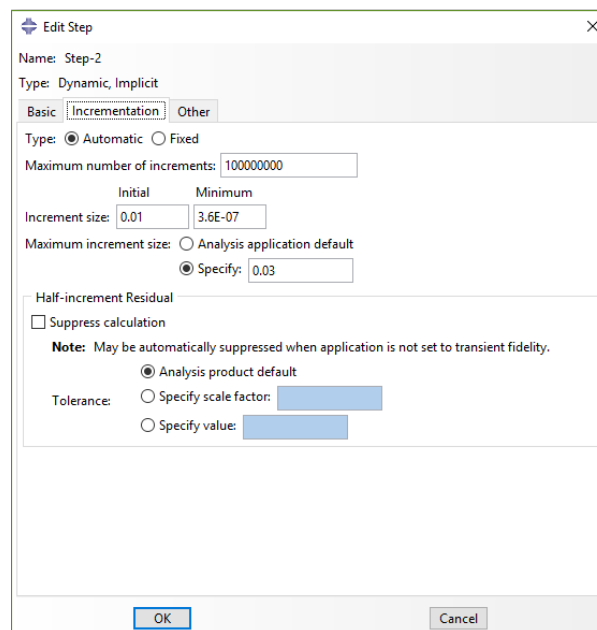
در محیط اسمبلی موقعیت هندسی اجزاء مدل تعیین می‌شود. در واقع در این محیط پارت‌های تشکیل دهنده مدل کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و مدل مونتاژ می‌گردد. در شکل ۳-۱۹ نمونه مدل مونتاژ شده نشان داده شده‌است.



شکل ۳-۱۹: نمونه مدل مونتاژ شده

۳-۹-۴- محیط Step

در این محیط نوع حل‌گرها انتخاب می‌شود و اندازه حداکثر و حداقل گام زمانی برای تحلیل مدل مشخص می‌گردد. در این تحقیق از حل‌گر Dynamic/ Explicit که تحلیل دینامیکی با کنترل شروط همگرایی بین گام‌های زمانی را انجام می‌دهد، استفاده شده‌است. اندازه گام‌های زمانی با توجه به سرعت حرکت قطار، ۳۰ سانتی‌متر پیش‌روی در حرکت قطار در نظر گرفته شده‌است. منوی Step در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده‌است.



شکل ۳-۲۰: تنظیمات منوی Step

۳-۹-۵- محیط Interaction

در این محیط خاصیت فیزیکی تماس بین سطوح مشخص می‌گردد. تماس بین ریل و روسازی که در عمل توسط پابند زیر ریل به وجود می‌آید، به صورت یک فتر دو نقطه‌ای با سختی N/m $2,4 \times 10^9$ و میرایی 248000 Nm/s مدل‌سازی شده‌است.

۳-۹-۵-۱- المان‌های فنری میرا

شاید بتوان ارتعاشات را یکی از مهمترین پدیده‌های طبیعت به شمار آورد. پهنه وسیعی از پدیده‌ها مانند نوسانات آونگ، امواج صوت و نور در گروه ارتعاشات مادی- نیمه‌مادی قرار می‌گیرند. در میان انواع مختلف ارتعاشات، ارتعاشات مکانیکی به‌شدت مورد توجه محققین حوزه مکانیک قرار دارد؛ زیرا بیشترین نمود مادی را به نسبت سایر انواع آن داراست.

به‌طور کلی سیستم‌های مکانیکی را می‌توان با سه نوع المان مدل‌سازی نمود:

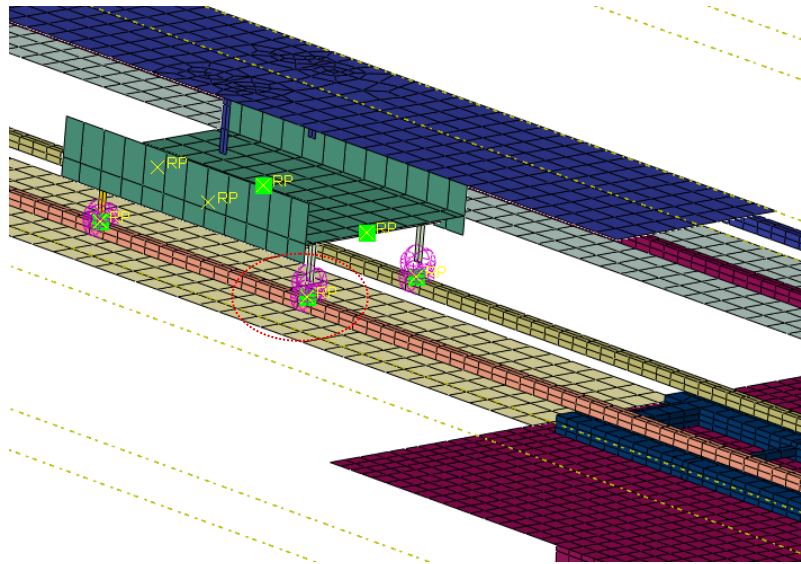
- فنر^۱
- میراکننده لزج یا دمپر^۲
- جرم

نیروهای ایجاد شده در این اعضا به ترتیب با جابجایی، سرعت و شتاب ارتباط دارند. با توجه به توضیحات فوق، فنر و دمپر (میراگر) از مهمترین اجزای یک سیستم ارتعاشی به شمار می‌رود. المان فنر وظیفه ذخیره‌سازی انرژی پتانسیل را دارد و بدون جرم فرض می‌شود و تنها فاکتور مهم آن، خاصیت الاستیسیته است. در نقطه مقابل، میراگر انرژی سیستم را به صورت گرما و اصطکاک^۳ تلف می‌کند و نیروی ایجاد شده در آن متناظر با اختلاف سرعت در دو انتهای آن است. مدل‌سازی فنر در نرم‌افزار آباکوس تنها با انتخاب دو نقطه و وارد کردن مشخصات سختی و میرایی فنرها به راحتی قابل اعمال خواهد بود.

۳-۹-۵-۲- مدل‌سازی اندرکنش (اندرکنش بین چرخ و ریل)

به منظور انتقال نیرو بین چرخ و ریل از فنر هرتز مطابق با تئوری هرتز استفاده گردیده‌است. سپس بین نقاط هرتز و سطح پل و صفحه معادل خاک، اندرکنشی با خاصیت تماسی سخت برای انتقال این نیرو در نظر گرفته شده‌است (شکل ۳-۲۱).

^۱Spring
^۲Dashpot
^۳Friction



شکل ۳-۲۱: فنرهای هرتز و اندرکنش آن‌ها با ریل.

۳-۹-۵-۳- سختی معادل فنر هرتز

به منظور تعیین میزان سختی فنر هرتز به صورت زیر عمل شده‌است:

$$K_h = \left[\frac{\epsilon G^2 P R_e}{(1-\nu)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3-3)$$

در رابطه فوق:

G مدول برشی، P نیروی تماسی و ν ضریب پواسان می‌باشد.

$$R_e = \sqrt{R_1 R_2}$$

در رابطه فوق R_1 شعاع چرخ بوده و:

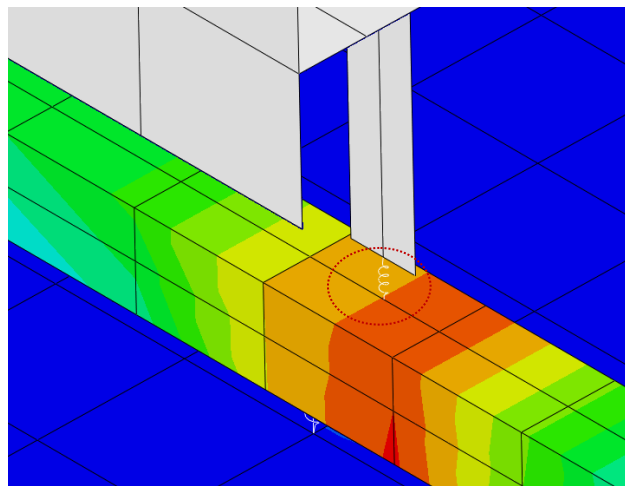
$$R_2 = Kr$$

$$K = \frac{\rho}{1-\rho}$$

و ρ شعاع پروفیل چرخ می‌باشد.

با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده در مورد مدل‌سازی تماس بین چرخ و ریل از از فنرهای هرتز با سختی K_h حاصل از رابطه فوق استفاده شده‌است.

در پژوهش حاضر از فنرها در مدل‌سازی فنرهای هرتز، فنرهای افقی و عمودی بین چرخ و بوژی، فنرهای افقی و عمودی بین بوژی و بدنه قطار استفاده شده‌است [۳۹]. شکل ۳-۲۲ نمونه‌ای از فنر هرتز مورد استفاده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲۲: نمونه‌ای از فنرهای هرتز.

۳-۹-۵-۴- ضریب بار^۲

در تحلیل‌های استاتیکی خطی، بار یا شرایط مرزی اعمالی به گره‌ها مستقیماً در دستگاه معادلات وارد شده و مسئله با یک نمو حل می‌شود. اما در مسائل دینامیکی و استاتیکی غیرخطی تحلیل به صورت نموی^۳ انجام می‌شود. در این حالت متناسب با نموها بار یا شرایط مرزی اعمالی افزایش می‌یابد. این افزایش به صورتی است که در شروع تحلیل مقدار بار یا شرایط مرزی برابر صفر و در پایان تحلیل برابر با مقدار وارد شده‌است و در طول زمان به صورت خطی تغییر می‌کند. در پژوهش حاضر ضرایب بار برای اعمال بارگذاری و شرایط مرزی سرعت مورد استفاده قرار گرفته‌است که بار و سرعت را به تدریج به صورت خطی از صفر به مقدار مورد نظر می‌رساند. همانطور که در نمودار ۳-۱ و نمودار ۳-۲ مشخص می‌باشد بار در عرض یک ثانیه و سرعت در

^۲Hertz Spring

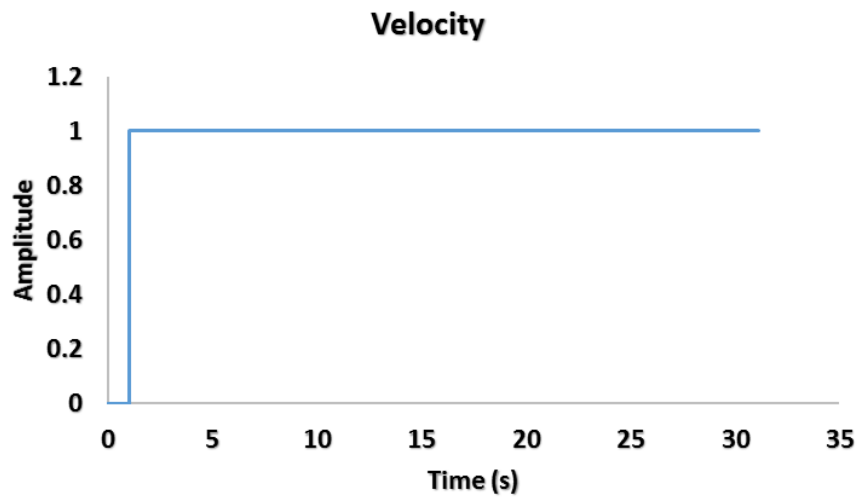
^۳Amplitude

^۴Incremental

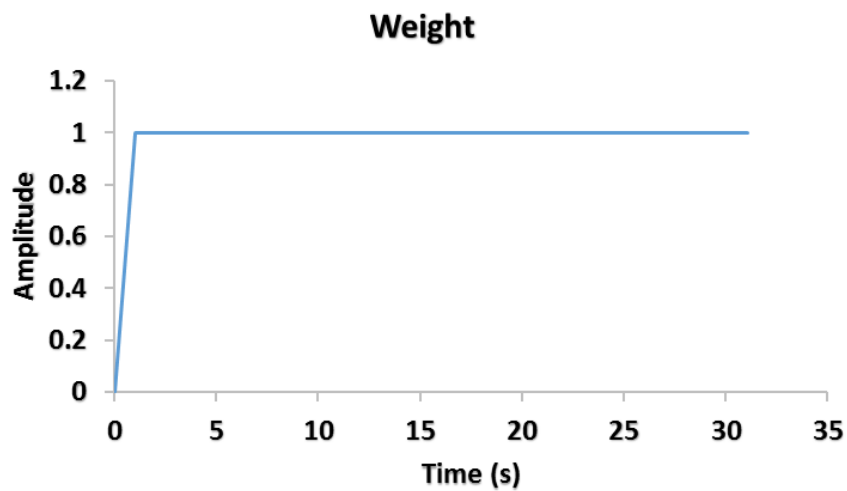
عرض ۱,۰۱ ثانیه به وسیله نقلیه اعمال شده‌است.

الگوی اعمال سرعت به این شکل می‌باشد که تا ثانیه یک هیچ گونه سرعتی به قطار اعمال نشده، سپس

به یکباره در عرض ۰,۰۱ ثانیه سرعت به قطار اعمال گردیده‌است.



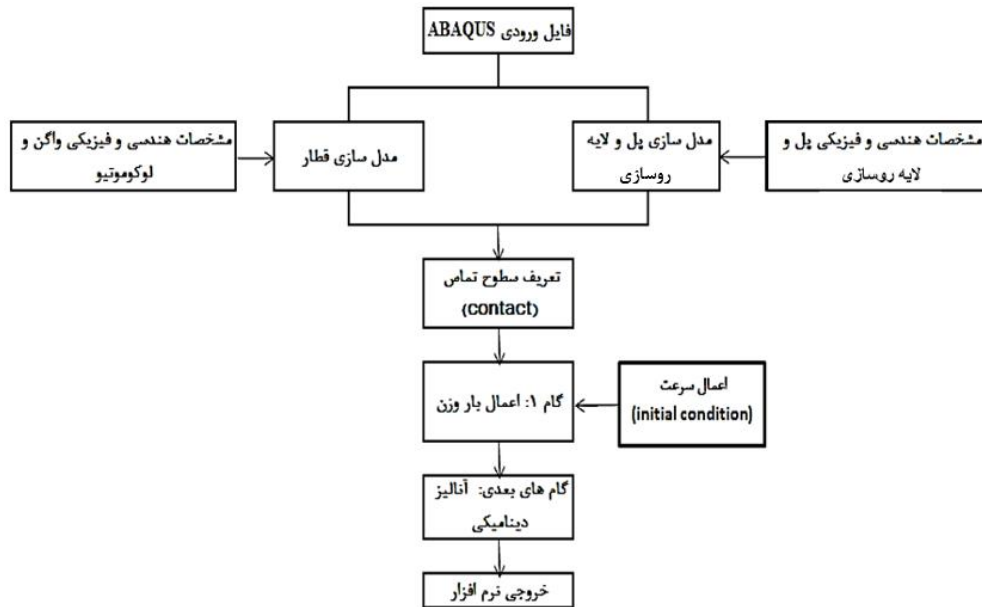
نمودار ۳-۱: روند اعمال سرعت در طول زمان تحلیل.



نمودار ۳-۲: روند اعمال بار در طول زمان تحلیل.

۳-۹-۵-۵- اندرکنش پل و قطار در نرم‌افزار آباکوس

برای در نظر گرفتن اندرکنش بین پل و قطار در نرم‌افزار آباکوس می‌توان سطوح تماس را با استفاده از مدل تماس تعریف کرد. پروسه حل مسئله با نرم‌افزار در نمودار ۳-۳ نشان داده شده‌است.



نمودار ۳-۳: پروسه حل اندرکنش پل و قطار در نرم‌افزار آباکوس [۳۴].

۳-۹-۶- محیط Load

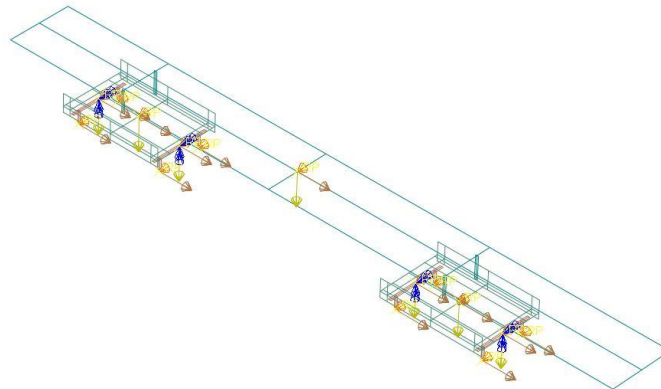
در این محیط علاوه بر بارگذاری مدل، شرایط مرزی نیز تعیین می‌گردد. مفهوم بار در مهندسی عمران در اصل به معنای نیروهای وارده بر سازه است.

۳-۹-۶-۱- بارگذاری

بار سازه‌ای به معنی نیروها، تغییرشکل‌ها یا شتاب‌هایی است که به یک سازه و یا اجزای آن وارد می‌شود. بارگذاری بر اساس استانداردها و آئین‌نامه‌ها و یا درخواست کارفرما قابل اعمال می‌باشد. نرم‌افزار آباکوس به راحتی قابلیت اعمال این بارها را دارد و محتوای انواع بارگذاری‌ها می‌باشد که در اینجا به چند نوع پرکاربرد آن اشاره می‌کنیم.

- نیروی متمرکز^۱
- گشتاور^۲
- بار فشاری^۳
- نیروی وارد بر خط
- نیروهای حجمی^۴
- نیروی حجمی چرخشی

در میان انواع بارهای اشاره شده، در پژوهش حاضر از بار وزن در بار مرده پل و بار متمرکز در مرکز ثقل تک تک اجزای قطار استفاده شده‌است که به صورت مجموعه‌ای از بارهای متحرک در طول پل در حرکت هستند. شکل ۳-۲۳ بارگذاری وسیله نقلیه ریلی در مرکز ثقل بدنه، بوژی‌ها و چرخ‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲۳: بارگذاری در مرکز ثقل بدنه، بوژی‌ها و چرخ‌ها.

در این تحقیق سه نوع بار محوری ۱۴، ۲۰ و ۲۵ تن بر پل موردنظر وارد شده‌است که جزئیات آن به شرح جداول ۳-۲ تا ۳-۴ می‌باشد.

^۱Concentrated Force

^۲Moment

^۳Pressure

^۴Body Force

| اجزاء قطار | بار (N) |
|----------------|---------|
| بدنه لوکوموتیو | ۶۳۹۸۸۰ |
| بدنه واگن | ۴۳۸۱۶۰ |
| بوژی لوکوموتیو | ۳۴۳۴۰ |
| بوژی واگن | ۳۰۴۰۰ |
| چرخ | ۱۷۷۶۰ |

جدول ۳-۲: مقادیر بار ۱۴ تنی اعمال شده در واگن و لوکوموتیوها.

| اجزاء قطار | بار (N) |
|----------------|---------|
| بدنه لوکوموتیو | ۶۵۶۲۸۷ |
| بدنه واگن | ۶۱۴۹۶۱ |
| بوژی لوکوموتیو | ۳۵۲۲۰,۵ |
| بوژی واگن | ۴۲۶۶۶,۷ |
| چرخ | ۱۷۷۶۰ |

جدول ۳-۳: مقادیر بار ۲۰ تنی اعمال شده در واگن و لوکوموتیوها.

| اجزاء قطار | بار (N) |
|----------------|---------|
| بدنه لوکوموتیو | ۸۲۰۳۵۹ |
| بدنه واگن | ۷۶۸۷۰۲ |
| بوژی لوکوموتیو | ۴۴۰۲۵,۶ |
| بوژی واگن | ۵۳۳۳۳,۳ |
| چرخ | ۱۷۷۶۰ |

جدول ۳-۴: مقادیر بار ۲۵ تنی اعمال شده در واگن و لوکوموتیوها.

۳-۹-۶-۲- شرایط مرزی^۱

مسئله مقدار مرزی عنوان دسته‌ای از مسائل ریاضیات است که در آن‌ها به حل معادلات دیفرانسیلی می‌پردازد که پاسخ معادله می‌باید در نقاط مرزی یک مجموعه مفروض، شرایط مشخص شده را دارا باشد. به

^۱Boundary Condition

عنوان مثال وقتی در یک مسئله‌ای شرایط مرزی اعمال می‌شود، می‌توان در نقاط مشخصی تغییراتی نظیر مقید شدن، جابجایی، سرعت و غیره را اعمال کرد و مسئله را بر پایه این شرایط حل کرد [۳۹]. بسته به نوع تحلیل شرایط مرزی متفاوتی در نرم‌افزار آباکوس قابل اعمال می‌باشد که به چند نمونه پرکاربرد آن می‌پردازیم.

- شرایط مرزی متقارن و غیر متقارن
- شرایط مرزی جابجایی طولی / جابجایی دورانی
- شرایط مرزی سرعت / سرعت زاویه‌ای
- شرایط مرزی شتاب / شتاب زاویه‌ای

در پژوهش حاضر شرایط مرزی به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفت:

۱. شرط مرزی از نوع Displacement/ Rotation که درجه آزادی جابجایی در یک سر عرشه را در سه جهت و در طرف دیگر در سه جهت می‌بندد.
۲. شرط مرزی از نوع Displacement/ Rotation که تمامی ۶ درجه آزادی صفحه خارجی زیر ریل را می‌بندد.
۳. شرط مرزی از نوع Displacement/ Rotation که تمامی ۶ درجه آزادی ریل در خارج از خط را می‌بندد.
۴. شرط مرزی از نوع Displacement/ Rotation که درجه آزادی تغییر مکان افقی ریل در محدوده خط در جهت عمود بر خط را می‌بندد. این شرط به منظور جلوگیری از کمانش ریل زیر باز چرخ اعمال می‌شود.
۵. شرط مرزی از نوع Displacement/ Rotation که درجه آزادی جابجایی در امتداد عمود بر جهت حرکت را برای بدنه وسیله نقلیه، بوژی‌ها، چرخ‌ها را می‌بندد.
۶. شرط مرزی از نوع Displacement/ Rotation که درجه آزادی تغییر مکان افقی نقطه اعمال بار در جهت عمود بر خط را می‌بندد.

۷. شرط مرزی از نوع Velocity/ Angular Velocity که سرعت موردنظر وسیله نقلیه را بر بدنه، بوژی‌ها و چرخ‌های وسیله نقلیه اعمال می‌کند.

۸. شرط مرزی از نوع Displacement/ Rotation که تمامی ۶ درجه آزادی صفحه میراکننده را می‌بندد.

در آباکوس برای تعیین یک شرط مرزی، ابتدا هندسه مورد نظر از قبیل نقطه، خط، صفحه و یا حجم انتخاب می‌شود و سپس درجه آزادی مورد نظر مقید می‌شود.

۳-۹-۷- محیط Mesh

مرحله‌ای است که در آن گسسته‌سازی مدل هندسی انجام می‌پردازد که برای این امر ماژول Mesh برای تولید مش اجزای محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این طریق می‌توانید تکنیک مش‌بندی را برای نرم‌افزار در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی مشخص کرد تا شکل المان و نوع المان مطابق نیاز باشد. که در حالت سه‌بعدی المان‌ها به چهار صورت زیر توزیع می‌شوند:

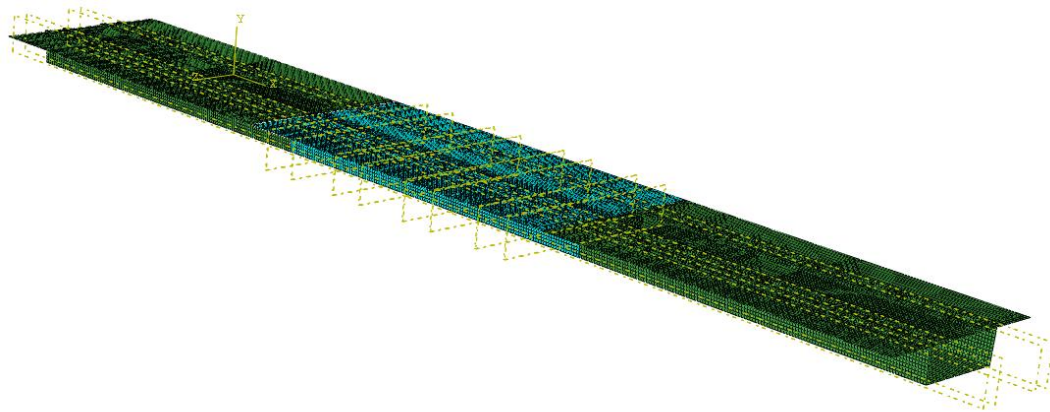
- Hex: شش وجهی

- Tet: چهار وجهی

- Wedge: پنج وجهی

- Hex-dominated: شش وجهی غالب

لازم به ذکر می‌باشد که اندازه مش انتخاب‌شده برای عرشه پل و روسازی‌ها برابر ۲۰ سانتی‌متر و برای پارت‌های قطار برابر ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. در شکل ۳-۲۵، مش‌بندی کامل عرشه پل نشان داده شده‌است.



شکل ۳-۲۵: مدل مش‌بندی کامل پل.

۳-۹-۸- محیط Job

در این محیط تنظیمات مربوط به اجرای حل مسئله انجام شده و مدل ایجادشده تحلیل می‌گردد.

۳-۹-۹- محیط Visualization

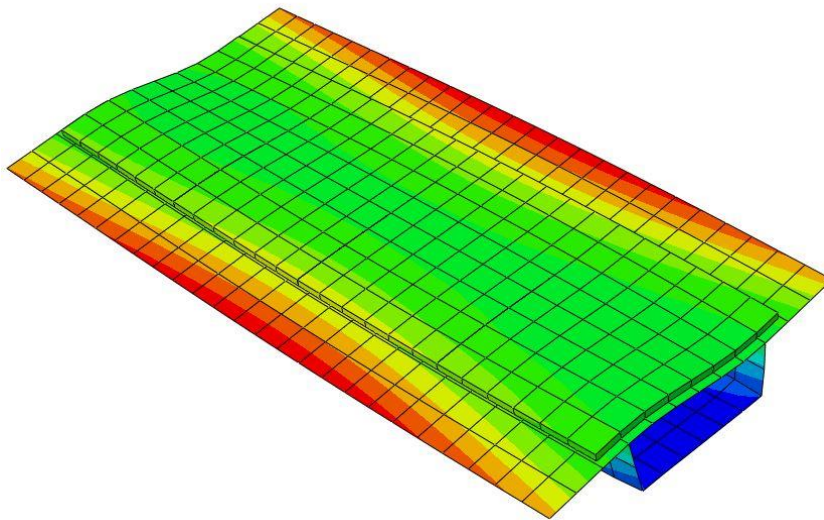
در این محیط نتایج خروجی‌های تعیین شده در محیط Step قابل مشاهده می‌باشد.

۳-۱۰-۱- اعتبار سنجی مدل

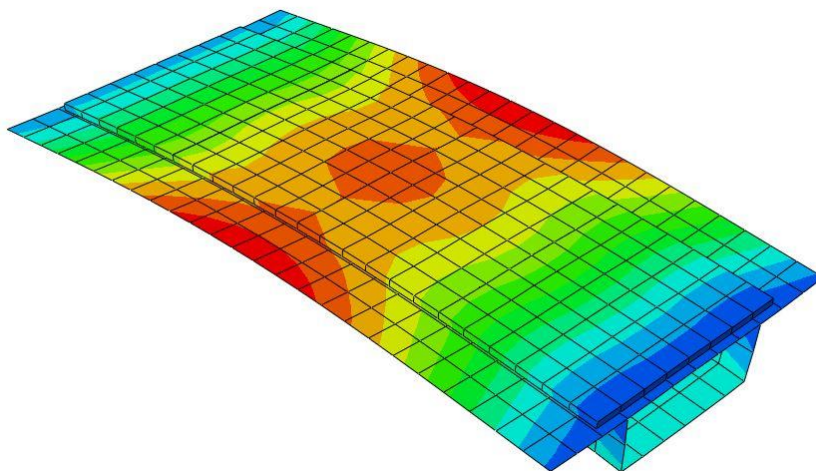
اعتبارسنجی مدل‌سازی در دو بخش انجام می‌پذیرد؛ یکی در بخش آنالیز مدال که علاوه بر تعیین ابعاد بهینه برای مش‌بندی مدل نهایی، فرکانس مدهای سازه‌ای تغییرشکل پل در مدل المان محدود با مقادیر حاصل از تست‌های میدانی مقایسه می‌گردند و در بخش دو نتایج جابجایی پل در مدل و در تست میدانی با یکدیگر مقایسه می‌گردد.

۳-۱۰-۱- آنالیز مدال

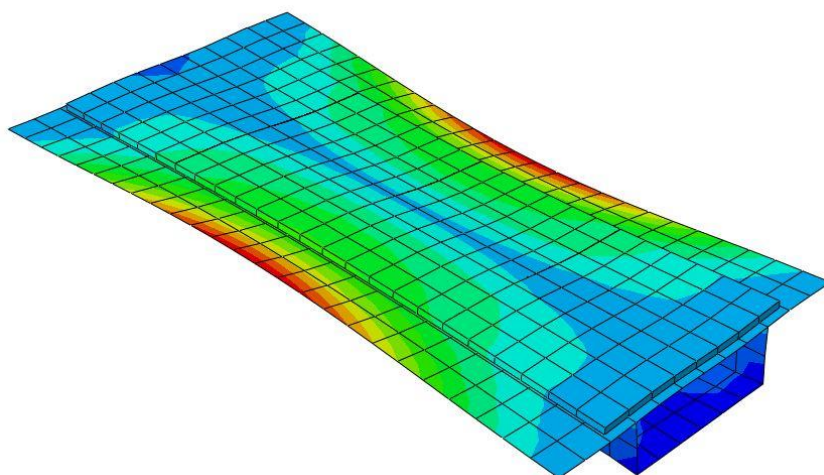
به منظور دست یافتن به اندازه بهینه مش، آنالیز مدال این پل با ماکزیمم ابعاد مش بیان شده در جدول (۳-۵) صورت پذیرفته است. در شکل‌های ۳-۲۶ الی شکل ۳-۳۱ اشکال مدی مد اول تا ششم و در شکل‌های ۳-۳۲ تا ۳-۴۱ ابعاد مش بندی پل مورد نظر ارائه می‌گردد.



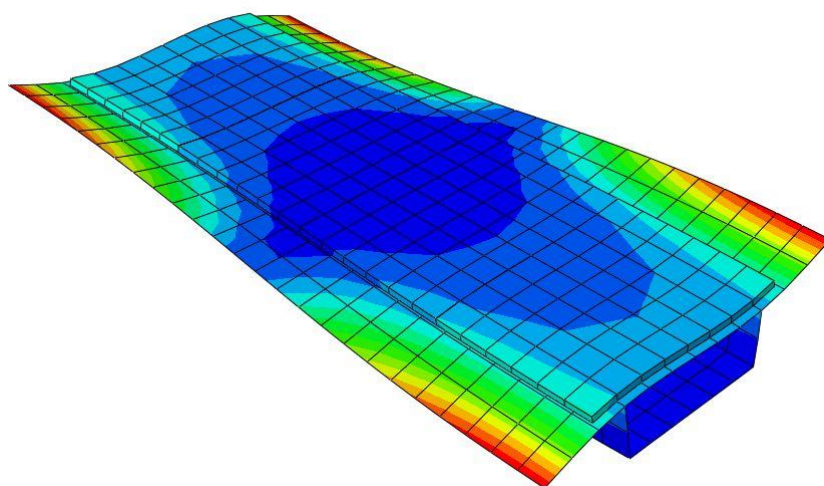
شکل ۳-۲۶: شکل مدی عرشه پل در مد اول



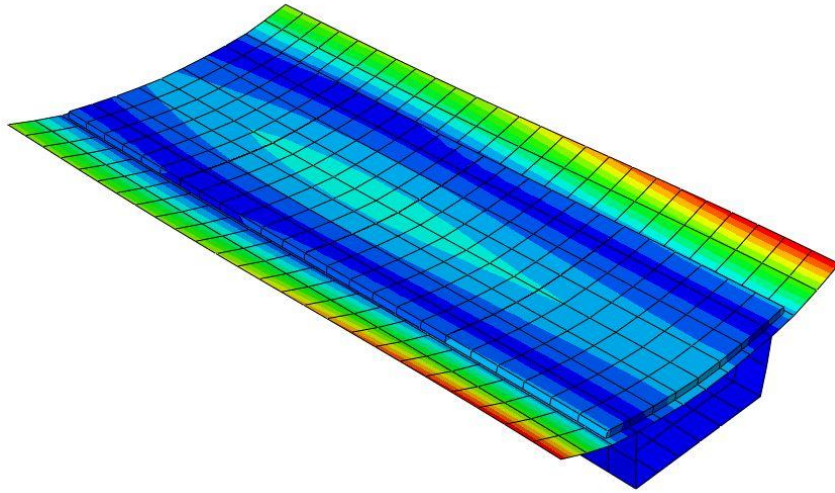
شکل ۳-۲۷: شکل مدی عرشه پل در مد دوم



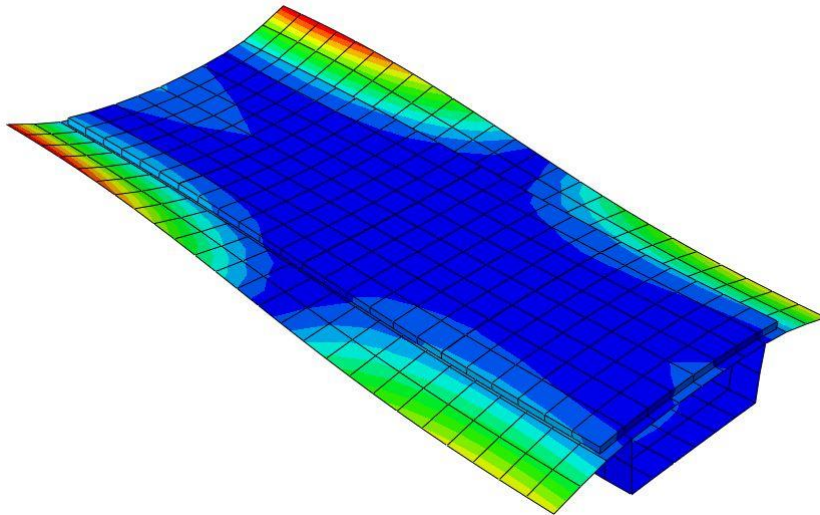
شکل ۳-۲۸: شکل مدی عرشه پل در مد سوم



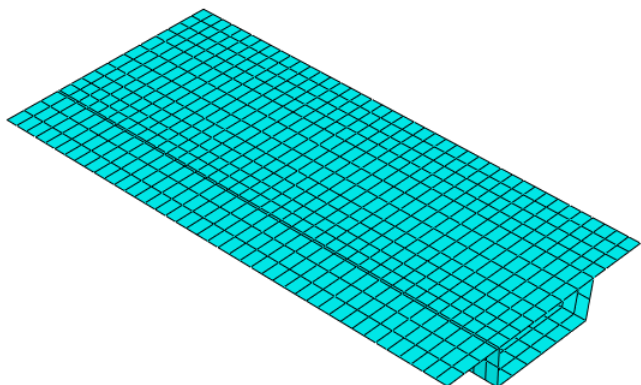
شکل ۳-۲۹: شکل مدی عرشه پل در مد چهارم



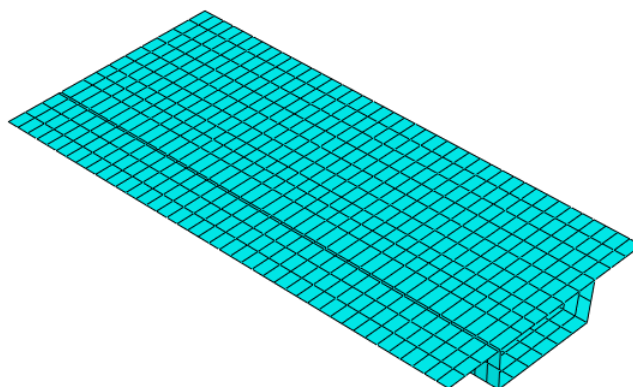
شکل ۳-۳۰: شکل مدی عرشه پل در مد پنجم



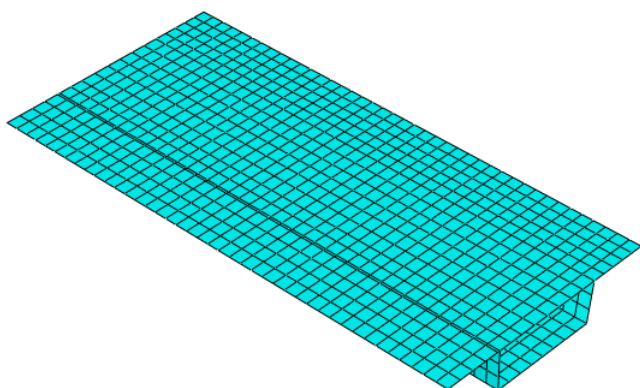
شکل ۳-۳۱: شکل مدی عرشه پل در مد ششم



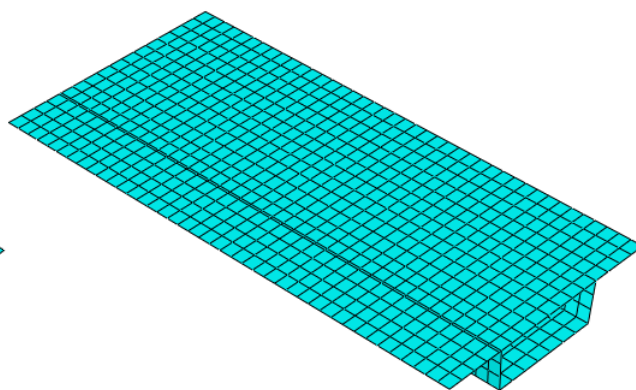
شکل ۳-۳۳: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۹۰ سانتی‌متری.



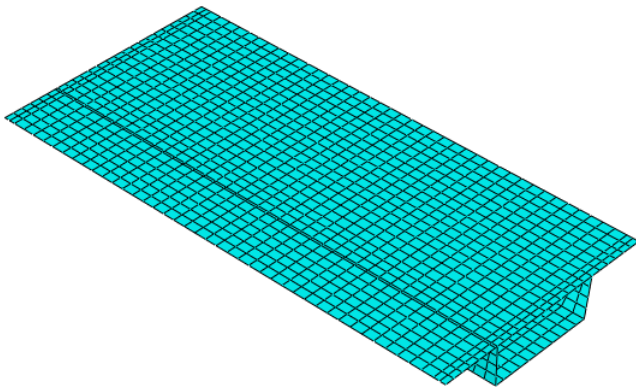
شکل ۳-۳۲: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۱۰۰ سانتی‌متری.



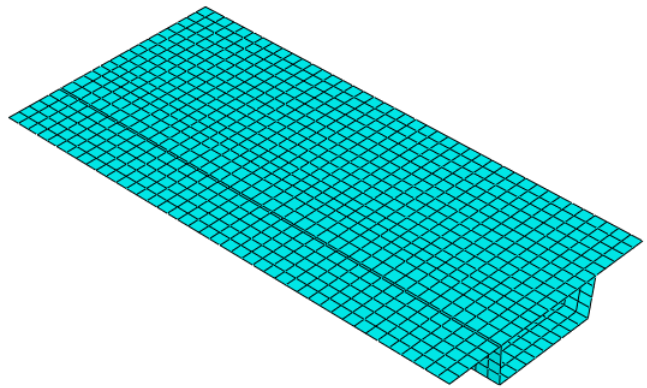
شکل ۳-۳۵: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۷۰ سانتی‌متری.



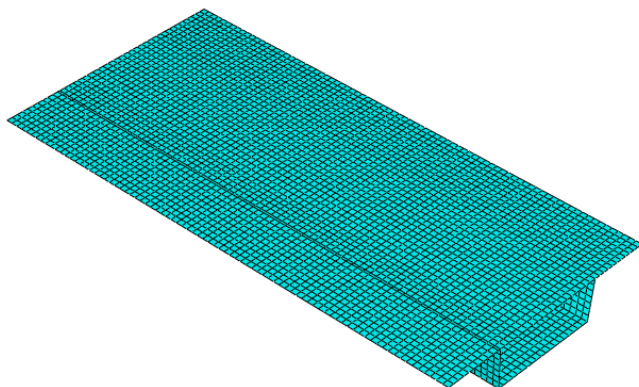
شکل ۳-۳۴: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۸۰ سانتی‌متری.



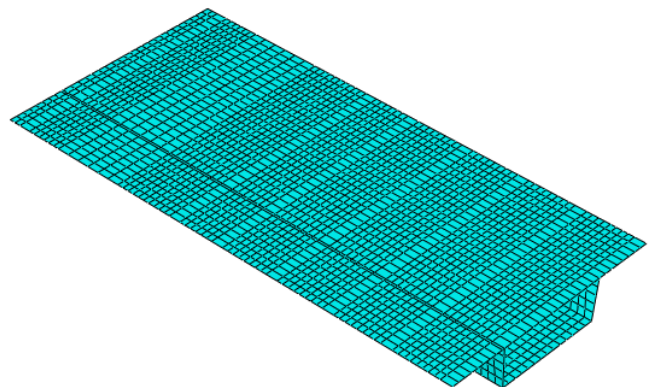
شکل ۳-۳۷: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۵۰ سانتی‌متری.



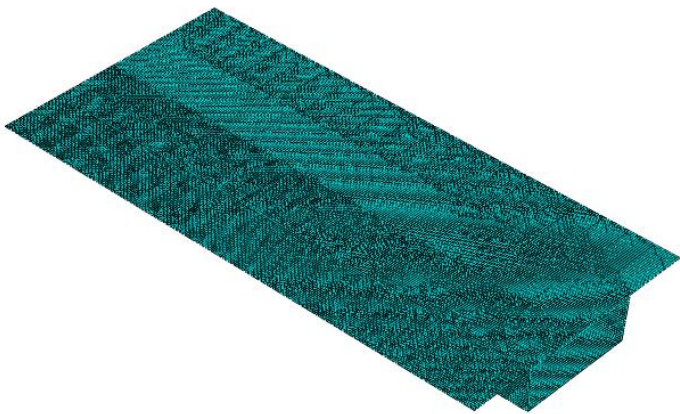
شکل ۳-۳۶: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۶۰ سانتی‌متری.



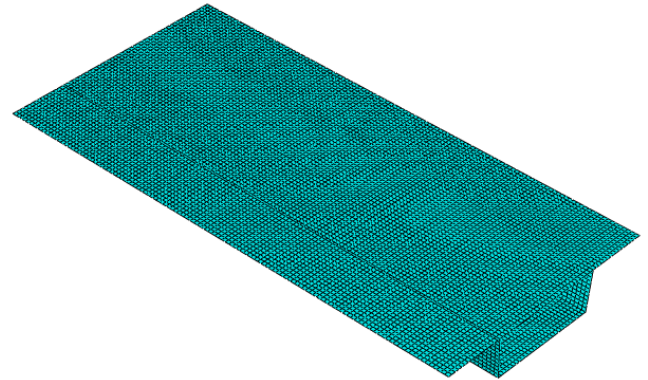
شکل ۳-۳۹: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۳۰ سانتی‌متری.



شکل ۳-۳۸: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۴۰ سانتی‌متری.



شکل ۳-۴۱: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۱۰ سانتی‌متری.



شکل ۳-۴۰: مدل مش‌بندی شده با ابعاد مش ۲۰ سانتی‌متری.

با توجه به جدول ۳-۵، به دلیل تغییرات تقریباً ثابت فرکانس در مش ۲۰ سانتی‌متری، این اندازه مش به عنوان اندازه مش بهینه و غالب در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز مدال، فرکانس‌های مدل با مش ۲۵ سانتی‌متری نسبت به مدل با مش ۲۰ سانتی‌متری کمتر از ۰,۳ درصد تفاوت داشته و در ادامه جهت انجام بارگذاری بار مرده سازه و بار زنده قطار از مدل با مش ۲۰ سانتی‌متر استفاده می‌گردد.

| Mode | ۱ ^{۰۰} | ۲ ^{۰۰} | ۳ ^{۰۰} | ۴ ^{۰۰} | ۵ ^{۰۰} | ۶ ^{۰۰} |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 100cm | 7.8297 | 9.3088 | 20.2890 | 21.6250 | 22.4690 | 22.7030 |
| 95cm | 7.8263 | 9.3016 | 20.2840 | 21.6230 | 22.4670 | 22.7010 |
| 90cm | 7.8043 | 9.3077 | 20.2060 | 21.5330 | 22.5960 | 22.8390 |
| 85cm | 7.7784 | 9.3492 | 20.0450 | 21.5380 | 22.4470 | 22.7650 |
| 80cm | 7.7595 | 9.3344 | 20.0430 | 21.4970 | 22.2840 | 22.6150 |
| 75cm | 7.7356 | 9.3306 | 19.9930 | 21.4520 | 22.3100 | 22.6080 |
| 70cm | 7.7361 | 9.3285 | 20.0430 | 21.5210 | 22.3990 | 22.7260 |
| 65cm | 7.7236 | 9.3225 | 20.0370 | 21.5290 | 22.4310 | 22.7360 |
| 60cm | 7.7006 | 9.3332 | 19.9900 | 21.5350 | 22.4020 | 22.7270 |
| 55cm | 7.7036 | 9.3345 | 20.0680 | 21.5780 | 22.5370 | 22.8370 |
| 50cm | 7.7028 | 9.3337 | 20.0890 | 21.6150 | 22.5910 | 22.8900 |
| 45cm | 7.6739 | 9.3287 | 20.0250 | 21.5840 | 22.5170 | 22.8310 |
| 40cm | 7.6618 | 9.3212 | 20.0070 | 21.5780 | 22.5000 | 22.8210 |
| 35cm | 7.6488 | 9.3192 | 20.007 | 21.5840 | 22.5240 | 22.8340 |
| 30cm | 7.6312 | 9.3144 | 19.9900 | 21.5830 | 22.5180 | 22.8280 |
| 25cm | 7.6145 | 9.3100 | 19.9780 | 21.5710 | 22.5010 | 22.8080 |
| 20cm | 7.5963 | 9.3051 | 19.9640 | 21.5710 | 22.4980 | 22.8020 |
| 15cm | 7.6616 | 9.3096 | 20.0680 | 21.8490 | 22.8300 | 23.0630 |
| 10cm | 7.6543 | 9.3033 | 20.0760 | 21.8900 | 22.8870 | 23.0950 |

جدول ۳-۵: نتایج آنالیز مدال به جهت محاسبه اندازه مش غالب در محاسبات.

۳-۱۰-۲- صحت‌سنجی

به منظور همگام‌سازی و صحت‌سنجی نتایج تحلیلی نرم‌افزار آباکوس، از نتایج تحلیل تجربی آقای شیا^۱ و همکاران استفاده شده است [۳۵]. این تحلیل در سال ۲۰۰۵ به درخواست وزارت راه‌آهن چین و به منظور ارزیابی پاسخ دینامیکی پل‌های راه‌آهن این کشور تحت عبور وسایط نقلیه ریلی سریع‌السیر ترتیب داده شده است. پل مورد بررسی، یعنی پل رودخانه‌ای Gouhe بخشی از شبکه خط‌آهن سریع‌السیر و مسافربری ویژه شین‌شِن^۲ می‌باشد. قطار مورد بررسی نیز، قطار سریع‌السیر ساخت کشور چین به نام چایناستار^۳ بوده که دارای دو لوکوموتیو و نه واگن بوده و حداکثر سرعت آزمایشی ثبت شده برابر ۳۲۱ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. هدف از انجام این آزمایش بررسی تغییرشکل‌ها، جابجایی‌ها، شتاب‌ها و کرنش‌ها و همچنین ایمنی سیر و پارامترهای پایداری وسیله نقلی ریلی بوده است. برای استخراج این داده‌ها از یک سری سنسورها

^۱H. Xia

^۲Qin- Shen

^۳China- Star

استفاده شد که در محل‌های خاص نصب شده و هرکدام وظیفه استخراج یک نوع از داده‌ها را دارا می‌باشد (شکل ۳-۴۲). علائم اختصاصی و نوع داده استخراج شده توسط هر سنسور به صورت زیر می‌باشد:

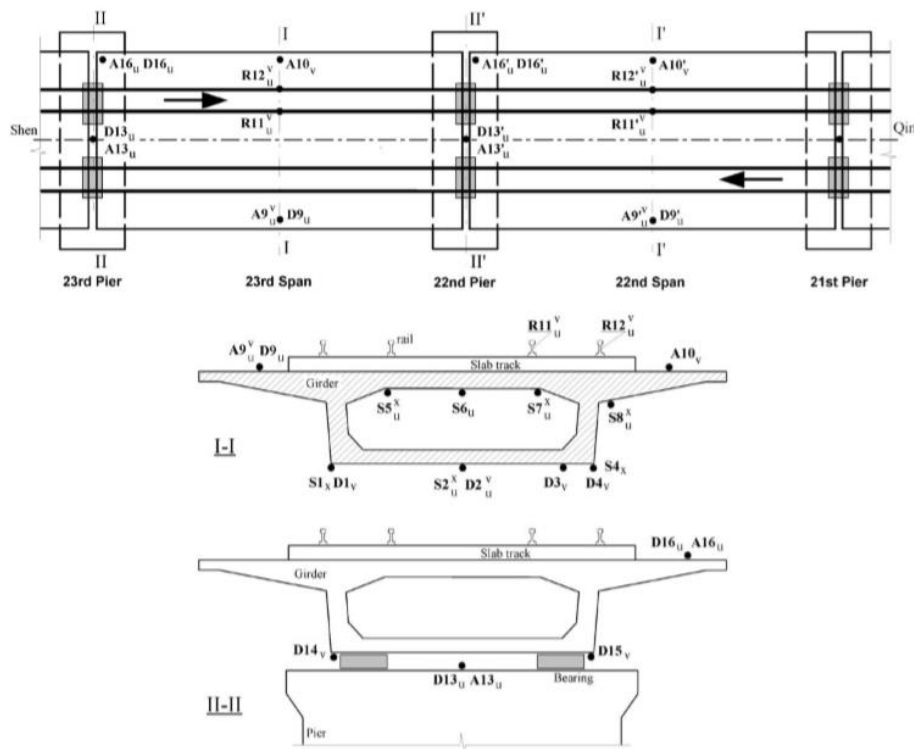
A: نمایش‌دهنده اندازه شتاب

D: نمایش‌دهنده اندازه تغییرشکل یا جابجایی

S: نمایش‌دهنده کرنش

R: نمایش‌دهنده نیروی وارد بر ریل

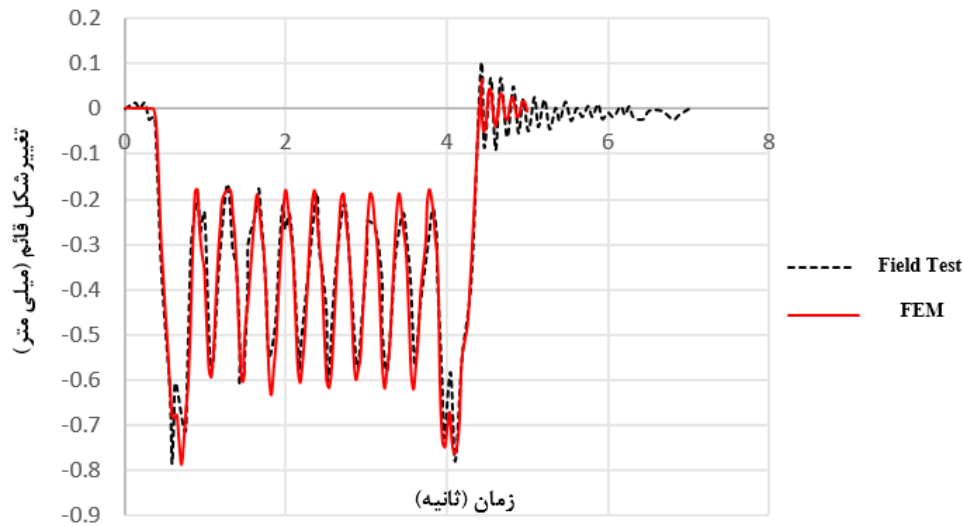
در زیر محل جانمایی سنسورها را مشاهده می‌نمایید.



شکل ۳-۴۲: محل سنسورها در آزمایش میدانی [۳۵].

در این آزمایش، اندازه‌گیری‌ها در سرعت مبنای ۲۶۰ کیلومتر بر ساعت انجام شده‌است که آنالیز عددی صحت‌سنجی این جانب نیز بر همین مبنا می‌باشد. در ادامه میزان مطابقت نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز عددی با آزمایش‌های محلی نشان داده شده‌است. لازم به ذکر می‌باشد که در نمودار ۳-۴، منحنی‌ای که به صورت خط‌چین می‌باشد، داده‌های حاصل از آزمایش میدانی و خط ممتد، خروجی‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار

المان محدود آباکوس می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد که این دو نمودار دارای انطباق قابل قبولی می‌باشد. (ریز اعداد آزمایش میدانی و داده‌های نرم افزار المان محدود ضمیمه این تحقیق می‌گردد).



نمودار ۳-۴: مقایسه داده‌های حاصل از آزمایش میدانی و داده‌های استخراج‌شده از نرم‌افزار آباکوس در نقطه مرکزی دهانه (سرعت ۲۶۰ کیلومتر بر ساعت).

فصل ۴

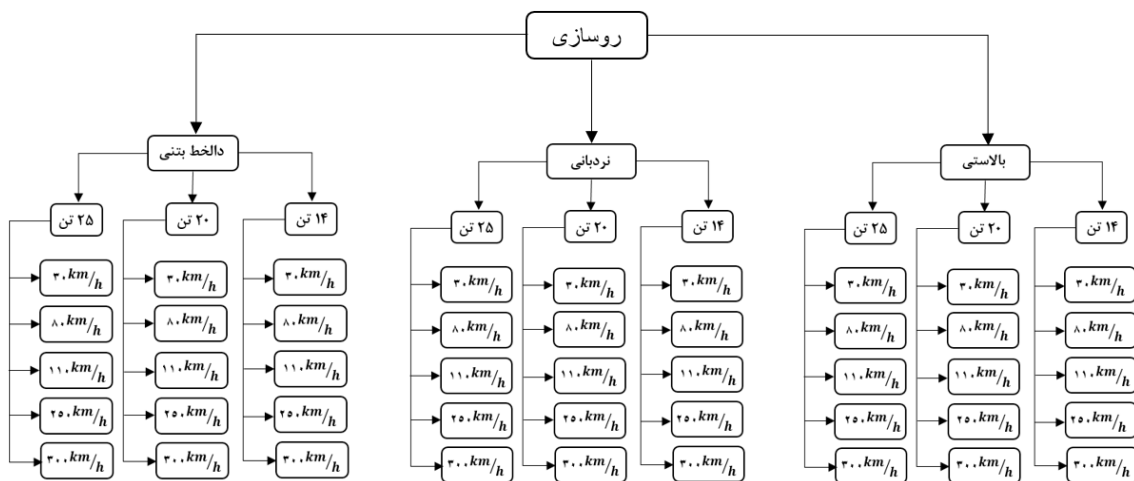
نتایج و بحث

۴-۱- مقدمه

در فصل پیش رو به بحث و بررسی نتایج مدل سازی خواهیم پرداخت و تأثیرات سرعت و بار محوری بر عرشه پل را به طور جداگانه مورد بررسی قرار خواهیم داد. از این رو لازم است در ابتدا به طور خلاصه نحوه انجام این آنالیز عددی ذکر گردد.

۴-۲- شیوه انجام آنالیز عددی

نحوه انجام این آنالیز بدین صورت می باشد که در ابتدا یک پل جعبه ای^۱ با سه دهانه مدل شده و سپس روسازی های نردبانی، دالخط بتنی و بالاستی به طور جداگانه بر روی پل قرار داده می شوند. سپس قطار از روی پل مورد بحث عبور کرده و در نهایت داده ها استخراج می شوند. بار محوری قطار عبوری برابر ۱۴، ۲۰، ۲۵ تن می باشد. در هریک از بارهای محوری، سرعت قطار نیز از ۳۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت تغییر می کند. در نمودار ۴-۱ نمای کلی نحوه اجرای کلی پژوهش را مشاهده می فرمائید.

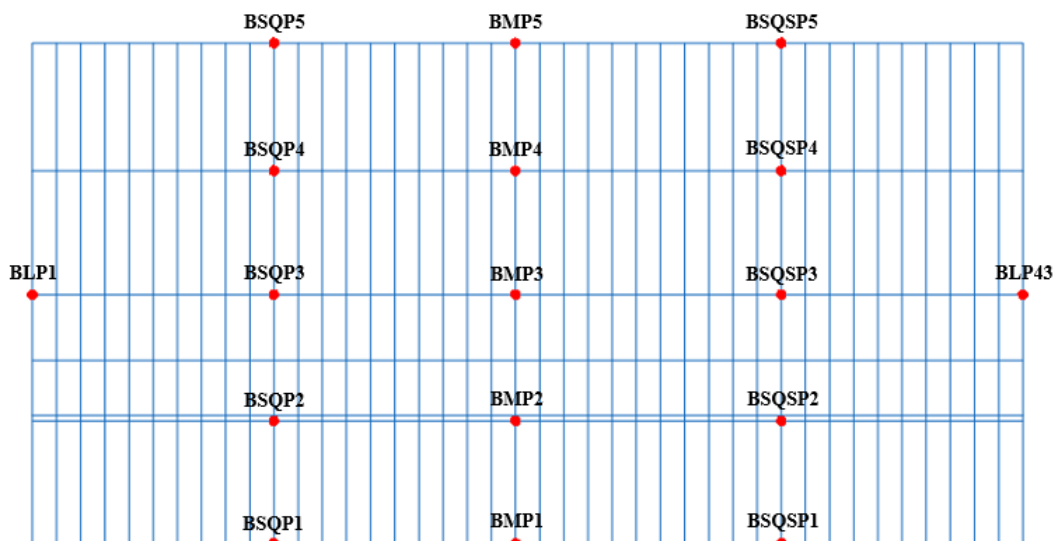


نمودار ۴-۱: نمودار درختی نحوه انجام مدل سازی.

در ادامه در شکل ۴-۱، نقاط استخراج داده ها مشخص شده اند. همان گونه که از شکل مشخص است یک سری از نقاط در محور وسط دهانه پل قرار داشته و بقیه نقاط در یک چهارم دهانه از قسمت ورودی و خروجی پل

^۱Box Girder

قرار دارند. انتخاب این نقاط به این دلیل می‌باشد که در هنگام عبور بار از روی عرشه، محورهای وسط در راستای طولی و راستای عرضی و نیز محورهای یک چهارم دهانه، بحرانی می‌باشد (امکان ثبت حداکثر مقادیر در این محورها زیاد می‌باشد). لازم به ذکر است که نقاط BSQP2، BMP2 و BSQSP2 زیر ریل و محل عبور وسیله نقلیه می‌باشد که دارای حساسیت بالاتری نسبت به سایر نقاط به دلیل وارد شدن بار مستقیم به این نقاط، می‌باشد.



شکل ۴-۱: نقاط استخراج داده‌ها بر روی دهانه وسط پل.

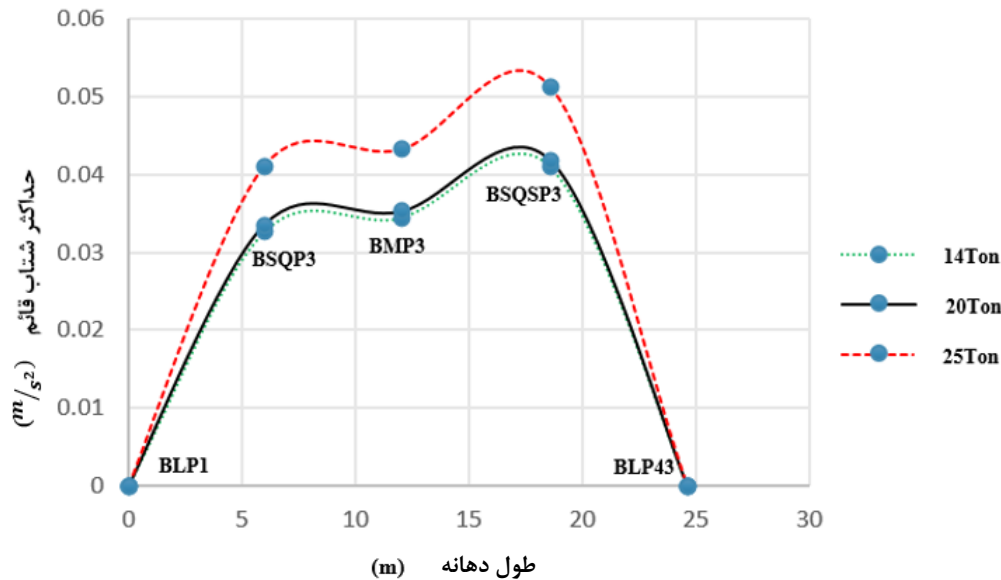
۳-۴- نتایج و بحث

۳-۴-۱- بررسی تأثیر بار محوری بر میزان حداکثر شتاب قائم در محور طولی و میانی پل

در روسازی نردبانی

با توجه به مشابه بودن نتایج حاصل از هر سه نوع روسازی، برای جلوگیری از تکرار مکررات فقط به آوردن نتایج روسازی نردبانی که موضوع بحث ما می‌باشد بسنده کرده و به تحلیل این نتایج خواهیم پرداخت. در ادامه نمودارهای تغییرات حداکثر شتاب قائم پل تحت اثر عبور قطار سریع‌السیر با سرعت و بار محوری متفاوت ارائه شده‌است. در تمامی نمودارهای این فصل، محورهای افقی نمودار نتایج از جنس طول بوده (عرض و طول دهانه) که واحد آن متریک و برابر متر می‌باشد. محورهای قائم نیز یک‌بار از جنس طول

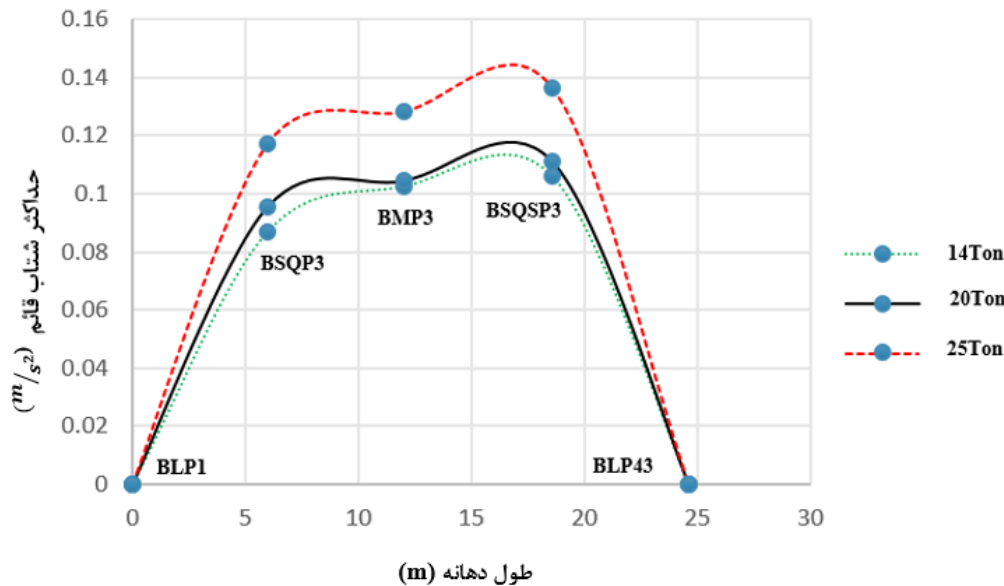
(حداکثر جابجایی قائم) بر حسب متر و بار دیگر از جنس شتاب (حداکثر شتاب قائم) بر حسب متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. در ادامه میزان تأثیر توأم بار محوری و سرعت در انواع روسازی‌ها بر پاسخ دینامیکی پل در نمودارهای ۴-۱ الی ۴-۵ نشان داده شده‌است.



نمودار ۴-۱: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت).

در این قسمت به بررسی رفتار عرشه پل در اثر عبور وسیله نقلیه ریلی خواهیم پرداخت. همان‌طور که در نمودار ۴-۱ ملاحظه می‌شود، برای روسازی نردبانی در سرعت سیر ۳۰ کیلومتر بر ساعت و در محور میانی و طولی دهانه پل، با افزایش بار محوری حداکثر شتاب قائم نیز افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش به این جهت می‌باشد که چون بارهای وارده از طرف قطار سریع‌السیر به صورت دینامیکی می‌باشد، با افزایش سرعت نحوه اعمال بار بر عرشه پل تغییر کرده و به صورت غیرخطی باعث افزایش حداکثر شتاب قائم می‌شود. از طرفی با توجه به این‌که جابجایی ابتدا و انتهای عرشه پل محدود شده‌است، با ورود قطار به عرشه پل، بیشترین میزان بار به یک چهارم از طول دهانه وارد می‌شود (محور BSQSP1-BSQSP5). میزان حداکثر شتاب قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰،۰۴۲۶۴۰۳، ۰،۰۴۳۴۷۸ و ۰،۰۵۱۰۹۷۳ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد.

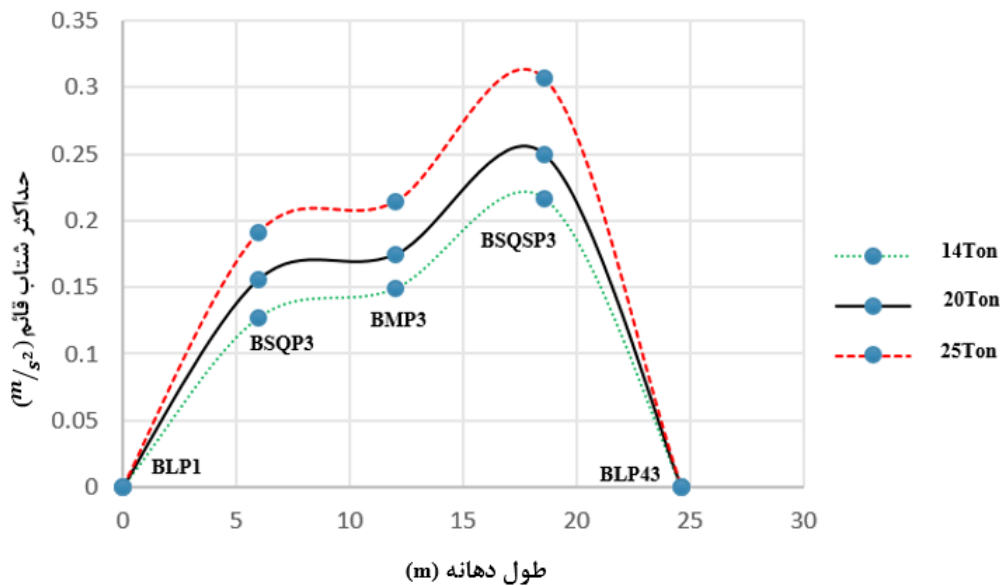
همچنین میزان افزایش حداکثر شتاب قائم در نقطه BSQSP3 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱,۰۱۹ و ۱,۱۹۸ می‌باشد. در انتها ملاحظه می‌گردد که با افزایش بار محوری، با تغییرات کمتر، میزان افزایش شتاب قائم بیشتر خواهد بود.



نمودار ۲-۴: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت).

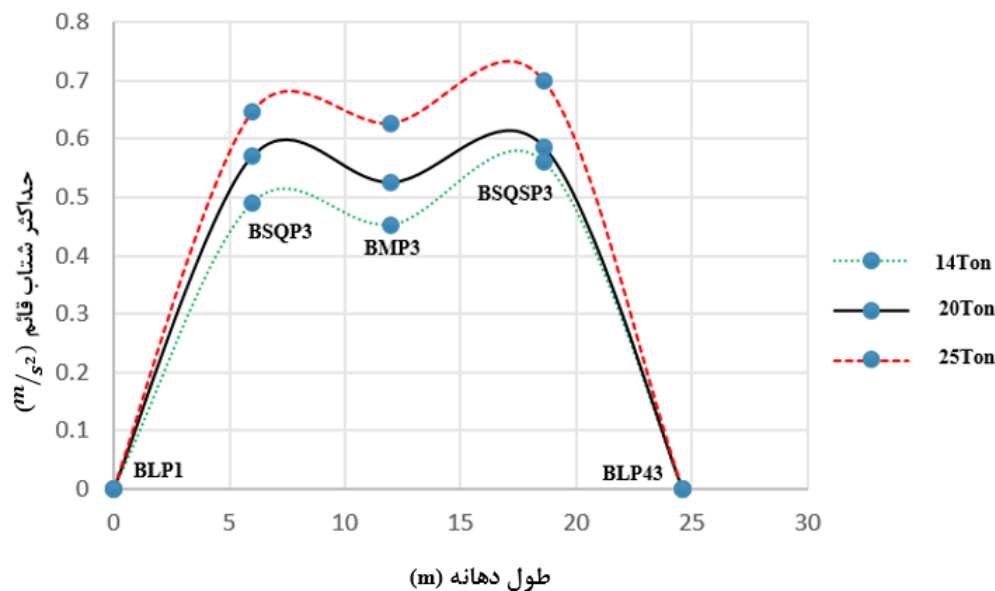
در نمودار ۲-۴ تغییرات حداکثر شتاب قائم بر حسب طول دهانه را در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت مشاهده می‌نمائید. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در مقایسه با سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت، با افزایش سرعت، حداکثر شتاب قائم نیز افزایش یافته‌است و بیشترین مقدار در محور طولی از بین نقاط عرشه پل نیز در یک چهارم عرضی دهانه در قسمت خروجی اتفاق می‌افتد (محور BSQSP1-BSQSP5). از طرفی مشاهده می‌گردد که با افزایش بار محوری نیز، حداکثر شتاب قائم افزایش پیدا می‌کند؛ اما در بار محوری بالاتر بر این مقدار بیشتر افزوده شده و افزایش به صورت خطی نمی‌باشد. میزان حداکثر شتاب قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰,۱۰۲۳۹۰، ۰,۱۰۴۲۸۴ و ۰,۱۲۸۰۲۳ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر شتاب قائم در نقطه BSQSP3 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار

محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱,۰۱۸ و ۱,۲۵۰ می‌باشد. در انتها ملاحظه می‌گردد که با افزایش بار محوری، با تغییرات کمتر، میزان افزایش شتاب قائم بیشتر خواهد بود.



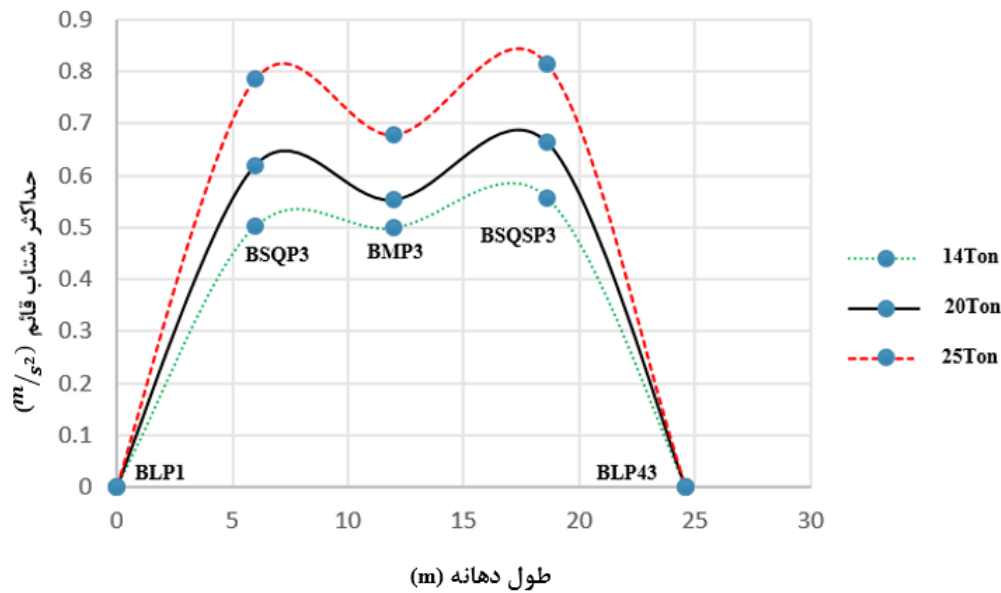
نمودار ۳-۴: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت).

در نمودار ۳-۴ میزان حداکثر شتاب قائم بر حسب افزایش بار محوری در سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت ملاحظه می‌شود. برای روسازی نردبانی در محور میانی و طولی دهانه پل با افزایش بار محوری حداکثر شتاب قائم نیز افزایش می‌یابد. در مقایسه میزان حداکثر شتاب قائم در سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت نسبت به سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت، مشاهده می‌شود که افزایش سرعت باعث افزایش این مقدار به اندازه بیش از یک و نیم برابر شده‌است. مثل نمودارهای قبلی نیز حداکثر شتاب قائم در یک چهارم عرضی دهانه در قسمت خروجی اتفاق می‌افتد (محور BSQSP1-BSQSP5). افزایش حداکثر شتاب قائم در بار محوری ۲۵ تن نسبت به دو بار محوری دیگر بیشتر بوده و این نسبت غیرخطی می‌باشد. در نهایت میزان حداکثر شتاب قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰,۲۴۹۸۵۷، ۰,۳۰۶۶۴۰ و ۰,۳۰۶۶۴۰ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر شتاب قائم در نقطه BSQSP3 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱,۱۵۲ و ۱,۴۱۴ می‌باشد. در انتها ملاحظه می‌گردد که با افزایش بار محوری، با تغییرات کمتر، میزان افزایش شتاب قائم بیشتر خواهد بود.



نمودار ۴-۴: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت).

همان‌طور که در نمودار ۴-۴ ملاحظه می‌شود، با افزایش سرعت از ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت به ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت، میزان افزایش حداکثر شتاب قائم بیش از دو برابر می‌باشد. در محور طولی عرشه پل میزان حداکثر شتاب قائم در نقطه میانی نسبت به دو نقطه موجود در یک چهارم دهانه کمترین مقدار بوده و در نقطه یک چهارم دهانه خروجی عرشه بیشترین مقدار خود را دارا می‌باشد. از طرفی با افزایش بار محوری حداکثر شتاب قائم نیز افزایش یافته و این میزان به صورت خطی نمی‌باشد (محور BSQSP1-BSQSP5). میزان حداکثر شتاب قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰٫۵۶۱۳۴۲، ۰٫۵۸۶۵۷۶ و ۰٫۶۶۹۲۸۵۰ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر شتاب قائم در نقطه BSQSP3 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱٫۰۴۴ و ۱٫۱۹۲ می‌باشد. در انتها ملاحظه می‌گردد که با افزایش بار محوری، با تغییرات کمتر، میزان افزایش شتاب قائم بیشتر خواهد بود.



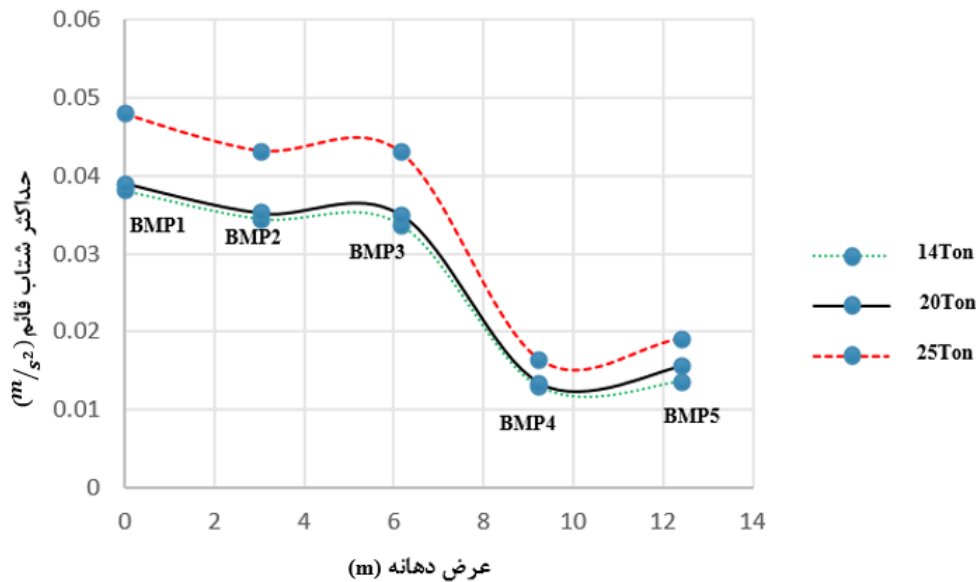
نمودار ۴-۵: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت).

حداکثر سرعت عبوری وسیله نقلیه ریلی در تحقیق موردنظر، ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد که در این حالت بیشترین اثر را بر خصوصیات دینامیکی عرشه پل می‌گذارد. با مقایسه نمودارهای ۴-۴ و ۵-۴ مشاهده می‌شود که تغییرات حداکثر شتاب قائم نسبت به سرعت‌های پایین‌تر کمتر می‌باشد. همان‌طور که در نمودار ۵-۴ ملاحظه می‌شود، برای روسازی نردبانی در محور میانی و طولی دهانه پل با افزایش بار محوری نیز حداکثر شتاب قائم افزایش می‌یابد. در محور طولی حداکثر شتاب قائم در یک چهارم عرضی دهانه در قسمت خروجی اتفاق می‌افتد (محور BSQSP1-BSQSP5). میزان حداکثر شتاب قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰،۵۶۱۳۴۲، ۰،۶۶۳۶۰۲ و ۰،۸۱۴۳۷۷ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر شتاب قائم در نقطه BSQSP3 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱،۱۸۲ و ۱،۴۵۰ می‌باشد. در انتها ملاحظه می‌گردد که با افزایش بار محوری، با تغییرات کمتر، میزان افزایش شتاب قائم بیشتر خواهد بود.

۴-۳-۲- بررسی تأثیر بار محوری بر میزان حداکثر شتاب قائم در محور عرض و میانی پل

در روسازی نردبانی

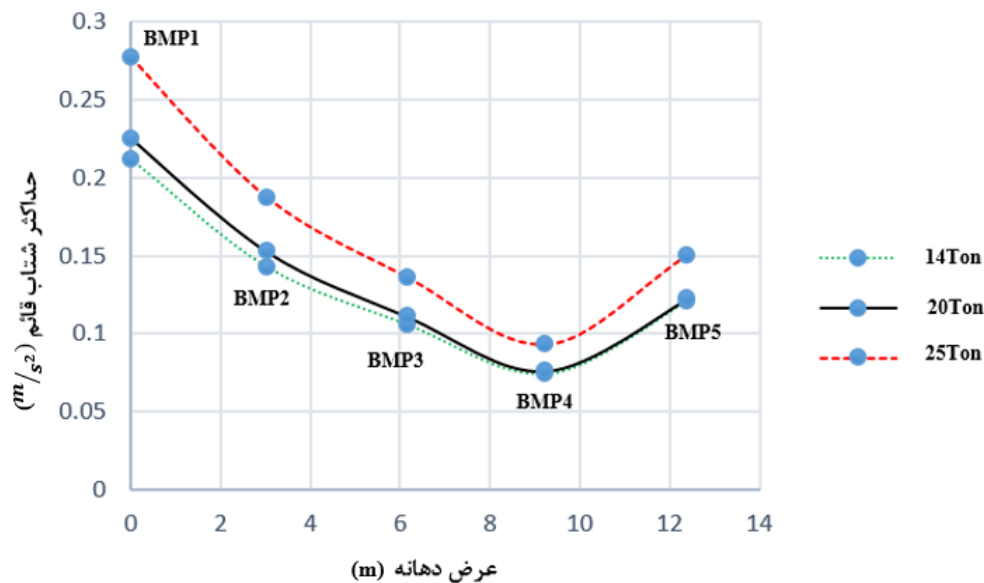
در این قسمت تأثیر سرعت حرکت قطار با بار محوری متفاوت بر میزان حداکثر شتاب قائم در مقطع عرضی پل مورد بحث قرار می‌گیرد. نمودارهای ۴-۶ تا ۴-۱۰ نتایج حاصله را نشان می‌دهد.



نمودار ۴-۶: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت).

همان‌طور که در نمودار ۴-۶ ملاحظه می‌شود، بیشترین میزان حداکثر شتاب قائم در کناره عرشه پل و نزدیک به محل عبور وسیله نقلیه ریلی اتفاق می‌افتد و با فاصله گرفتن از محل عبوری، میزان حداکثر شتاب قائم کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که در بار محوری ۲۵ تن این میزان افزایش نسبت به دو بار محوری دیگر بیشتر می‌باشد. برای روسازی نردبانی در سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت و در محور میانی و عرضی دهانه پل با افزایش بار محوری حداکثر شتاب قائم نیز افزایش می‌یابد. در این حالت، حداکثر جابجایی قائم در نقطه BPM1 اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5). میزان حداکثر شتاب قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰,۰۳۸۶۸۵۲، ۰,۰۳۹۰۳۸۸ و ۰,۰۴۸۰۱۲۹ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد.

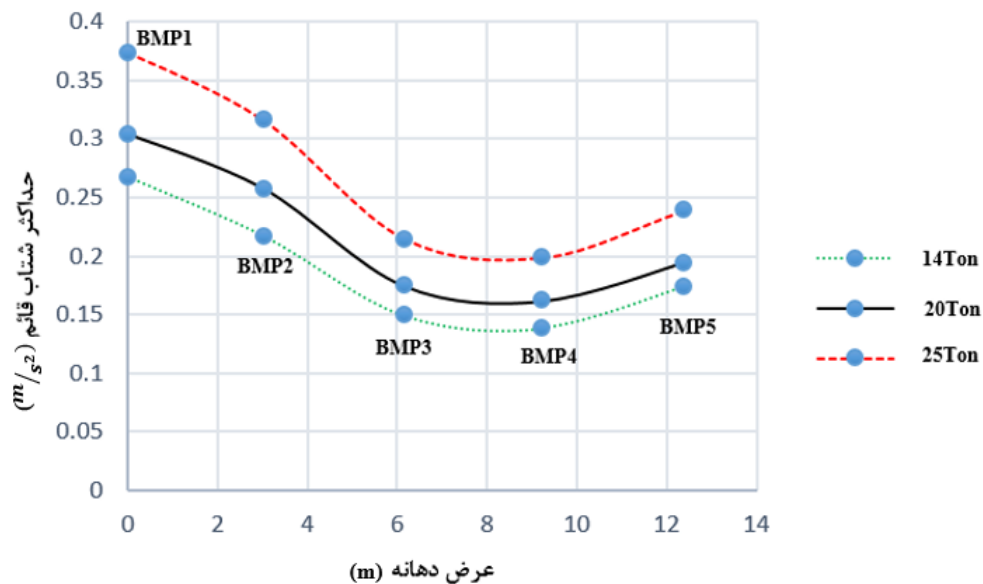
همچنین میزان افزایش حداکثر شتاب قائم در نقطه BMP1 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱,۰۰۹۱ و ۱,۲۴۱ می‌باشد.



نمودار ۴-۷: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت).

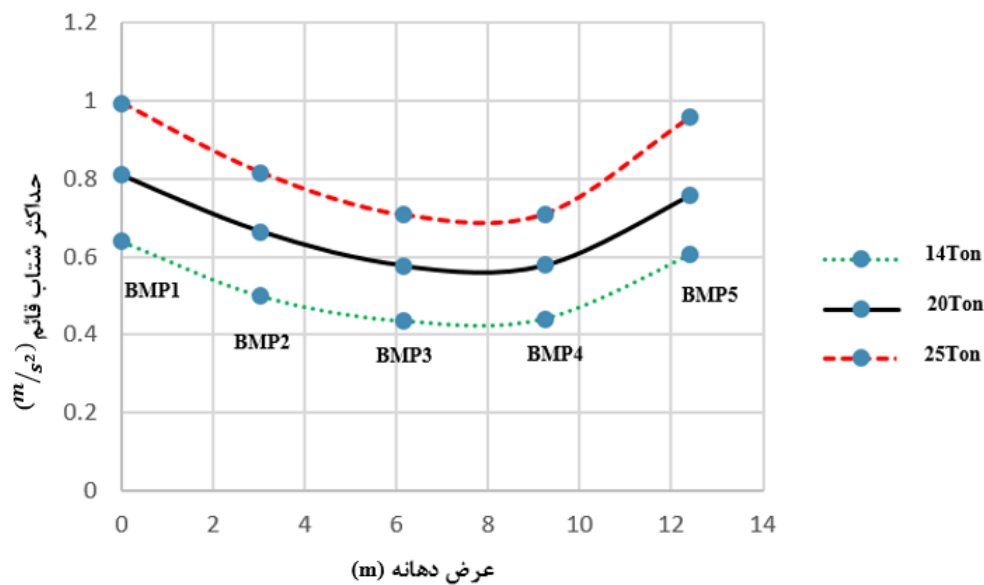
همان‌طور که در نمودار ۴-۷ ملاحظه می‌شود، با افزایش سرعت از ۳۰ کیلومتر بر ساعت به ۸۰ کیلومتر بر ساعت، حداکثر شتاب قائم افزایش می‌یابد. برای روسازی نردبانی در محور وسط و عرضی دهانه پل با افزایش بار محوری نیز حداکثر شتاب قائم افزایش می‌یابد. در این حالت، حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP1 اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5).

میزان حداکثر شتاب قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰,۲۱۱۹۹۴، ۰,۲۲۵۵۰۸۰ و ۰,۲۷۶۸۴۸ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر شتاب قائم در نقطه BMP1 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱,۰۶۳ و ۱,۳۰۵ می‌باشد.



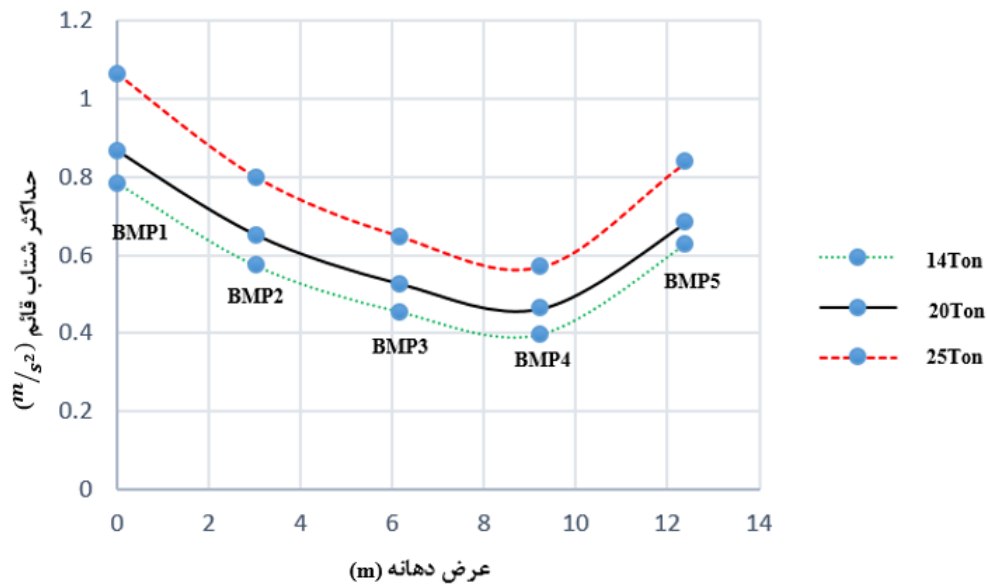
نمودار ۴-۸: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت).

با توجه به نمودار ۴-۸ ملاحظه می‌شود، برای روسازی نردبانی در سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت و در محور میانی و عرضی دهانه پل با افزایش بار محوری حداکثر شتاب قائم نیز افزایش می‌یابد. در این حالت، حداکثر جابجایی قائم در نقطه BPM1 اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5). میزان حداکثر شتاب قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰,۲۶۷۷۳۶، ۰,۳۰۴۵۰۴ و ۰,۳۷۳۶۷۵ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر شتاب قائم در نقطه BMP1 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱,۱۳۷ و ۱,۳۹۵ می‌باشد.



نمودار ۴-۹: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت).

همان‌طور که در نمودار ۴-۹ ملاحظه می‌شود، با مقایسه سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت و سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت مشاهده می‌شود که افزایش سرعت باعث افزایش حداکثر شتاب قائم به میزان بیش از دو برابر منجر شده‌است. برای روسازی نردبانی در سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت و در محور میانی و عرضی دهانه پل با افزایش بار محوری حداکثر شتاب قائم نیز افزایش می‌یابد. در این حالت، حداکثر جابجایی قائم در نقطه BPM1 اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5). میزان حداکثر شتاب قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰,۶۳۸۰۰۲، ۰,۷۹۶۰۴۴ و ۰,۹۷۶۷۶۸ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر شتاب قائم در نقطه BMP1 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱,۲۴۷ و ۱,۵۳۰ می‌باشد.



نمودار ۴-۱۰: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر شتاب قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت).

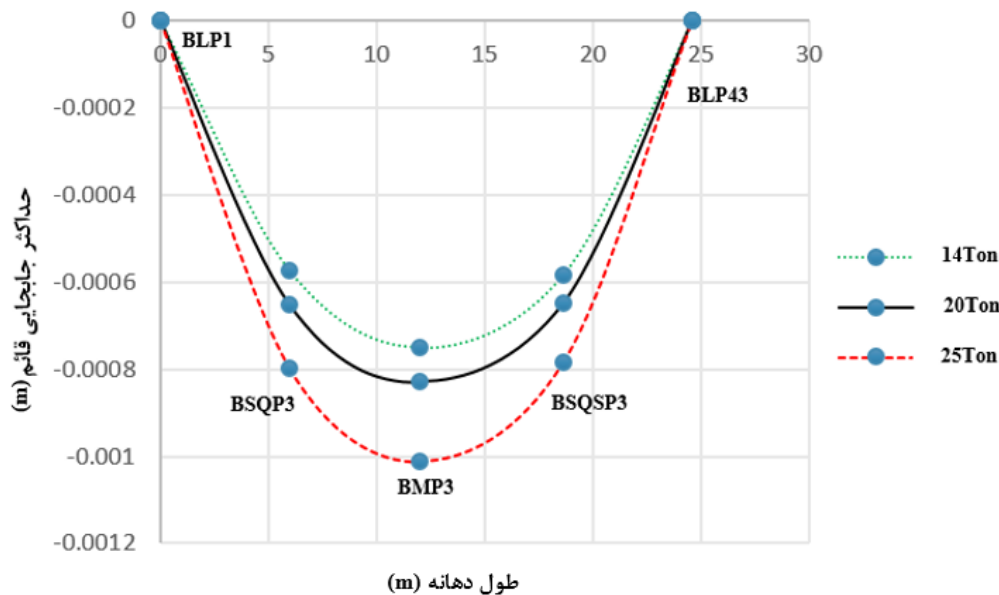
همان‌طور که در نمودار ۴-۱۰ ملاحظه می‌شود، افزایش حداکثر شتاب قائم نسبت به سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت کمتر می‌باشد. برای روسازی نردبانی در سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت و در محور میانی و عرضی دهانه پل با افزایش بار محوری حداکثر شتاب قائم نیز افزایش می‌یابد. در این حالت، حداکثر جابجایی قائم در نقطه BPM1 اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5). با توجه به نمودار ۴-۱۰ مشاهده می‌گردد که حداکثر شتاب قائم در راستای یک چهارم دهانه در جهت مقابل حرکت وسیله نقلیه حداقل میزان می‌باشد. میزان حداکثر شتاب قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰،۷۸۴۲۵، ۰،۸۶۵۱۱۵ و ۱،۰۶۲۸۶ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد.

همچنین میزان افزایش حداکثر شتاب قائم در نقطه BPM1 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱،۱۰۳ و ۱،۳۵۵ می‌باشد.

۴-۳-۳- بررسی تأثیر بار محوری بر میزان حداکثر جابجایی قائم در محور طولی و میانی

پل در روسازی نردبانی

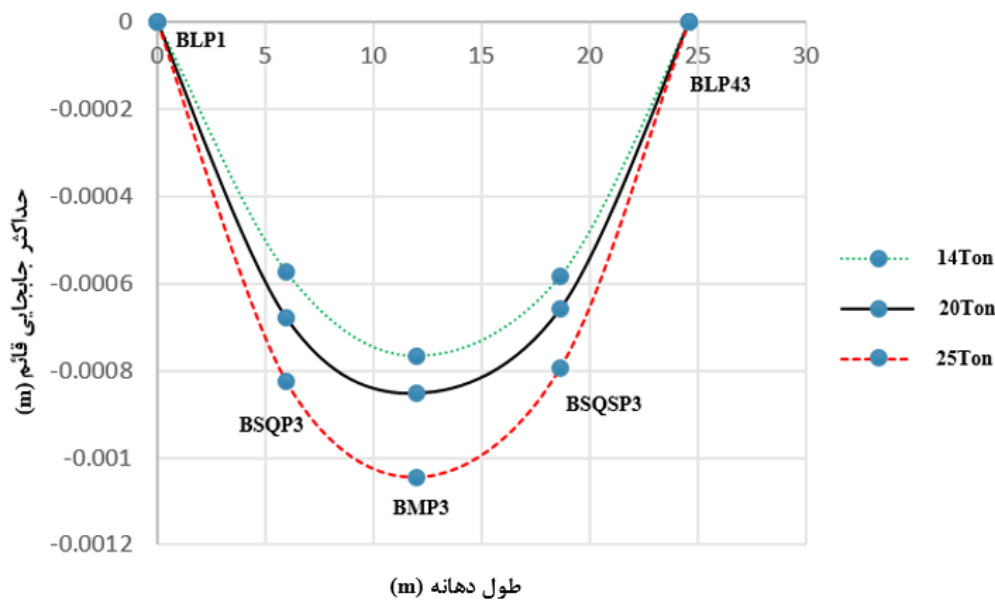
در این قسمت به تأثیر بار محوری وسیله نقلیه ریلی بر میزان حداکثر جابجایی قائم محور طولی و میانی عرشه پل خواهیم پرداخت. نمودارهای ۴-۱۱ تا ۴-۱۵ نتایج حاصل را نمایش می‌دهند.



نمودار ۴-۱۱: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت).

نمودار ۴-۱۱ میزان تغییرات حداکثر جابجایی قائم بر حسب بار محوری را نشان می‌دهد. برای روسازی نردبانی در سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت و در محور میانی و طولی دهانه پل با افزایش بار محوری حداکثر جابجایی قائم نیز افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که این افزایش به صورت غیر خطی می‌باشد. (با افزایش بار محوری، حداکثر شتاب قائم بیشتر افزایش می‌یابد).

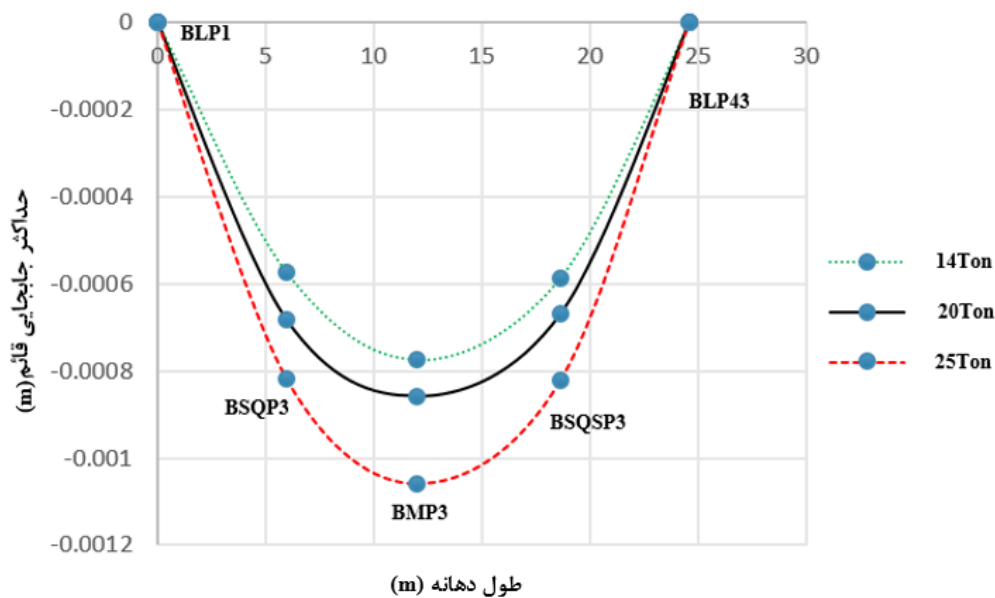
در محور طولی حداکثر جابجایی قائم وسط دهانه اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5). میزان حداکثر جابجایی قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰,۷۵۰۶۴۶، ۰,۸۲۹۸۲۳ و ۱,۰۰۲۴۶ میلی‌متر می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP3 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱,۱۰۵ و ۱,۳۳۵ می‌باشد. در انتها ملاحظه می‌گردد که با افزایش بار محوری، با تغییرات کمتر، میزان افزایش جابجایی قائم بیشتر خواهد بود.



نمودار ۴-۱۲: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت).

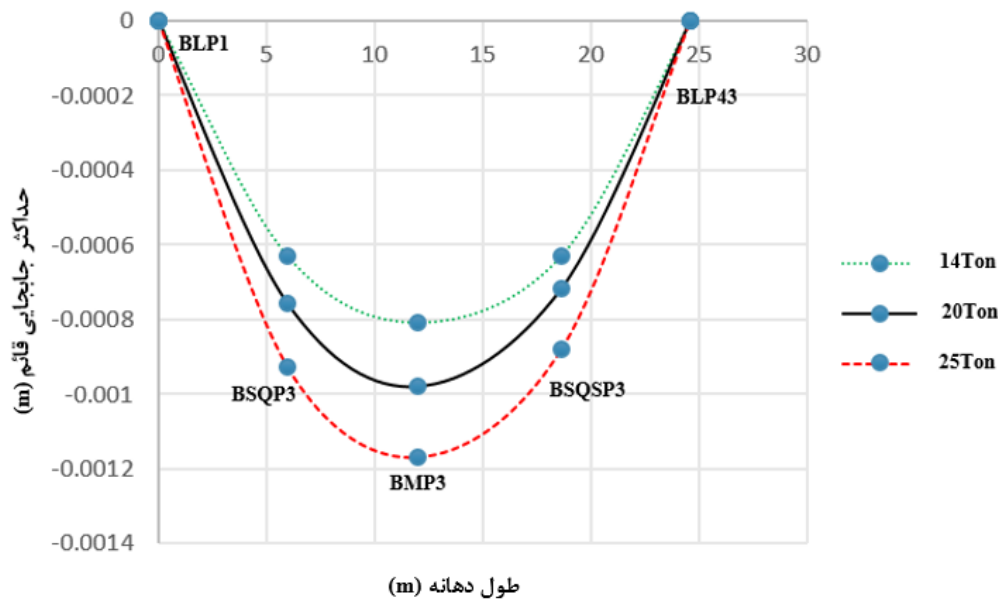
همان‌طور که در نمودار ۴-۱۲ ملاحظه می‌شود، برای روسازی نردبانی در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت و در محور میانی و طولی دهانه پل با افزایش بار محوری حداکثر جابجایی قائم نیز افزایش می‌یابد. در محور طولی حداکثر جابجایی قائم وسط دهانه اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5). لازم به ذکر می‌باشد که میزان ماکزیمم بودن حداکثر شتاب قائم در وسط دهانه را می‌توان این‌طور توجیح نمود که عرشه پل را می‌توان به عنوان یک تیر یک‌سر گیردار در نظر گرفت که بار بر آن وارد می‌گردد. بنابراین همان‌طور که می‌دانیم حداکثر جابجایی قائم تیر در وسط دهانه اتفاق خواهد افتاد.

میزان حداکثر جابجایی قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰٫۷۶۵۵۸۳، ۰٫۸۵۱۴۲۱ و ۱٫۱۱۲۴۶ میلی‌متر می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP3 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱٫۱۱۲ و ۱٫۴۵۱ می‌باشد. در انتها ملاحظه می‌گردد که با افزایش بار محوری، با تغییرات کمتر، میزان افزایش جابجایی قائم بیشتر خواهد بود.



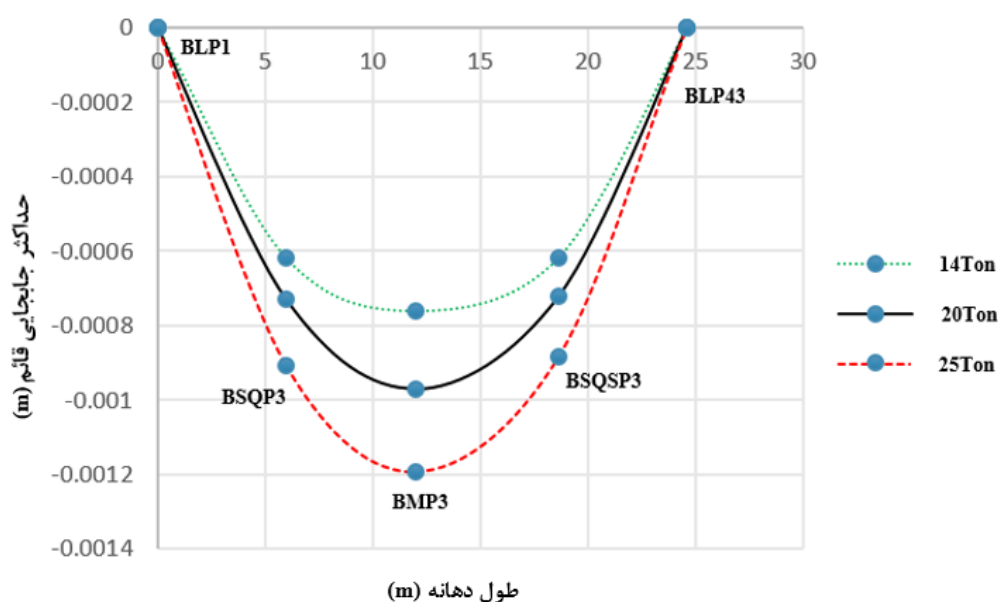
نمودار ۴-۱۳: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت).

همان‌طور که در نمودار ۴-۱۳ ملاحظه می‌شود، برای روسازی نردبانی در سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت و در محور میانی و طولی دهانه پل با افزایش بار محوری حداکثر جابجایی قائم نیز افزایش می‌یابد. در محور طولی حداکثر جابجایی قائم وسط دهانه اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5). میزان حداکثر جابجایی قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰،۷۷۵۷۳۳، ۰،۸۵۷۴۲۸ و ۱،۱۱۴۴۶ میلی‌متر می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP3 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱،۱۰۵ و ۱،۴۳۶ می‌باشد. در انتها ملاحظه می‌گردد که با افزایش بار محوری، با تغییرات کمتر، میزان افزایش جابجایی قائم بیشتر خواهد بود.



نمودار ۴-۱۴: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت).

همان‌طور در نمودار ۴-۱۴ که ملاحظه می‌شود، در مقایسه با نمودار ۴-۱۳ با افزایش سرعت حداکثر جابجایی قائم در راستای طولی عرشه پل افزایش پیدا کرده‌است. برای روسازی نردبانی در سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت و در محور میانی و طولی دهانه پل با افزایش بار محوری نیز حداکثر جابجایی قائم افزایش می‌یابد. در محور طولی حداکثر جابجایی قائم وسط دهانه اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5). میزان حداکثر جابجایی قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰،۸۰۸۰۷۳، ۰،۹۷۸۲۴ و ۱،۱۱۷۴۶ میلی‌متر می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP3 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱،۲۱۰ و ۱،۳۸۲ می‌باشد. در انتها ملاحظه می‌گردد که با افزایش بار محوری، با تغییرات کمتر، میزان افزایش جابجایی قائم بیشتر خواهد بود.



نمودار ۴-۱۵: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل در روسازی نردبانی (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت).

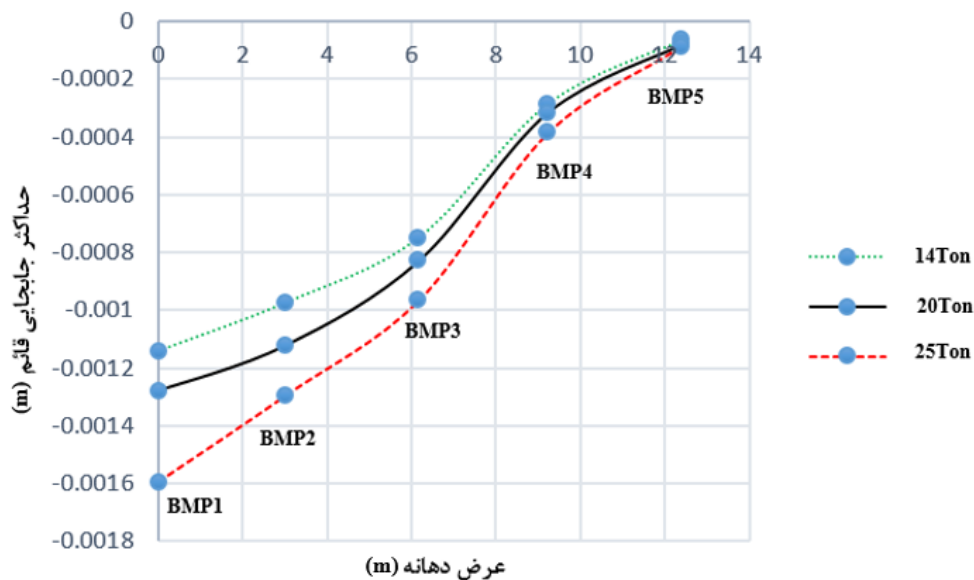
همان‌طور در نمودار ۴-۱۵ که ملاحظه می‌شود، تأثیر بار محوری ۲۵ تن نسبت به دو مقدار بار محوری دیگر بر میزان حداکثر جابجایی قائم بیشتر می‌باشد. با توجه به اینکه حداکثر سرعت وسیله نقلیه مورد استفاده برابر ۳۲۱ کیلومتر بر ساعت است، با رعایت ضریب ایمنی حداکثر جابجایی قائم عرشه در اثر عبور قطار و با حداکثر بار محوری برابر ۲۵ تن، برابر ۰,۰۰۱۲ متر می‌باشد.

برای روسازی نردبانی در سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت و در محور میان و طولی دهانه پل با افزایش بار محوری حداکثر جابجایی قائم نیز افزایش می‌یابد. در محور طولی حداکثر جابجایی قائم وسط دهانه اتفاق می‌افتد. (محور BMP1-BMP5). میزان حداکثر جابجایی قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰,۷۶۱۶۳۸، ۰,۹۸۰۱۴۴ و ۱,۱۱۹۴۶ میلی‌متر می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP3 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱,۲۸۵ و ۱,۴۶۹ می‌باشد. در انتها ملاحظه می‌گردد که با افزایش بار محوری، با تغییرات کمتر، میزان افزایش جابجایی قائم بیشتر خواهد بود.

۴-۳-۴- بررسی تأثیر بار محوری بر میزان حداکثر جابجایی قائم در محور عرضی و میانی

پل در روسازی نردبانی

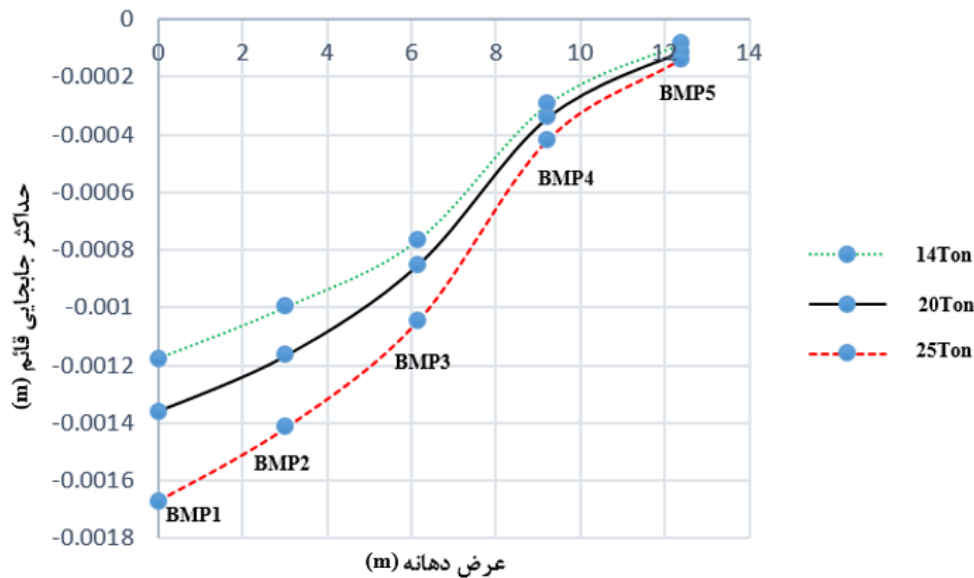
در این قسمت تغییرات حداکثر جابجایی قائم بر حسب افزایش بار محوری وسیله نقلیه ریلی در محور عرضی و میانی عرش پل مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودارهای ۴-۱۶ تا ۴-۲۰ نتایج حاصله را نمایش می‌دهد که در ادامه به توضیح آن‌ها خواهیم پرداخت.



نمودار ۴-۱۶: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت).

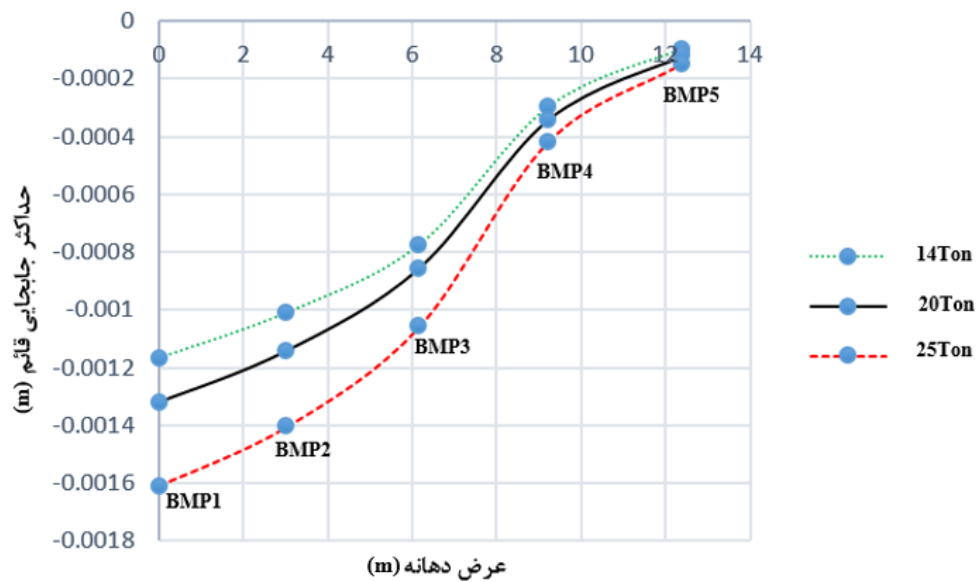
همان‌طور که در نمودار ۴-۱۶ ملاحظه می‌شود، برای روسازی نردبانی در سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت و در محور میانی و عرضی دهانه پل با افزایش بار محوری حداکثر جابجایی قائم نیز افزایش می‌یابد. در این حالت، حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP5 اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5). با مشاهده نمودار ملاحظه می‌گردد که حداقل جابجایی قائم در راستای عرضی، در گوشه عرشه و در دورترین نقطه از محل حرکت وسیله نقلیه ریلی اتفاق می‌افتد. میزان حداکثر جابجایی قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰،۰۶۵۷۱۶، ۰،۰۸۳۳۳۲ و ۰،۰۹۸۷۰۳۳ میلی‌متر می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP5 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر

۱,۲۶۸ و ۱,۵۰۱ می‌باشد. در انتها ملاحظه می‌گردد که با افزایش بار محوری، با تغییرات کمتر، میزان افزایش شتاب قائم بیشتر خواهد بود.



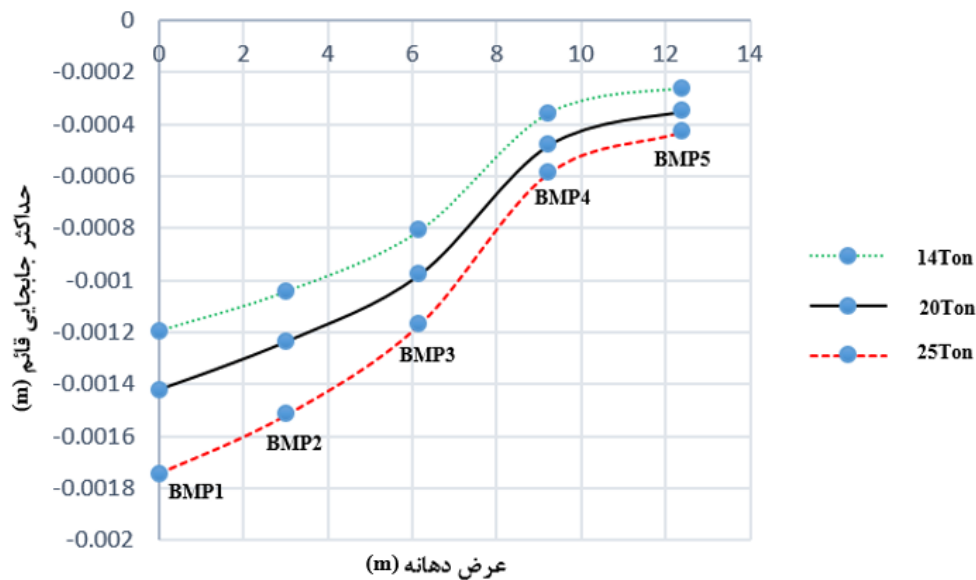
نمودار ۴-۱۷: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت).

همان‌طور که در نمودار ۴-۱۷ ملاحظه می‌شود، برای روسازی نردبانی در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت و در محور میانی و عرضی دهانه پل با افزایش بار محوری حداکثر جابجایی قائم نیز افزایش می‌یابد. در این حالت، حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP5 اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5). میزان حداکثر جابجایی قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰,۰۸۶۳۹۲۹، ۰,۱۱۲۷۶۸ و ۰,۱۳۸۳۸۳ میلی‌متر می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP5 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱,۳۰۵ و ۱,۶۰۱ می‌باشد. در انتها ملاحظه می‌گردد که با افزایش بار محوری، با تغییرات کمتر، میزان افزایش شتاب قائم بیشتر خواهد بود.



نمودار ۴-۱۸: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت).

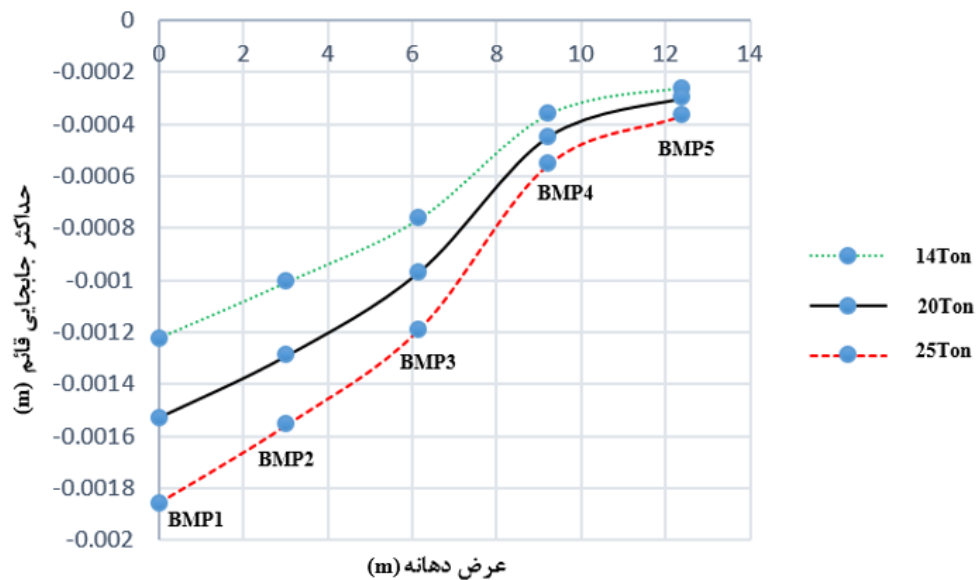
با مشاهده نمودار ۴-۱۸ ملاحظه می‌شود، برای روسازی نردبانی در سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت و در محور میانی و عرضی دهانه پل با افزایش بار محوری حداکثر جابجایی قائم نیز افزایش می‌یابد. در این حالت، حداکثر جابجایی قائم در نقطه BPM5 اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5). میزان حداکثر جابجایی قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰،۰۹۸۲۲۷۱، ۰،۱۲۲۰۶۶ و ۰،۱۴۹۸۱۱۸ میلی‌متر می‌باشد. میزان افزایش حداکثر جابجایی قائم در نقطه BPM5 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱،۲۴۲ و ۱،۵۲۵ می‌باشد.



نمودار ۴-۱۹: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت).

همان‌طور که در نمودار ۴-۱۹ مشخص است، در مقایسه با نمودار ۴-۱۸ با افزایش سرعت بر میزان حداکثر جابجایی قائم افزوده خواهد شد و باید در نظر داشته باشیم که این میزان افزایش به صورت غیرخطی بوده و با افزایش سرعت، بیشتر افزایش پیدا خواهد کرد. حداقل میزان حداکثر شتاب قائم نیز در نقطه BMP1 (دورترین نقطه از محل حرکت وسیله نقلیه ریلی) اتفاق می‌افتد.

برای روسازی نردبانی در سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت و در محور وسط و عرضی دهانه پل با افزایش بار محوری حداکثر جابجایی قائم نیز افزایش می‌یابد. در این حالت، حداکثر جابجایی قائم در نقطه BPM5 اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5). میزان حداکثر جابجایی قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰,۲۶۲۷۶، ۰,۳۴۸۴۸۱ و ۰,۴۲۷۵۵۳ میلی‌متر می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP5 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱,۳۲۶ و ۱,۶۲۷ می‌باشد.



نمودار ۴-۲۰: مقایسه تأثیر بار محوری بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور وسط عمود بر مقطع پل در روسازی نردبانی (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت).

هما

ن ط

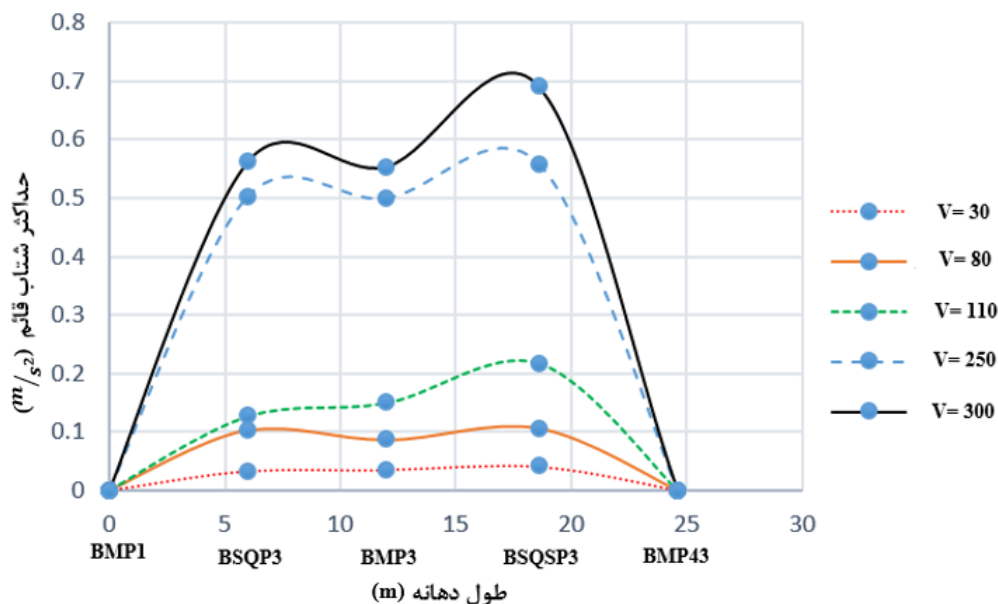
ور که در نمودار ۴-۲۰ ملاحظه می‌شود، برای روسازی نردبانی در سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت و در محور میانی و عرضی دهانه پل با افزایش بار محوری حداکثر جابجایی قائم نیز افزایش می‌یابد. با حرکت قطار سریع‌السیر در یک طرف عرشه پل باعث به وجود آمدن پیچش نسبت به محور گذرنده از محور میانی و طولی عرشه پل خواهد شد.

در این حالت، حداکثر جابجایی قائم در نقطه BPM5 اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5). میزان حداکثر جابجایی قائم در بار محوری ۱۴ تن، ۲۰ تن و ۲۵ تن به ترتیب برابر ۰،۲۶۱۱۱۵، ۰،۲۹۷۲۵۶ و ۰،۳۶۵۱۵۳ میلی‌متر می‌باشد. همچنین میزان افزایش حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP5 در بار محوری ۲۰ تن و ۲۵ تن نسبت به بار محوری ۱۴ تن به ترتیب برابر ۱،۱۳۸ و ۱،۳۹۸ می‌باشد.

۴-۳-۵- بررسی تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم در محور طولی و میانی پل در

روسازی نردبانی

در این قسمت تأثیر افزایش سرعت بر عملکرد روسازی نردبانی مورد بررسی خواهیم داد. سرعت‌های موردنظر برابر ۳۰، ۸۰، ۱۱۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. نمودارهای ۴-۲۱ تا ۴-۲۳، نتایج را به نمایش می‌گذارد که در ادامه به توضیح آن‌ها خواهیم پرداخت.



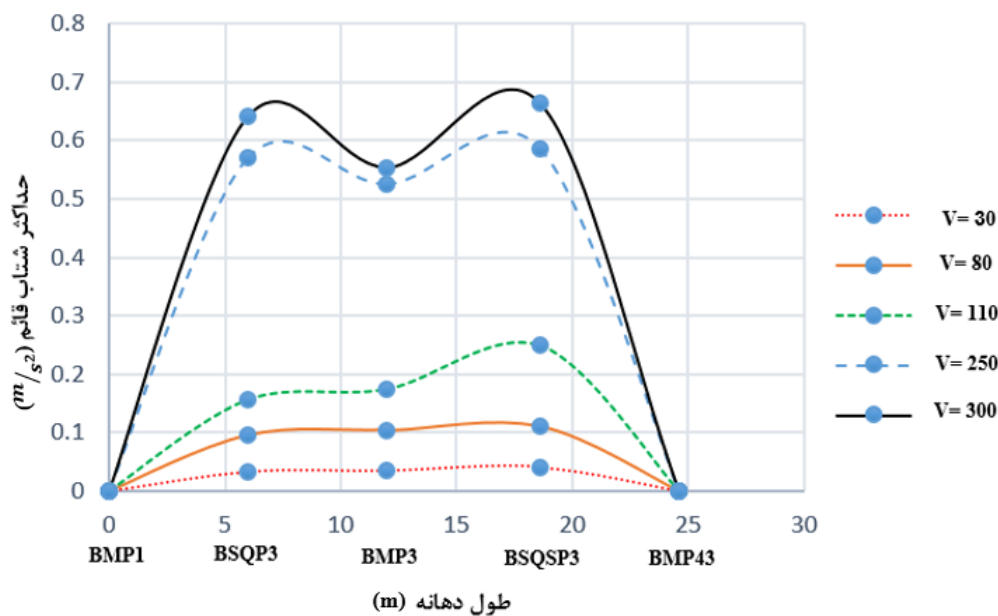
نمودار ۴-۲۱: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۱۴ تن)

در نمودار ۴-۲۱ تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم عرشه پل در راستای طولی ارائه شده است. با توجه به نمودار ملاحظه می‌گردد که در بار محوری ۱۴ تن با افزایش سرعت، بر میزان حداکثر شتاب قائم نیز افزوده می‌گردد. رابطه بین افزایش سرعت و افزایش حداکثر شتاب قائم خطی نبوده و با افزایش سرعت، این میزان بیشتر افزایش می‌یابد.

در این حالت نیز حداکثر شتاب قائم در یک چهارم خروجی دهانه اتفاق می‌افتد (محور BSQSP1-BSQSP5). میزان حداکثر شتاب قائم در نقطه بیشینه و همچنین میزان افزایش شتاب نسبت به سرعت ۳۰ کیلومتر در ساعت در جدول ۴-۱ نشان داده شده است.

| سرعت | ۳۰ | ۸۰ | ۱۱۰ | ۲۵۰ | ۳۰۰ |
|------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| حداکثر شتاب قائم | ۰,۰۴۰۹۵۷۵ | ۰,۱۰۵۸۷۴ | ۰,۲۱۶۸۵۷ | ۰,۵۵۷۲۷۵ | ۰,۶۸۹۹۲۳ |
| نسبت افزایش | - | ۲,۵۸۴ | ۵,۲۹۴ | ۱۳,۶۰۶ | ۱۶,۸۴۴ |

جدول ۴-۱: مقادیر حداکثر شتاب قائم در نقطه BSQSP3 بر حسب سرعت (بار محوری ۱۴ تن)

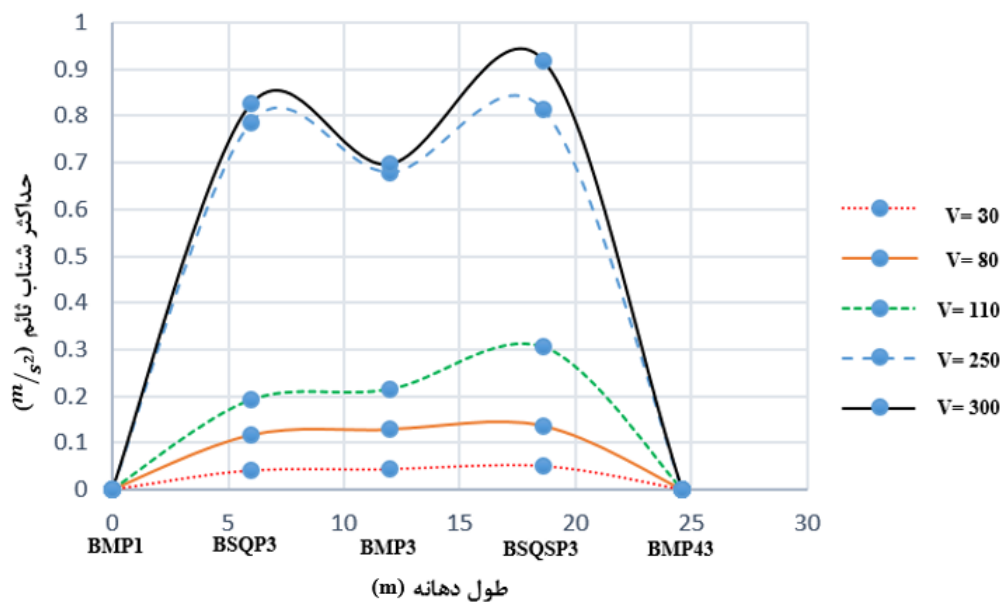


نمودار ۴-۲: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۰ تن)

با توجه به نمودار ۴-۲، محور طولی عرشه پل تحت اثر حرکت قطار با سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت تا سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت قرار گرفته است. ملاحظه می‌گردد که در بار محوری ۲۰ تن با افزایش سرعت، بر میزان حداکثر شتاب قائم نیز افزوده می‌گردد. در این حالت نیز حداکثر شتاب قائم در یک چهارم خروجی دهانه اتفاق می‌افتد (محور BSQSP1- BSQSP5). میزان حداکثر شتاب قائم در نقطه بیشینه و همچنین میزان افزایش شتاب نسبت به سرعت ۳۰ کیلومتر در ساعت در جدول ۴-۲ نشان داده شده است.

| سرعت | ۳۰ | ۸۰ | ۱۱۰ | ۲۵۰ | ۳۰۰ |
|------------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
| حداکثر شتاب قائم | ۰,۰۴۱۷۶۸۴ | ۰,۱۱۰۰۸۸۴ | ۰,۲۴۹۸۵۷ | ۰,۵۸۶۵۷۶ | ۰,۶۶۳۶۶۰۲ |
| نسبت افزایش | - | ۲,۶۳۵ | ۵,۹۸۱ | ۱۴,۰۴۳ | ۱۵,۸۸۰۹ |

جدول ۴-۲: مقادیر حداکثر شتاب قائم در نقطه BSQSP3 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۰ تن)



نمودار ۴-۲۳: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۵ تن)

با توجه به نمودار ۴-۲۳، در مقایسه با نمودار ۴-۲۲ با افزایش بار محوری، بر میزان حداکثر شتاب قائم افزوده می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌گردد، که در بار محوری ۲۵ تن با افزایش سرعت، بر میزان حداکثر شتاب قائم نیز افزوده می‌گردد. در این حالت نیز حداکثر شتاب قائم در یک چهارم خروجی دهانه اتفاق می‌افتد (محور BSQSP1- BSQSP5). همچنین مشخص است که تأثیرات سرعت‌های بالاتر در مقایسه با سرعت‌های پایین‌تر بسیار زیادتر بوده و این رابطه خطی نمی‌باشد. میزان حداکثر شتاب قائم در نقطه بیشینه و همچنین میزان افزایش شتاب نسبت به سرعت ۳۰ کیلومتر در ساعت در جدول ۴-۱ نشان داده شده‌است.

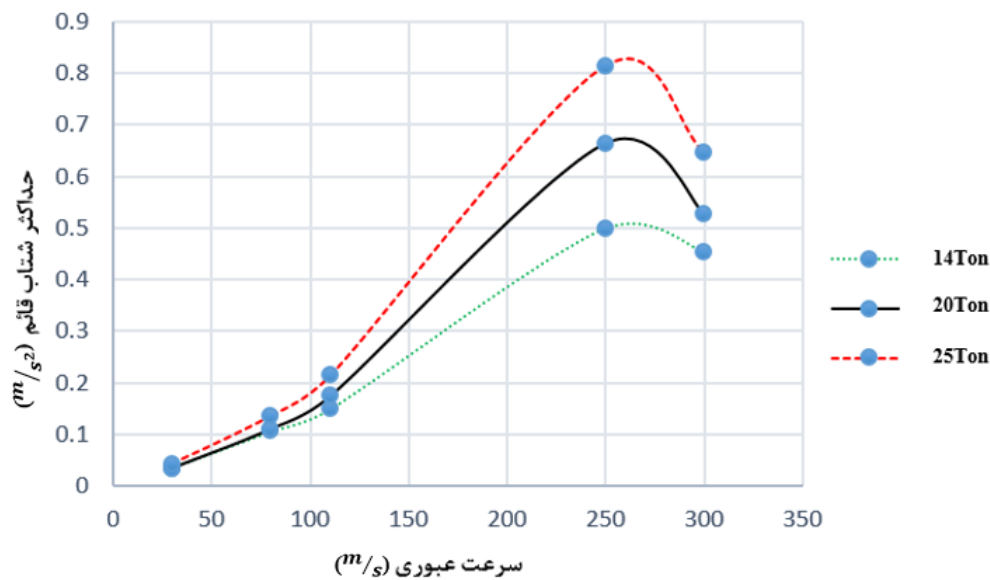
| سرعت | ۳۰ | ۸۰ | ۱۱۰ | ۲۵۰ | ۳۰۰ |
|------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| حداکثر شتاب قائم | ۰,۰۵۱۲۷۵۹ | ۰,۱۳۶۱۳۳ | ۰,۳۰۶۶۴۰ | ۰,۸۱۴۳۷۷ | ۰,۹۱۹۲۸۰ |
| نسبت افزایش | - | ۲,۶۵۹ | ۵,۹۸۰ | ۱۵,۸۸۲ | ۱۷,۹۲۸ |

جدول ۳-۴: مقادیر حداکثر شتاب قائم در نقطه BSQSP3 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۵ تن)

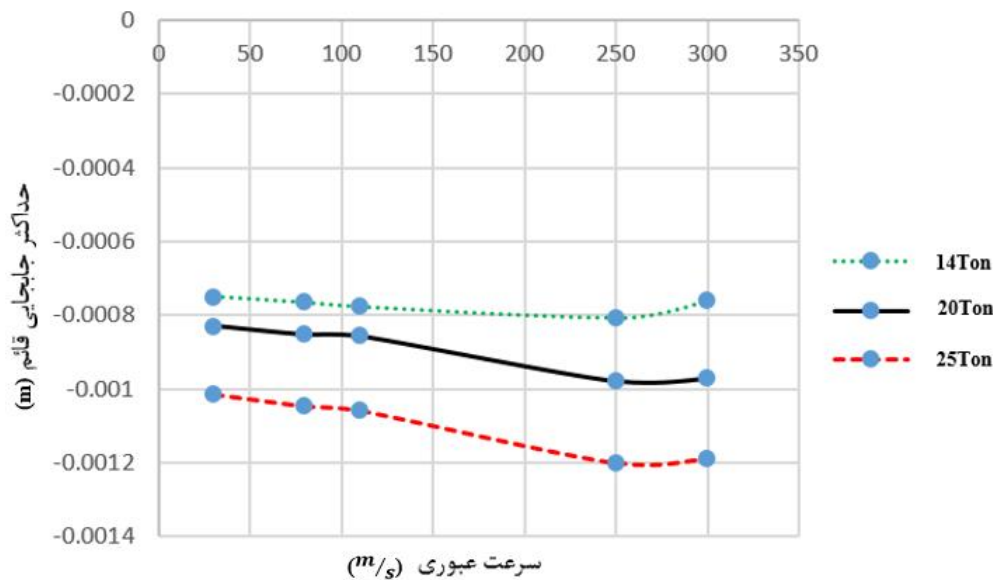
۴-۳-۶- بررسی وضعیت نقطه میانی عرشه (*BMP3*) در سرعت‌های مختلف روسازی

نردبانی

در این قسمت نیز به بررسی سرعت بحرانی در نقطه میانی عرشه پل می‌پردازیم. نمودارهای ۴-۲۴ و ۴-۲۵ حداکثر شتاب قائم را بر حسب سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد.



نمودار ۴-۲۴: تأثیر سرعت و بارمحوری بر میزان حداکثر شتاب قائم نقطه *BMP3* در روسازی نردبانی.



نمودار ۴-۲۵: تأثیر سرعت و بارمحوری بر میزان حداکثر جابجایی قائم نقطه BMP3 در روسازی نردبانی.

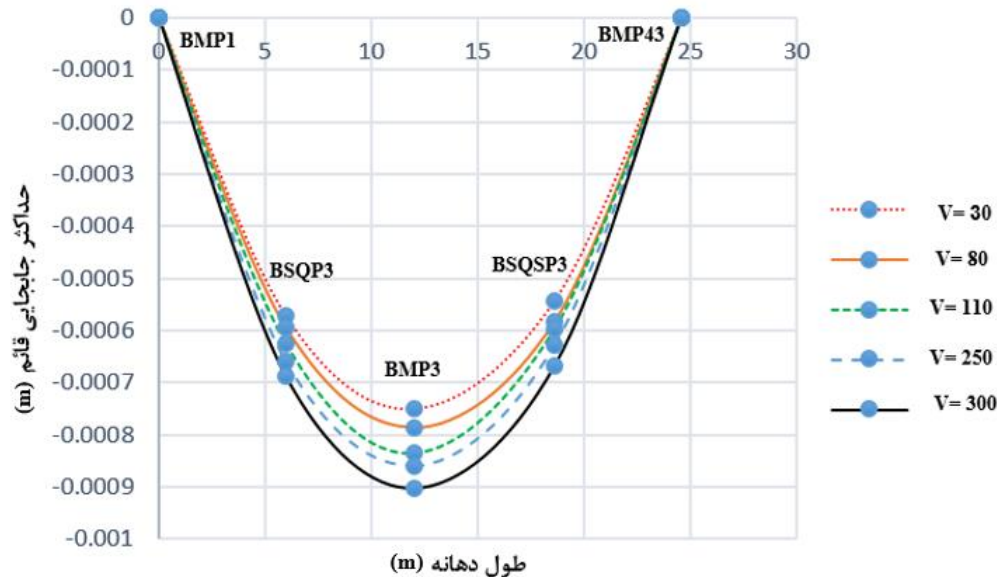
با توجه به این که باری که وسیله نقلیه ریلی بر عرشه پل وارد می کند از نوع دینامیکی می باشد، افزایش سرعت بر خواص دینامیکی پل تأثیر خواهد گذاشت و تا جایی ادامه پیدا می کند که باری که بر پل وارد می شود، علاوه بر دینامیکی بودن ضربه ای نیز خواهد شد. اما بعد از عبور از یک سرعت خاص خواص دینامیکی پل تقریباً ثابت مانده یا حتی کاهش می یابد.

همان طور که از نمودارهای ۴-۲۴ و ۴-۲۵ مشخص می باشد، حداکثر میزان شتاب قائم و نیز جابجایی قائم در محدوده سرعت ۲۵۰ الی ۳۰۰ اتفاق می افتد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که در این سرعت فرکانس وارد بر پل با فرکانس طبیعی پل برابر یا خیلی نزدیک بوده و به وقوع پیوستن پدیده تشدید را محتمل می کند.

۴-۳-۷- بررسی تأثیر سرعت بر میزان حداکثر جابجایی قائم در محور طولی و میانی پل

در روسازی نردبانی

در این قسمت تأثیر افزایش سرعت بر عملکرد روسازی نردبانی مورد بررسی خواهیم داد. سرعت‌های موردنظر برابر ۳۰، ۸۰، ۱۱۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. نمودارهای ۴-۲۶ تا ۴-۲۸، نتایج را به نمایش می‌گذارد که در ادامه به توضیح آن‌ها خواهیم پرداخت.

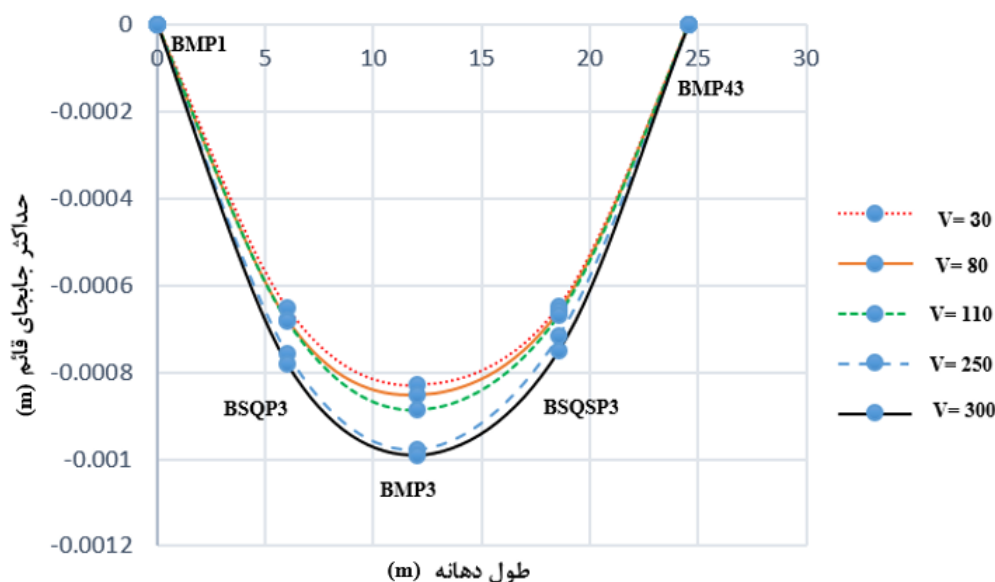


نمودار ۴-۲۶: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۱۴ تن)

با توجه به نمودار ۴-۲۶ ملاحظه می‌گردد که در بار محوری ۱۴ تن با افزایش سرعت، بر میزان حداکثر جابجایی قائم نیز افزوده می‌گردد. در این حالت نیز حداکثر جابجایی قائم در میانه دهانه اتفاق می‌افتد (محور BMP1- BMP5). میزان حداکثر شتاب قائم در نقطه بیشینه و همچنین میزان افزایش شتاب نسبت به سرعت ۳۰ کیلومتر در ساعت در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

| سرعت | ۳۰ | ۸۰ | ۱۱۰ | ۲۵۰ | ۳۰۰ |
|---------------------|----------|----------|----------|---------|----------|
| حداکثر جابجایی قائم | ۰,۷۵۰۶۴۶ | ۰,۷۸۵۵۸۳ | ۰,۸۳۵۷۳۳ | ۰,۸۵۸۷۳ | ۰,۹۰۱۶۳۸ |
| نسبت افزایش | - | ۱,۰۴۶ | ۱,۱۱۳ | ۱,۱۴۳ | ۱,۲۰۱ |

جدول ۴-۴: مقادیر حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP3 بر حسب سرعت (بار محوری ۱۴ تن)

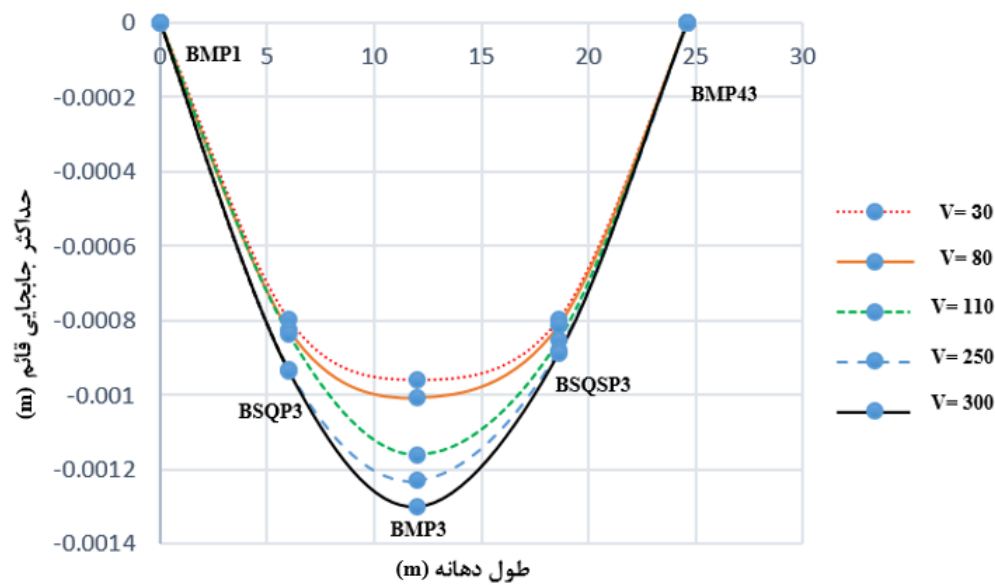


نمودار ۴-۲۷: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۰ تن)

نمودار ۴-۲۷ نشان می‌دهد که در بار محوری ۲۰ تن با افزایش سرعت، بر میزان حداکثر جابجایی قائم نیز افزوده می‌گردد. در این حالت نیز حداکثر جابجایی قائم در میانه دهانه اتفاق می‌افتد (محور BMP1-BMP5). میزان حداکثر شتاب قائم در نقطه بیشینه و همچنین میزان افزایش شتاب نسبت به سرعت ۳۰ کیلومتر در ساعت در جدول ۴-۵ نشان داده شده‌است.

| سرعت | ۳۰ | ۸۰ | ۱۱۰ | ۲۵۰ | ۳۰۰ |
|---------------------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| حداکثر جابجایی قائم | ۰,۸۲۹۸۲۳ | ۰,۸۵۱۱۴۲۱ | ۰,۸۸۷۴۲۸ | ۰,۹۷۸۲۴۰ | ۰,۹۹۰۱۴۴ |
| نسبت افزایش | - | ۱,۰۲۵ | ۱,۰۶۹ | ۱,۱۷۸ | ۱,۱۹۳ |

جدول ۴-۵: مقادیر حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP3 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۰ تن)



نمودار ۴-۲۸: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور طولی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۵ تن)

با توجه به نمودار ۴-۲۸ مشاهده می‌گردد که در بار محوری ۲۵ تن با افزایش سرعت، بر میزان حداکثر جابجایی قائم نیز افزوده می‌گردد. در این حالت نیز حداکثر جابجایی قائم در میانه دهانه اتفاق می‌افتد (محور BMP1- BMP5). میزان حداکثر شتاب قائم در نقطه بیشینه و همچنین میزان افزایش شتاب نسبت به سرعت ۳۰ کیلومتر در ساعت در جدول ۴-۶ شان داده شده‌است.

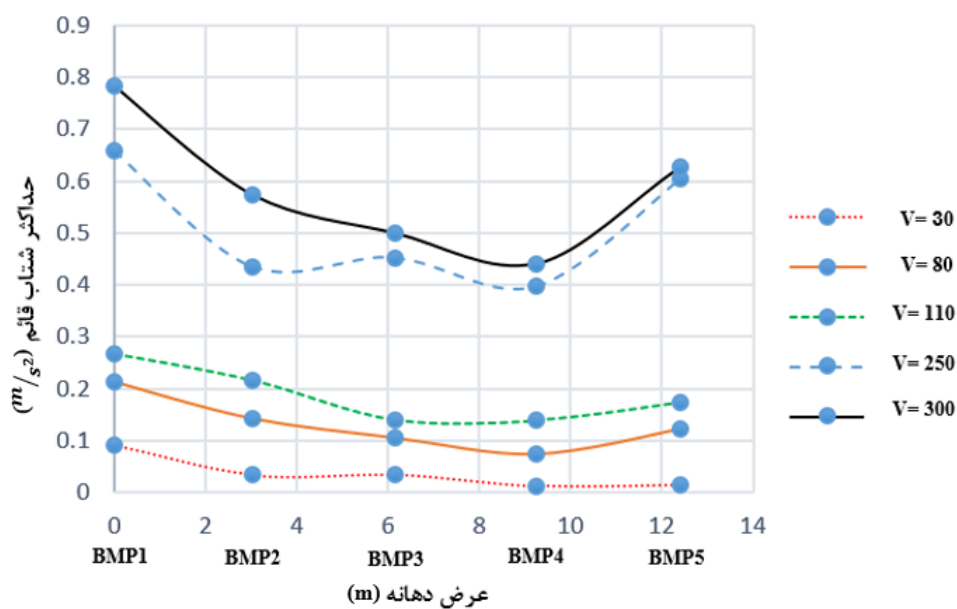
| سرعت | ۳۰ | ۸۰ | ۱۱۰ | ۲۵۰ | ۳۰۰ |
|---------------------|----------|----------|---------|----------|---------|
| حداکثر جابجایی قائم | ۰,۹۵۹۲۴۶ | ۱,۰۰۷۸۳۱ | ۱,۱۵۸۹۳ | ۱,۲۲۲۹۶۷ | ۱,۳۰۱۰۴ |
| نسبت افزایش | - | ۱,۰۵۰۶ | ۱,۲۰۸ | ۱,۲۷۴ | ۱,۳۵۶ |

جدول ۴-۶: مقادیر حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP3 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۵ تن)

۴-۳-۸- بررسی تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی پل در

روسازی نردبانی

در این قسمت تأثیر افزایش سرعت بر عملکرد روسازی نردبانی در محور عرضی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سرعت‌های موردنظر برابر ۳۰، ۸۰، ۱۱۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. نمودارهای ۴-۲۹ تا ۴-۳۱، نتایج را به نمایش می‌گذارد که در ادامه به توضیح آن‌ها خواهیم پرداخت.

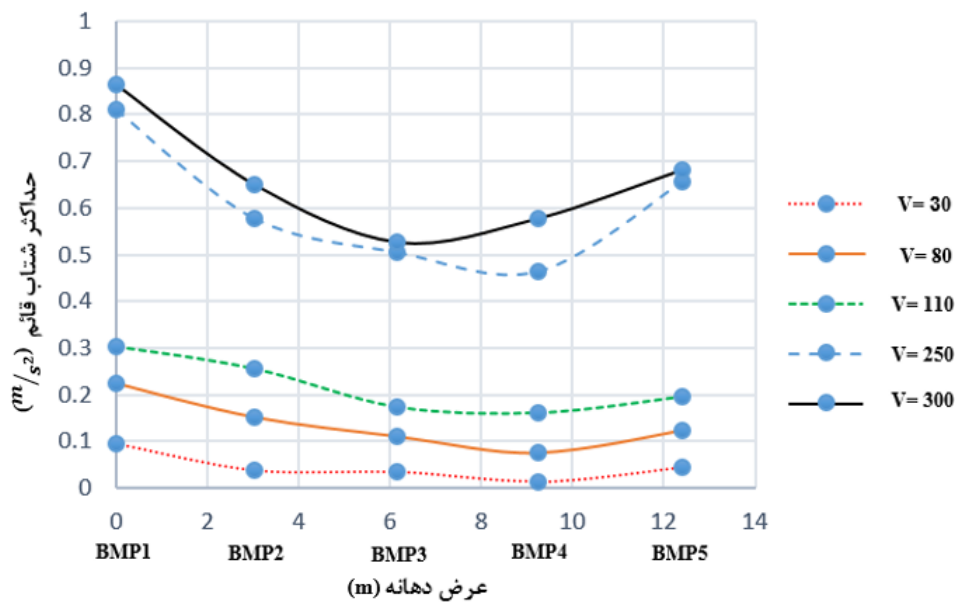


نمودار ۴-۲۹: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۱۴ تن)

با توجه به نمودار ۴-۲۹، مشاهده می‌شود که در بار محوری ۱۴ تن با افزایش سرعت وسیله نقلیه، حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی عرشه پل افزایش می‌یابد. در این محور حداکثر شتاب قائم در نقطه BMP1 اتفاق می‌افتد. میزان حداکثر شتاب قائم در نقطه بیشینه و همچنین میزان افزایش شتاب نسبت به سرعت ۳۰ کیلومتر در ساعت در جدول ۴-۷ نشان داده شده است.

| سرعت | ۳۰ | ۸۰ | ۱۱۰ | ۲۵۰ | ۳۰۰ |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| حداکثر شتاب قائم | ۰,۰۹۰۷۴۱ | ۰,۲۱۱۹۹۴ | ۰,۲۶۷۷۳۶ | ۰,۶۵۸۰۰۲ | ۰,۷۸۴۲۵۰ |
| نسبت افزایش | - | ۲,۳۳۶ | ۲,۹۵۰ | ۵,۲۶۱ | ۸,۶۴۲ |

جدول ۴-۷: مقادیر حداکثر شتاب قائم در نقطه BMP1 بر حسب سرعت (بار محوری ۱۴ تن)

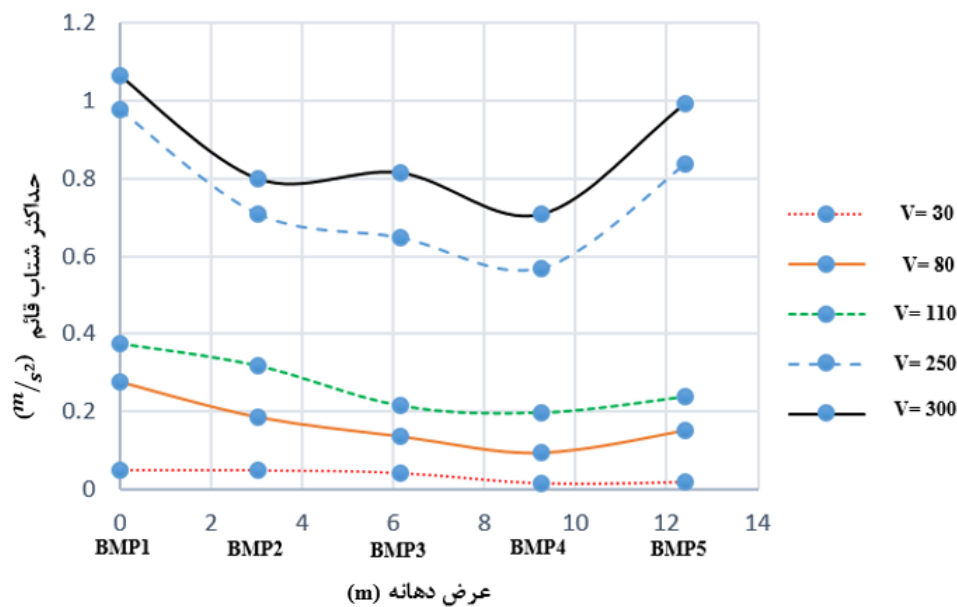


نمودار ۴-۳: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۰ تن)

با توجه به نمودار ۴-۳، مشاهده می‌شود که در بار محوری ۲۰ تن با افزایش سرعت وسیله نقلیه، حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی عرشه پل افزایش می‌یابد. در این محور حداکثر شتاب قائم در نقطه BMP1 اتفاق می‌افتد. در ادامه میزان حداکثر شتاب قائم در نقطه بیشینه و همچنین میزان افزایش شتاب نسبت به سرعت ۳۰ کیلومتر در ساعت در جدول ۴-۸ نشان داده شده‌است.

| سرعت | ۳۰ | ۸۰ | ۱۱۰ | ۲۵۰ | ۳۰۰ |
|------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| حداکثر شتاب قائم | ۰,۰۹۵۰۳۸۸ | ۰,۲۲۵۵۰۸ | ۰,۳۰۴۵۰۴ | ۰,۸۰۹۲۶۳ | ۰,۸۶۵۱۱۵ |
| نسبت افزایش | - | ۲,۳۷۲ | ۳,۲۰۳ | ۸,۵۱۵ | ۹,۱۰۲ |

جدول ۴-۸: مقادیر حداکثر شتاب قائم در نقطه BMP1 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۰ تن)



نمودار ۴-۳۱: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر شتاب قائم نقاط محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۵ تن)

با توجه به نمودار ۴-۳۱، مشاهده می‌شود که در بار محوری ۲۵ تن با افزایش سرعت وسیله نقلیه، حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی عرشه پل افزایش می‌یابد. در این محور حداکثر شتاب قائم در نقطه BMP1 اتفاق می‌افتد. در ادامه میزان حداکثر شتاب قائم در نقطه بیشینه و همچنین میزان افزایش شتاب نسبت به سرعت ۳۰ کیلومتر در ساعت در جدول ۴-۹ نشان داده شده است.

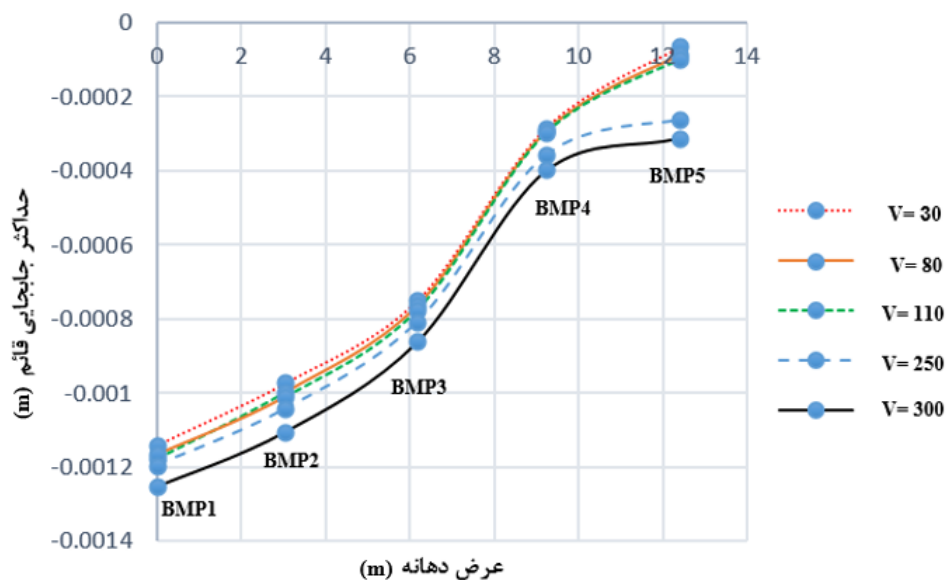
| سرعت | ۳۰ | ۸۰ | ۱۱۰ | ۲۵۰ | ۳۰۰ |
|------------------|-----------|----------|----------|----------|---------|
| حداکثر شتاب قائم | ۰,۰۴۹۰۱۲۹ | ۰,۲۷۶۸۴۸ | ۰,۳۷۳۶۷۵ | ۰,۹۷۶۷۶۸ | ۱,۰۶۲۸۶ |
| نسبت افزایش | - | ۵,۶۴۸ | ۷,۶۲۴ | ۱۹,۹۲۸ | ۲۱,۶۸۵ |

جدول ۴-۹: مقادیر حداکثر شتاب قائم در نقطه BMP1 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۵ تن)

۹-۳-۴- بررسی تأثیر سرعت بر میزان حداکثر جابجایی قائم در محور عرضی و میانی پل

در روسازی نردبانی

در این قسمت تأثیر افزایش سرعت بر عملکرد روسازی نردبانی در محور عرضی را مورد بررسی خواهیم داد. سرعت‌های موردنظر برابر ۳۰، ۸۰، ۱۱۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. نمودارهای ۴-۳۲ تا ۴-۳۴، نتایج را به نمایش می‌گذارد که در ادامه به توضیح آن‌ها خواهیم پرداخت.

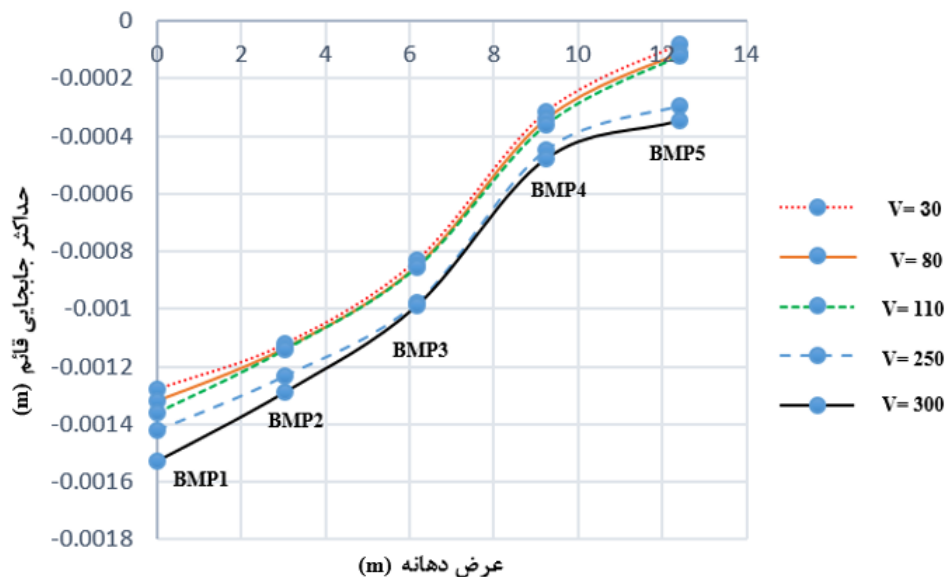


نمودار ۴-۳۲: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر جابجایی قائم نقاط محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۱۴ تن)

با توجه به نمودار ۴-۳۲، در بار محور ۱۴ تن با افزایش سرعت سیر، حداکثر جابجایی قائم عرشه پل در راستای عرضی افزایش یافته که در نقطه BMP1 اتفاق می‌افتد. در ادامه میزان حداکثر شتاب قائم در نقطه بیشینه و همچنین میزان افزایش شتاب نسبت به سرعت ۳۰ کیلومتر در ساعت در جدول ۴-۱۰ نشان داده شده‌است.

| سرعت | ۳۰ | ۸۰ | ۱۱۰ | ۲۵۰ | ۳۰۰ |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| حداکثر جابجایی قائم | ۰,۰۰۱۱۴۱۸۷ | ۰,۰۰۱۱۷۶۳۱ | ۰,۰۰۱۱۶۵۸۴ | ۰,۰۰۱۱۹۳۸۸ | ۰,۰۰۱۲۵۰۲۴ |
| نسبت افزایش | - | ۱,۰۲۴ | ۱,۰۱۴۹ | ۱,۰۳۹ | ۱,۰۸۸ |

جدول ۴-۱۰: مقادیر حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP1 بر حسب سرعت (بار محوری ۱۴ تن)



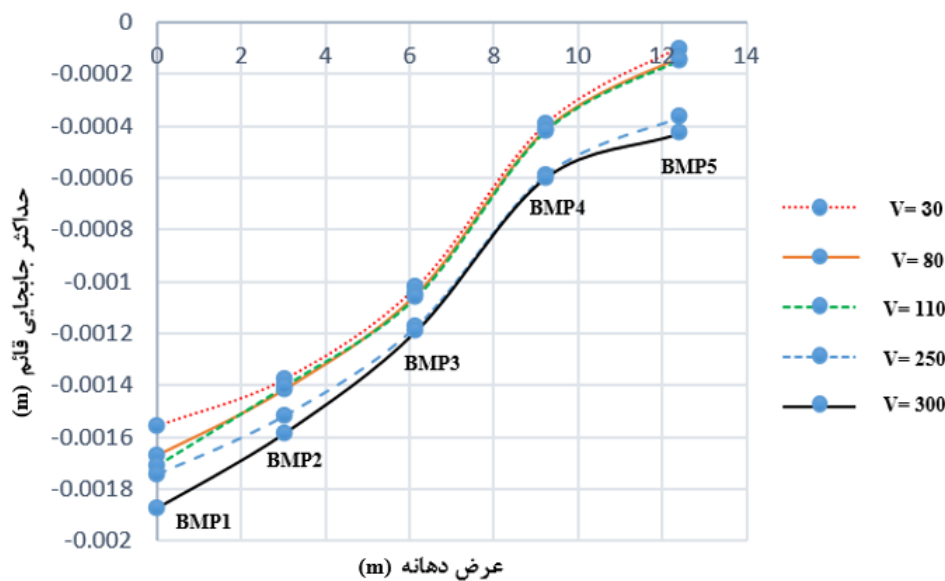
نمودار ۴-۳۳: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر جابجایی قائم نقاط محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۰ تن)

با توجه به نمودار ۴-۳۳، در بار محور ۲۰ تن با افزایش سرعت سیر، حداکثر جابجایی قائم عرشه پل در راستای عرضی افزایش یافته که در نقطه BMP1 اتفاق می‌افتد. در ادامه میزان حداکثر شتاب قائم در نقطه

بیشینه و همچنین میزان افزایش شتاب نسبت به سرعت ۳۰ کیلومتر در ساعت در جدول ۴-۱۱ نشان داده شده است.

| سرعت | ۳۰ | ۸۰ | ۱۱۰ | ۲۵۰ | ۳۰۰ |
|---------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|
| حداکثر جابجایی قائم | ۰,۰۰۱۲۷۸۰۶ | ۰,۰۰۱۳۱۹۹۵ | ۰,۰۰۱۳۶۱۷ | ۰,۰۰۱۴۲۰۷۵ | ۰,۰۰۱۵۲۸۰۹ |
| نسبت افزایش | - | ۱,۰۳۲۷ | ۱,۰۶۵ | ۱,۱۱۱ | ۱,۱۹۵ |

جدول ۴-۱۱: مقادیر حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP1 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۰ تن)



نمودار ۴-۳۴: مقایسه تأثیر سرعت بر میزان حداکثر جابجایی قائم نقاط محور عرضی و میانی پل در روسازی نردبانی (بار محوری ۲۵ تن)

با توجه به نمودار ۴-۳۴، در بار محور ۲۵ تن با افزایش سرعت سیر، حداکثر جابجایی قائم عرشه پل در راستای عرضی افزایش یافته که در نقطه BMP1 اتفاق می افتد. در ادامه میزان حداکثر شتاب قائم در نقطه بیشینه و همچنین میزان افزایش شتاب نسبت به سرعت ۳۰ کیلومتر در ساعت در جدول ۴-۱۲ نشان داده شده است.

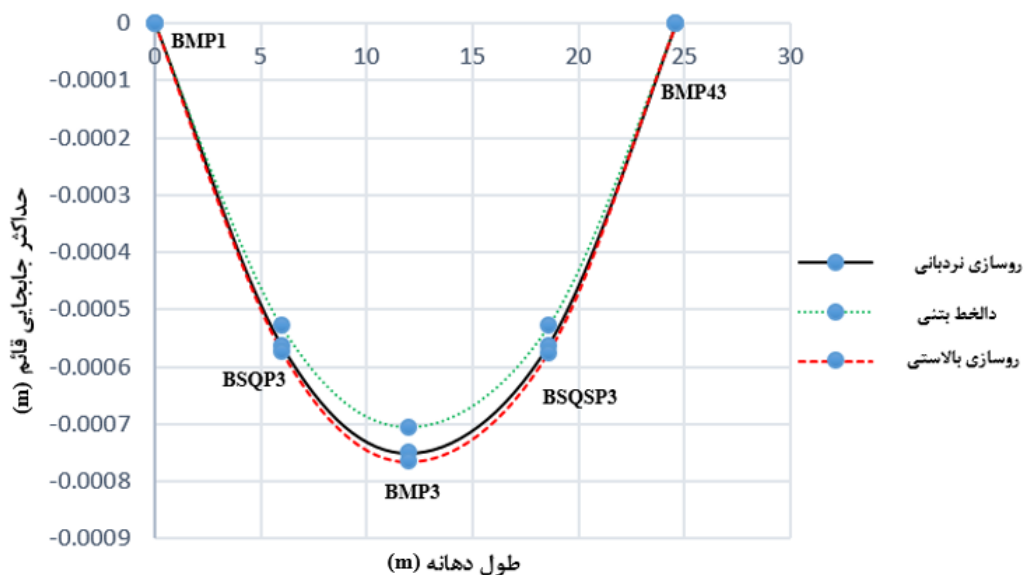
| سرعت | ۳۰ | ۸۰ | ۱۱۰ | ۲۵۰ | ۳۰۰ |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| حداکثر جابجایی قائم | ۰,۰۰۱۵۵۶۵۴ | ۰,۰۰۱۶۷۱۵۵ | ۰,۰۰۱۷۰۹۹۵ | ۰,۰۰۱۷۴۳۶۴ | ۰,۰۰۱۸۷۵۵۲ |
| نسبت افزایش | - | ۱,۰۷۳ | ۱,۰۹۸ | ۱,۱۲۰ | ۱,۲۰۴ |

جدول ۴-۱۲: مقادیر حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP1 بر حسب سرعت (بار محوری ۲۵ تن)

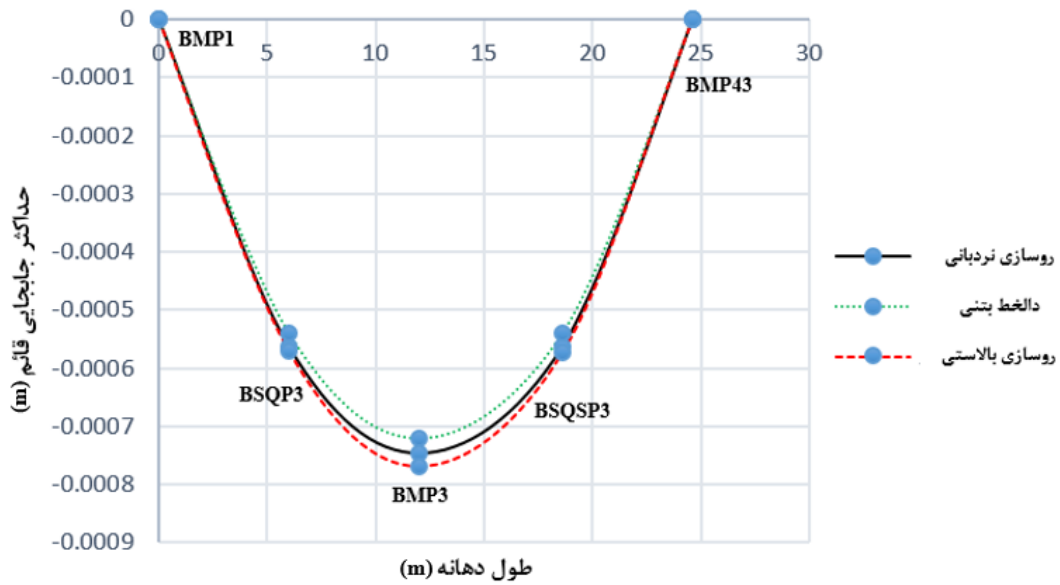
۴-۳-۱۰- بررسی تأثیر به کارگیری انواع روسازی در میزان حداکثر جابجایی قائم در امتداد

محور طولی

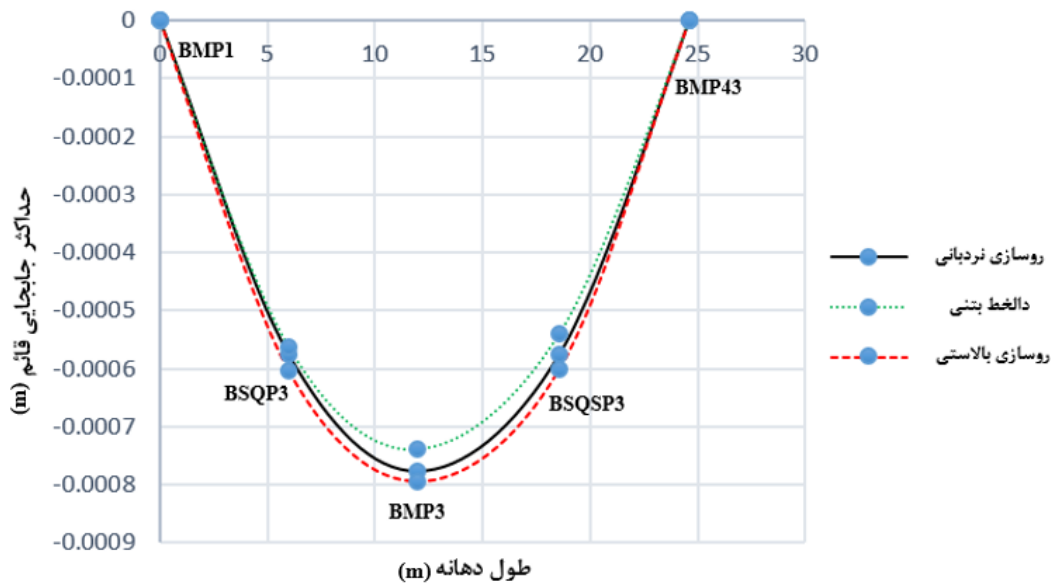
در این قسمت به بررسی تأثیر استفاده از سه نوع روسازی نردبانی، بالاستی و دالخط بتنی بر میزان جابجایی قائم عرشه پل خواهیم پرداخت. لازم به ذکر می‌باشد که این بررسی در بار محوری ۱۴ تن که بار اصلی و پایه قطار می‌باشد انجام شده‌است.



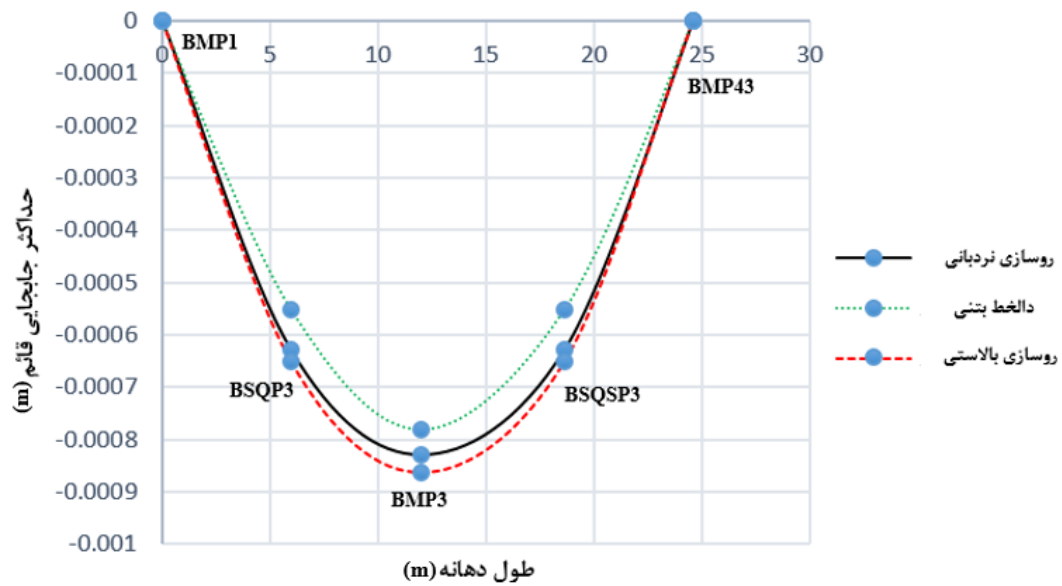
نمودار ۴-۳۵: مقایسه تأثیر روسازی‌ها بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت)



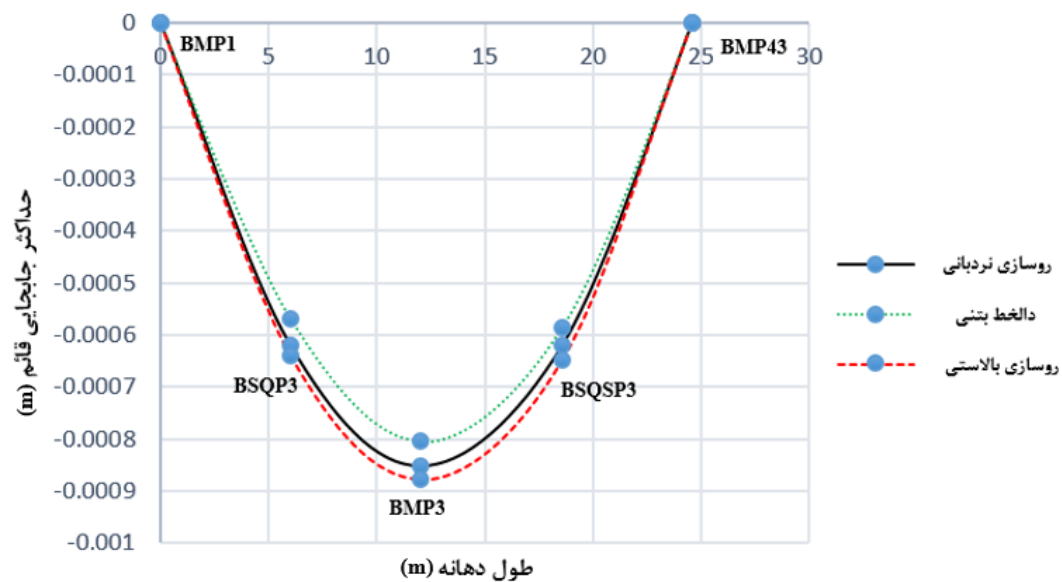
نمودار ۴-۳۶: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت)



نمودار ۴-۳۷: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت)



نمودار ۴-۳۸: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت)



نمودار ۴-۳۹: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت)

با دقت در نمودارهای ۴-۳۵ تا ۴-۳۹ مشاهده می‌گردد که دالخط بتنی در هر جهت طولی در کاهش حداکثر جابجایی قائم بهتر از روسازی نردبانی و نیز روسازی نردبانی بهتر از روسازی بالاستی عمل می‌نماید. روسازی بالاستی به دلیل دانه‌ای بودن، با وارد شدن بار، جابجایی به مراتب بیشتری خواهد داشت. ولی روسازی‌های دالخط بتنی و نردبانی به دلیل بتنی بودن، دارای قدرت بیشتر در جذب جابجایی قائم می‌باشند. لازم به یادآوری می‌باشد که جابجایی دو انتهای دهانه برابر صفر بوده و جابجایی قائم در نقطه $BMP3$ حداکثر می‌باشد. در جدول ۴-۱۳، مقادیر حداکثر جابجایی قائم برحسب نوع روسازی و سرعت سیر در امتداد طولی نشان داده شده‌است.

| سرعت | روسازی نردبانی | روسازی دالخط بتنی | روسازی بالاستی |
|------|----------------|-------------------|----------------|
| ۳۰ | ۰,۷۵۰۶۴۶ | ۰,۷۰۵۴۴۵ | ۰,۷۶۵۸۸۴۸ |
| ۸۰ | ۰,۷۴۵۵۸۳ | ۰,۷۲۱۰۰۷ | ۰,۷۶۸۶۸۳ |
| ۱۱۰ | ۰,۷۷۵۷۳۳ | ۰,۷۳۹۰۴۹ | ۰,۷۹۳۳۵۸ |
| ۲۵۰ | ۰,۸۲۸۰۷۳ | ۰,۷۸۲۱۵۲ | ۰,۸۶۱۹۱۸ |
| ۳۰۰ | ۰,۸۵۱۶۳۸ | ۰,۸۰۴۷۱ | ۰,۸۷۷۳۷۹ |

جدول ۴-۱۳: مقادیر حداکثر جابجایی قائم برحسب نوع روسازی و سرعت سیر در امتداد طولی

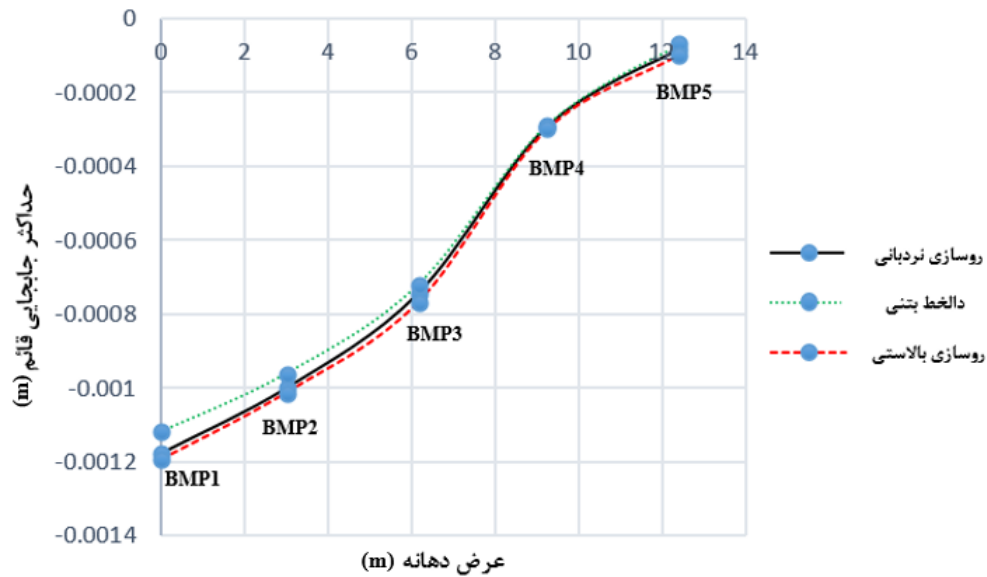
۴-۳-۱۱- بررسی تأثیر به‌کارگیری انواع روسازی در میزان حداکثر جابجایی قائم در امتداد

محور عرضی

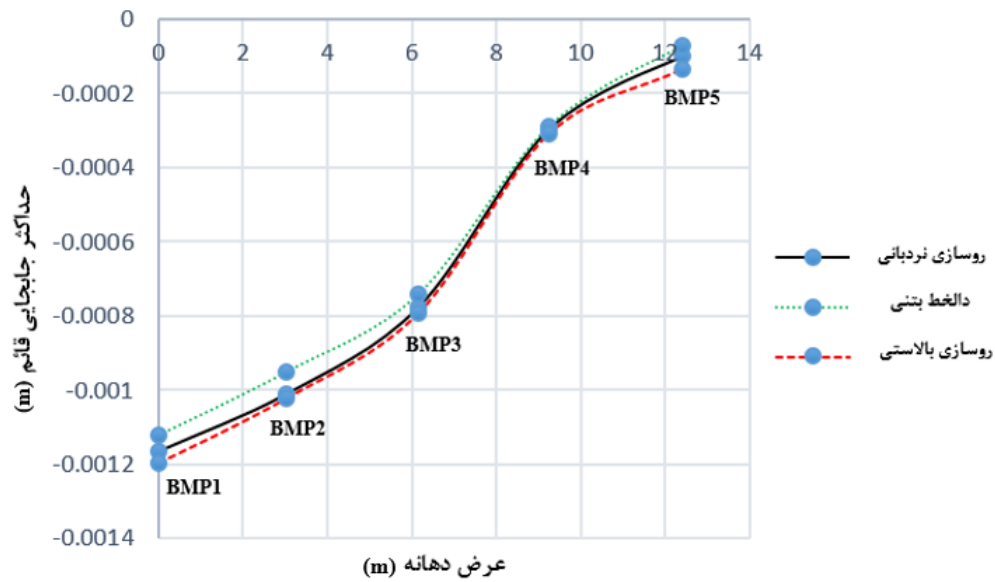
در این قسمت به بررسی تأثیر استفاده از سه نوع روسازی نردبانی، بالاستی و دالخط بتنی بر میزان جابجایی قائم عرشه پل در امتداد عرضی خواهیم پرداخت.



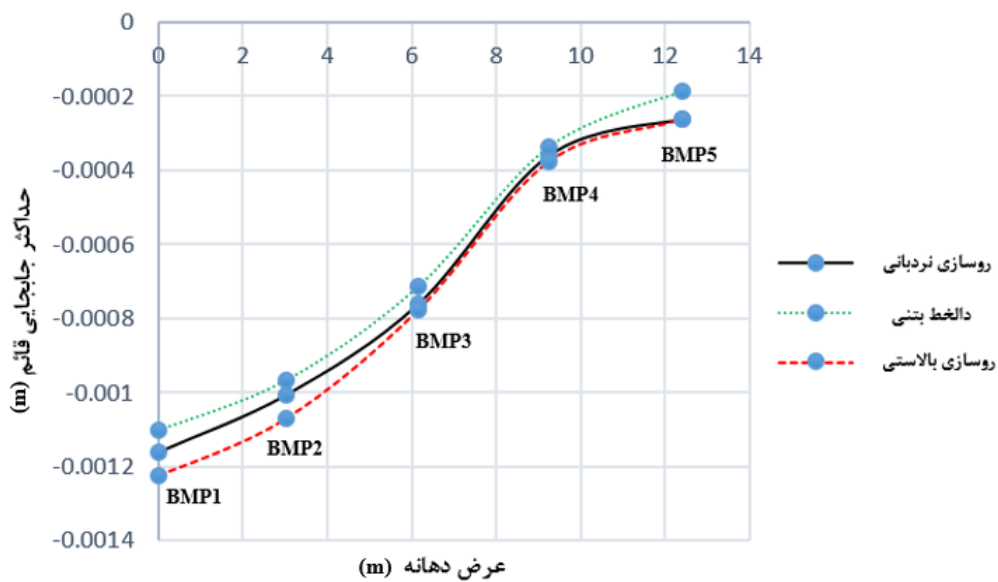
نمودار ۴-۴۰: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت)



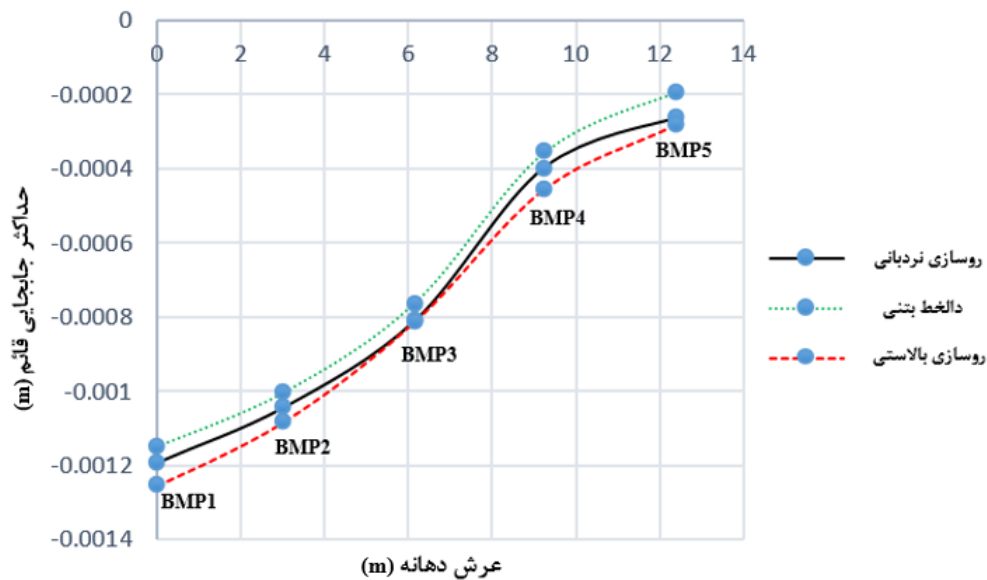
نمودار ۴-۴۱: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت)



نمودار ۴۲-۴: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت)



نمودار ۴۳-۴: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت)



نمودار ۴-۴: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت)

با دقت به نمودارهای ۴-۴ تا ۴-۴ مشاهده می‌گردد که دالخط بتنی در هر جهت طولی در کاهش حداکثر جابجایی قائم بهتر از روسازی نردبانی و نیز روسازی نردبانی بهتر از روسازی بالاستی عمل می‌نماید. در امتداد عرضی، بیشترین مقدار حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP1 و کمترین مقدار حداکثر جابجایی قائم در نقطه BMP5 اتفاق می‌افتد. همچنین با توجه به نمودارها مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت، بر میزان حداکثر جابجایی افزوده شده و نسبت این افزایش خطی نمی‌باشد. مقادیر حداکثر جابجایی قائم برحسب نوع روسازی و سرعت سیر در امتداد عرضی در جدول ۴-۱۳ نشان داده شده‌است.

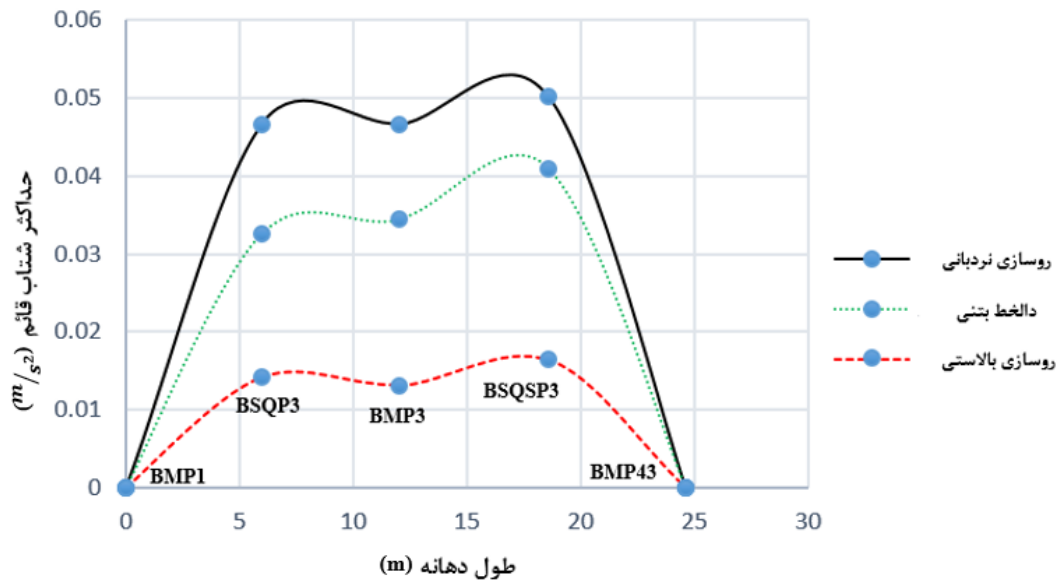
| روسازی بالاستی | روسازی دالخط بتنی | روسازی نردبانی | سرعت |
|----------------|-------------------|----------------|------|
| ۰,۰۰۱۱۸۵۳۱ | ۰,۰۰۱۰۹۷۵۱ | ۰,۰۰۱۱۴۱۸۷ | ۳۰ |
| ۰,۰۰۱۱۹۱۸۷ | ۰,۰۰۱۱۱۶۷۵ | ۰,۰۰۱۱۷۶۳۱ | ۸۰ |
| ۰,۰۰۱۱۹۷۰۹ | ۰,۰۰۱۱۲۰۲۶ | ۰,۰۰۱۱۶۵۸۴ | ۱۱۰ |
| ۰,۰۰۱۲۲۲۸۶ | ۰,۰۰۱۱۰۲۶۶ | ۰,۰۰۱۱۶۰۲۴ | ۲۵۰ |
| ۰,۰۰۱۲۵۳۸۸ | ۰,۰۰۱۱۴۹۱۷ | ۰,۰۰۱۱۹۳۸۸ | ۳۰۰ |

جدول ۴-۱۴: مقادیر حداکثر جابجایی قائم برحسب نوع روسازی و سرعت سیر (در امتداد عرضی)

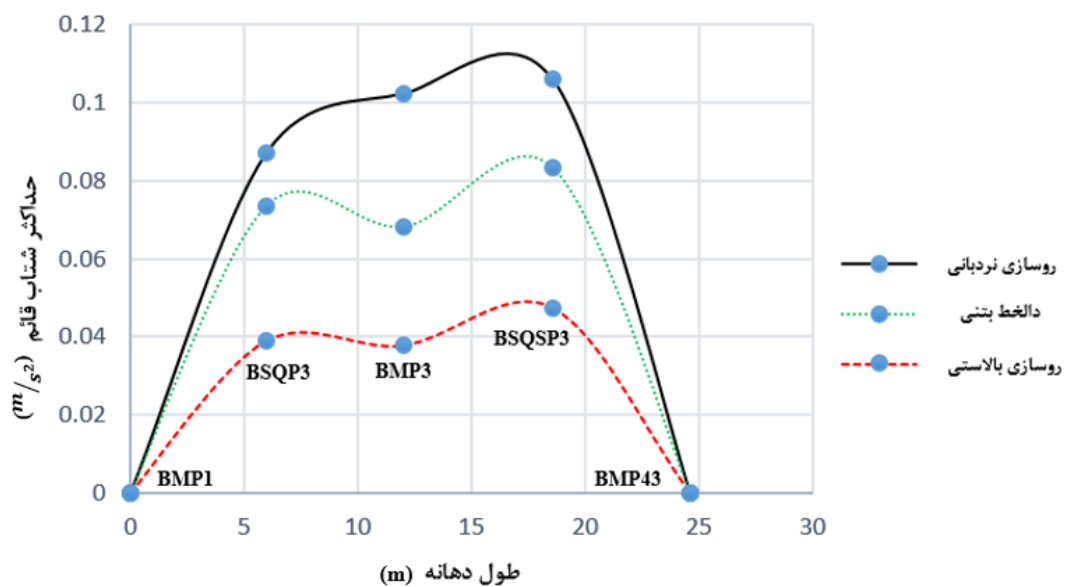
۴-۳-۱۲- بررسی تأثیر به کارگیری انواع روسازی در میزان حداکثر شتاب قائم در امتداد

محور طولی

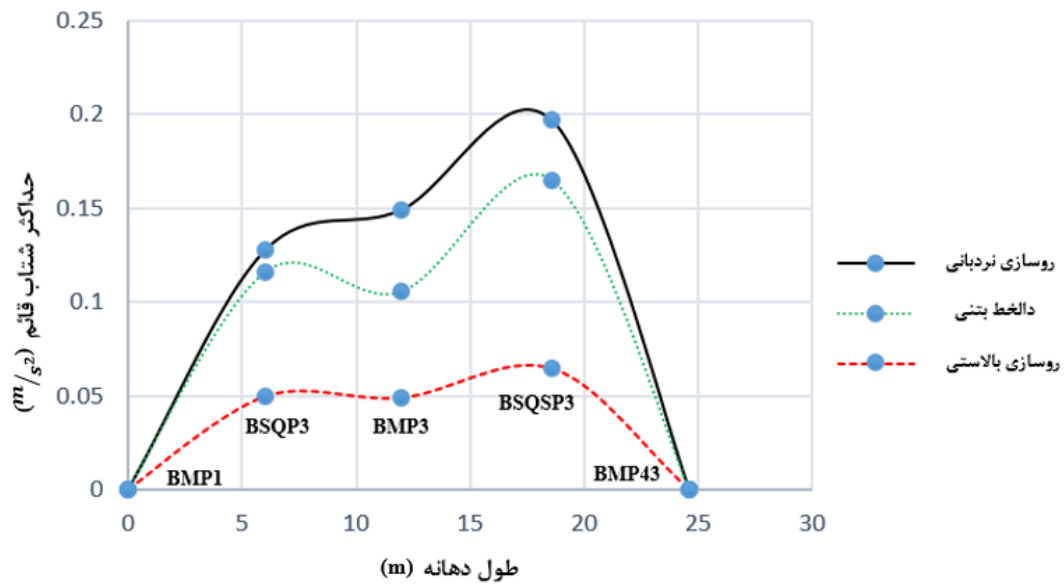
در این قسمت به بررسی تأثیر استفاده از سه نوع روسازی نردبانی، بالاستی و دالخط بتنی و دالخط بتنی بر میزان شتاب قائم عرشه پل در امتداد عرضی خواهیم پرداخت.



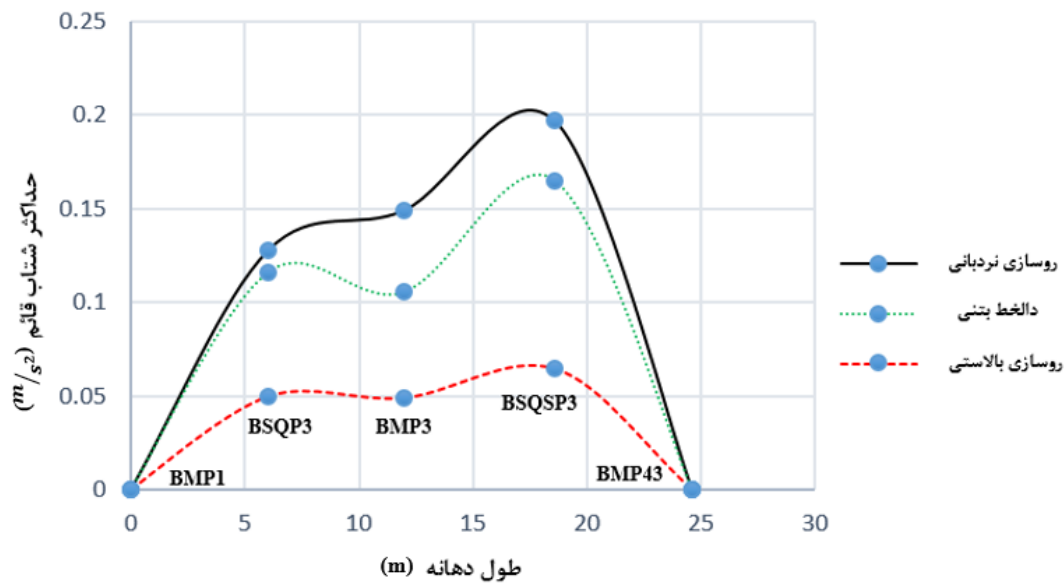
نمودار ۴-۴۵: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت)



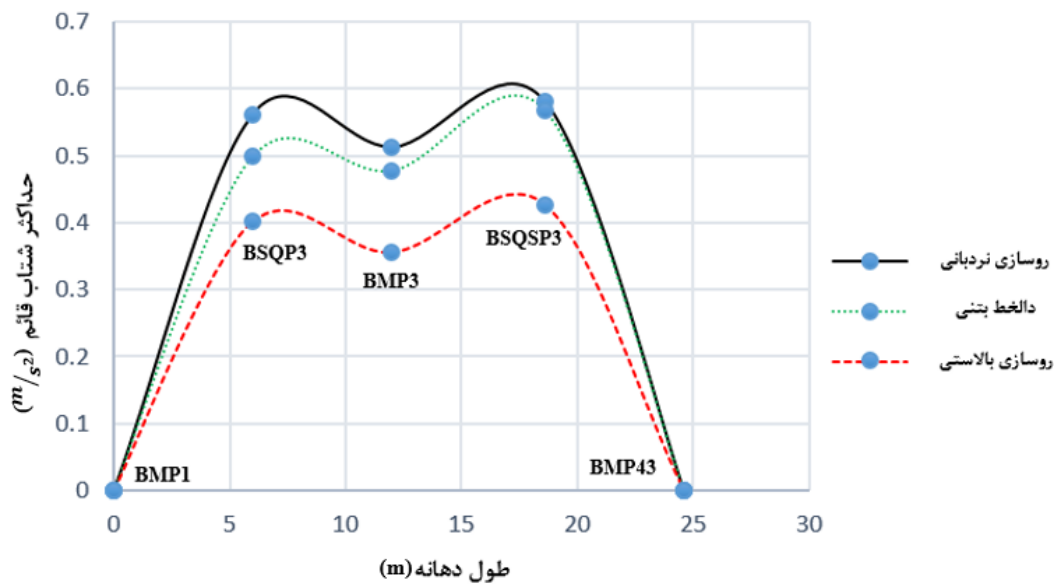
نمودار ۴-۴۶: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت)



نمودار ۴-۴۷: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت)



نمودار ۴-۴۸: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت)



نمودار ۴-۴۹: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر جابجایی قائم نقاط محور طولی پل (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت)

با دقت به نمودارهای ۴-۴۵ تا ۴-۴۹ مشاهده می‌گردد که در جهت طولی روسازی بالاستی بهتر از روسازی دالخط بتنی و نیز روسازی دالخط بتنی بهتر از روسازی نردبانی عمل می‌نماید. روسازی بالاستی به دلیل دانه‌ای بودن و دارا بودن تخلخل بین دانه‌ای از قدرت جذب بالا در کاهش ارتعاشات برخوردار می‌باشد. با توجه به نمودارهای مذکور، در امتداد طول بیشترین مقدار شتاب قائم در نقطه BSQP3 یا همان نقطه واقع در یک چهارم انتهایی عرشه پل اتفاق می‌افتد. مانند سایر نتایج، مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت سیر نیز بر میزان حداکثر شتاب قائم افزوده می‌شود. در جدول ۴-۱۴، مقادیر حداکثر شتاب قائم بر حسب نوع روسازی و سرعت سیر در امتداد طولی نشان داده شده‌است.

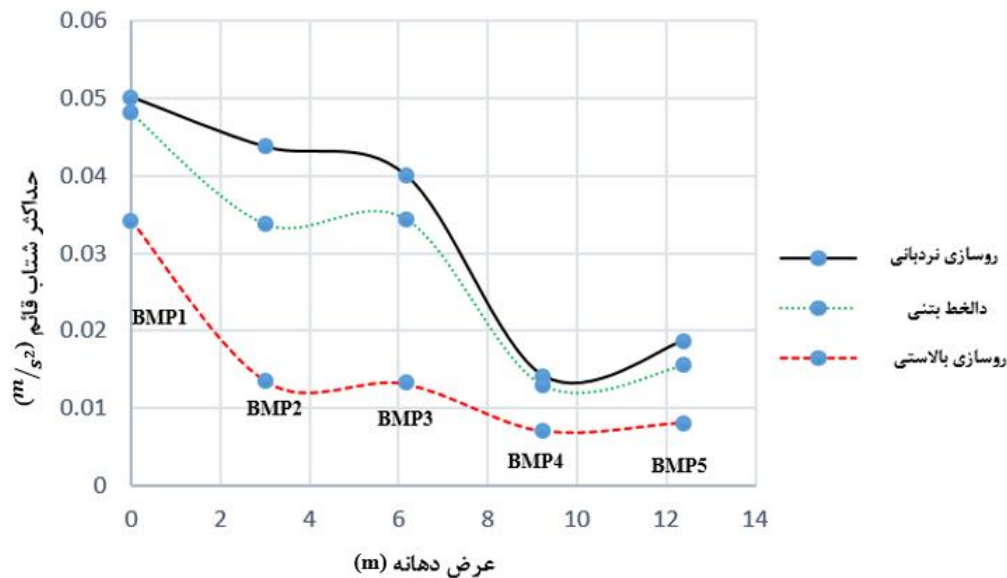
| سرعت | روسازی نردبانی | روسازی دالخط بتنی | روسازی بالاستی |
|------|----------------|-------------------|----------------|
| ۳۰ | ۰,۵۰۱۹۶۴ | ۰,۴۰۰۹۵۷۵ | ۰,۰۱۶۳۹۸ |
| ۸۰ | ۰,۱۰۵۸۷۴ | ۰,۰۸۳۲۷۵۱ | ۰,۰۴۷۳۲۱۱ |
| ۱۱۰ | ۰,۱۹۶۸۵۷ | ۰,۱۶۵۱۱۶ | ۰,۰۶۴۵۱۱۱ |
| ۲۵۰ | ۰,۵۵۷۲۷۵ | ۰,۴۸۰۵۰۲ | ۰,۳۰۹۱۵ |
| ۳۰۰ | ۰,۵۸۰۹۲۳ | ۰,۵۶۸۱۸۶ | ۰,۴۲۷۰۸۳ |

جدول ۴-۱۵: مقادیر حداکثر شتاب قائم بر حسب نوع روسازی و سرعت سیر (در امتداد طولی)

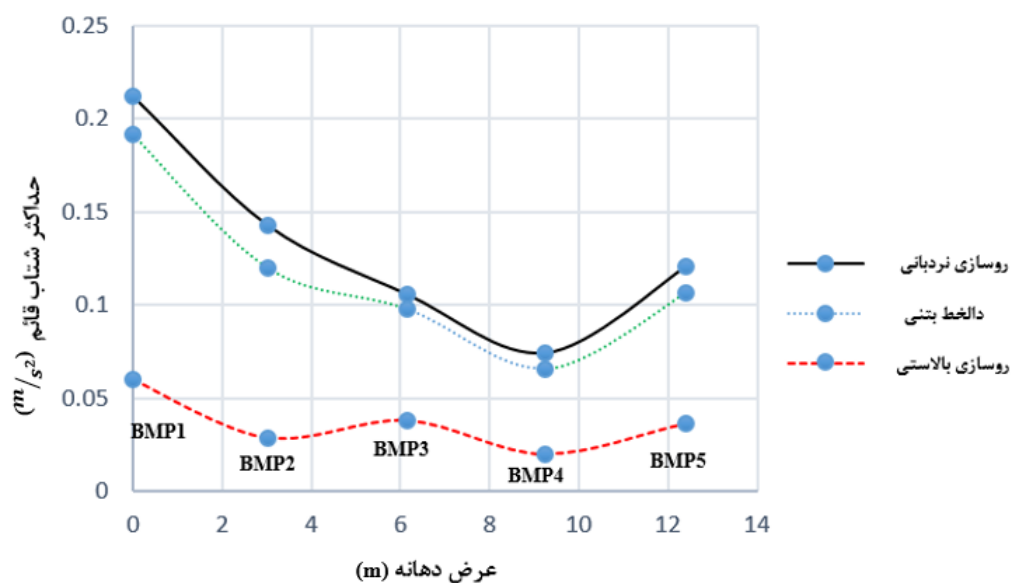
۴-۳-۱۳- بررسی تأثیر به‌کارگیری انواع روسازی در میزان حداکثر شتاب قائم در امتداد

محور عرضی

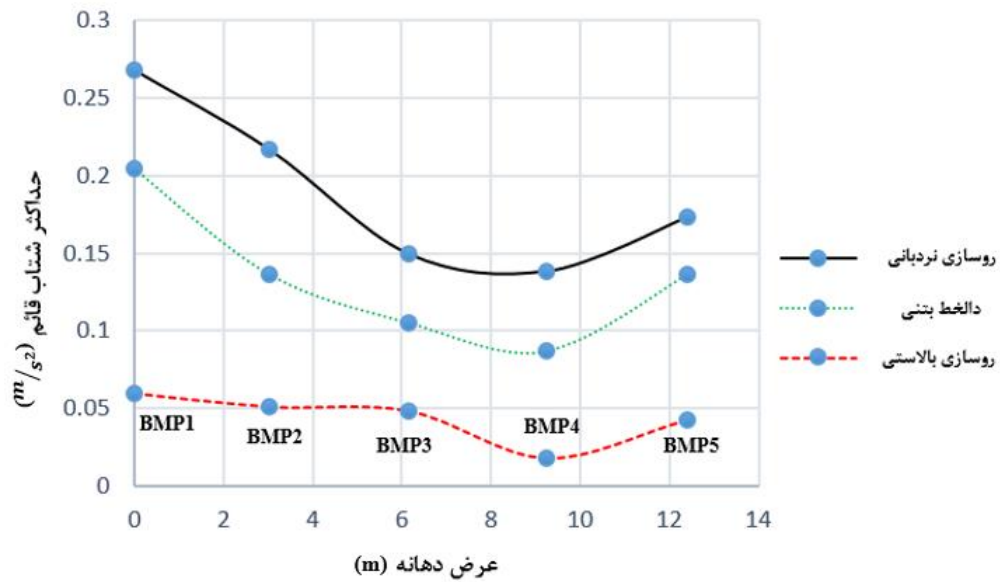
در این قسمت به بررسی تأثیر استفاده از سه نوع روسازی نردبانی، بالاستی و دالخط بتنی بر میزان شتاب قائم عرشه پل در امتداد عرضی خواهیم پرداخت.



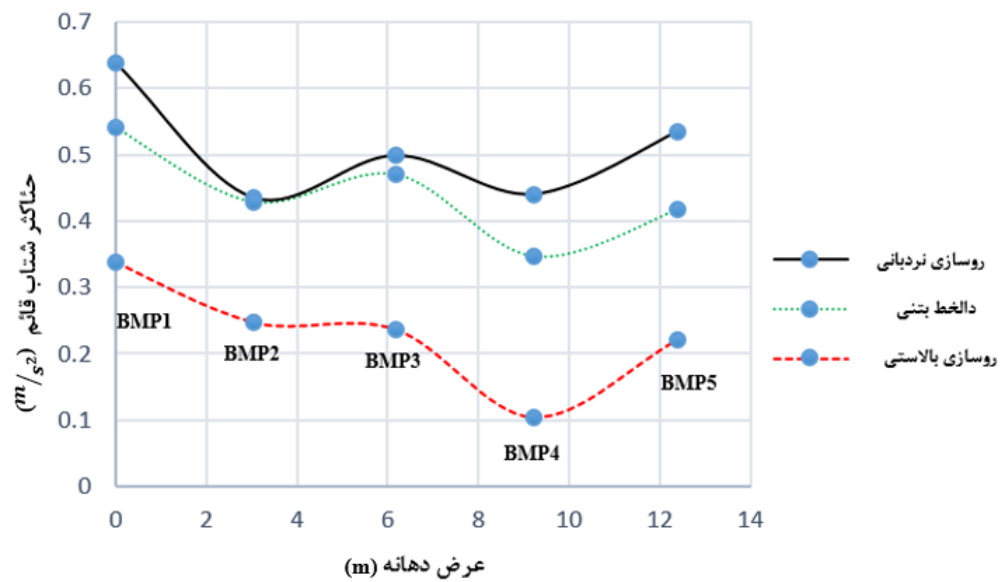
نمودار ۴-۵۰: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت)



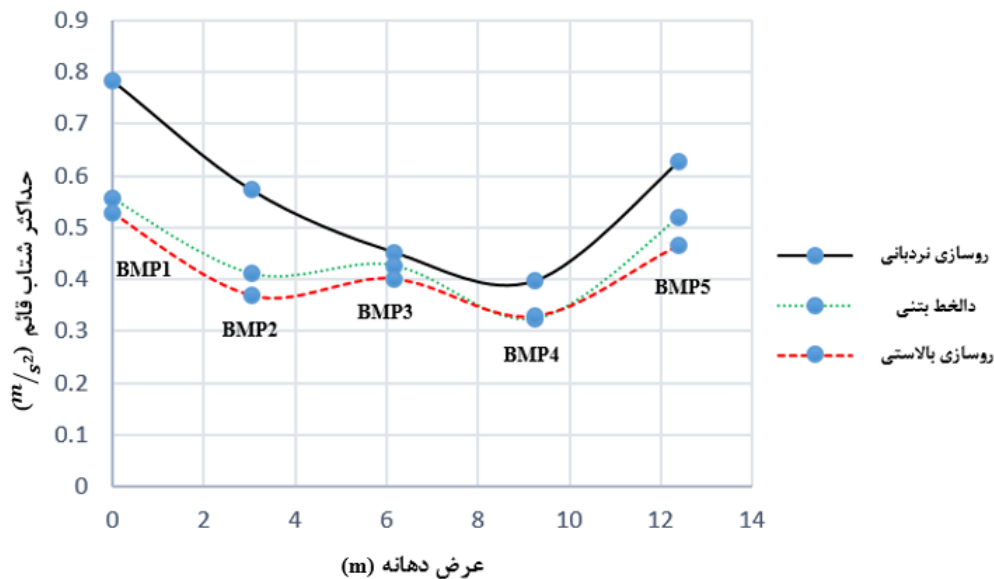
نمودار ۴-۵۱: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت)



نمودار ۴-۵۲: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت)



نمودار ۴-۵۳: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت)



نمودار ۴-۵۴: مقایسه تأثیر روسازی بر حداکثر شتاب قائم در محور عرضی و میانی پل (سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت)

نمودارهای ۴-۵۰ الی ۴-۵۴، تغییرات حداکثر شتاب قائم را در انواع روسازی در سرعت‌های ۳۰ کیلومتر بر ساعت الی ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود که در کاهش حداکثر شتاب قائم روسازی بالاستی بهتر از روسازی دالخط بتنی و روسازی دالخط بتنی نیز بهتر از روسازی نردبانی عمل می‌نماید. دلیل کاهش بهتر حداکثر شتاب قائم در روسازی بالاستی نسبت به دو روسازی دیگر، دانه‌ای بودن این روسازی می‌باشد که به دلیل تخلخل بین دانه‌ها، باعث بهتر جذب کردن ارتعاشات وارده می‌شود. لازم به ذکر می‌باشد که روسازی نردبانی مورد استفاده در این تحقیق از نوع نردبانی شناور اجرا شده بر روی بستر بتنی تخت می‌باشد؛ حال اگر از نوع روسازی نردبانی شناور اجرا شده بر روی بستر بتنی تخت همراه با المان دایره‌ای استفاده نماییم، این نتیجه قطعاً بهتر خواهد شد؛ چراکه فلسفه تولید این نوع از روسازی‌ها، جذب بیش از پیش ارتعاشات وارد بر پل‌های راه‌آهن می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج مشخص می‌شود که در راستای عرضی حداکثر شتابی قائم در نقطه BMP1 اتفاق افتاده و حداقل شتاب قائم نیز در نقطه BMP5 به وقوع می‌پیوندد. مقادیر حداکثر شتاب قائم برحسب نوع روسازی و سرعت سیر در امتداد عرضی در جدول ۴-۱۵ نشان داده شده‌است.

| روسازی بالاستی | روسازی دالخط بتنی | روسازی نردبانی | سرعت |
|----------------|-------------------|----------------|------|
| ۰,۰۳۴۱۷۸۲ | ۰,۰۴۸۰۷۴۱ | ۰,۰۵۰۱۹۶۴ | ۳۰ |
| ۰,۰۵۹۵۹۶۶ | ۰,۱۹۲۰۳۶ | ۰,۲۱۱۹۹۴ | ۸۰ |
| ۰,۰۵۹۷۴۸۷ | ۰,۲۰۴۳۷۲ | ۰,۲۶۷۷۳۶ | ۱۱۰ |
| ۰,۳۳۸۰۷۲ | ۰,۵۴۱۳۶ | ۰,۶۳۸۰۰۲ | ۲۵۰ |
| ۰,۵۲۹۴۸۳ | ۰,۵۵۵۹۵۵ | ۰,۳۹۶۹۶۴ | ۳۰۰ |

جدول ۴-۱۶: مقادیر حداکثر شتاب قائم برحسب نوع روسازی و سرعت سیر
(در امتداد عرضی)

فصل ۵

جمع‌بندی و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

پژوهش حاضر با هدف مقایسه‌ی تأثیر میزان افزایش سرعت و بار محوری قطار سریع‌السیر بر روی پاسخ‌های دینامیکی پل و همچنین نحوه عملکرد سه نوع روسازی تحت حرکت قطار با نرم‌افزار آباکوس^۱ انجام گردید. گزارش حاصل در پنج فصل تنظیم گشت. فصل اول به بیان کلیاتی در رابطه با هدف انجام تحقیق، فرضیات و سوالات اختصاص داده‌شد. در فصل دوم کلیات پل‌های خط‌آهن سریع‌السیر، توضیحات درمورد روسازی نردبانی و نیز نحوه انواع مدل‌سازی وسیله نقلیه و پل توضیح داده‌شده، و در آخر به بیان پیشینه‌ی پژوهش پرداخته‌شد. در فصل سوم توضیحاتی در مورد روش اجزاء محدود، نرم‌افزار آباکوس، نحوه‌ی مدل‌سازی، و صحت‌سنجی ارائه شد. نتایج حاصل از تحلیل در قالب نمودارهایی در فصل چهارم ارائه و توضیحاتی درمورد این نمودارها داده شد. فصل حاضر تحت عنوان جمع‌بندی و پیشنهادات، به جمع‌بندی نتایج پژوهش و همچنین ارائه‌ی پیشنهادات اختصاص یافته است.

۵-۲- جمع بندی

با توجه به نتایج حاصله از پژوهش مشخص گردید که روسازی نردبانی دارای خصوصیات دینامیکی نزدیک به روسازی دال‌خط بتنی بوده ولی تا حدودی ضعیف‌تر از آن عمل می‌نماید؛ ولی باید به این موضوع اشاره نماییم که با توجه به این‌که اقتصاد مهندسی در همه پروژه‌های کلان از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد، می‌توان به‌جای استفاده از روسازی دال‌خط بتنی از روسازی نردبانی استفاده نمود. حال آن‌که این روسازی امتحان خود را در خطوط سریع‌السیر شینکانسن کشور ژاپن که از سال ۱۹۵۶ تا کنون در حال سرویس‌دهی می‌باشد، پس داده‌است. اما در مورد روسازی بالاستی باید اشاره کرد که به‌دلیل دانه‌ای بودن مصالح بالاست، این روسازی در جذب و کاهش شتاب قائم موفق عمل می‌نماید؛ ولی به دلایل ذیل از لحاظ کاهش جابجایی‌ها و استفاده بر روی پل‌ها توجیه مهندسی ندارد:

^۱Abaqus

- اول این که روسازی بالاستی دارای هزینه اجرایی اولیه پایین‌تر نسبت به دو نوع دیگر روسازی می‌باشد، ولی هزینه نگهداری و تعمیر بالاتری داشته و در طولانی مدت مقرون به صرفه نمی‌باشد.
 - دلیل دوم وزن بالای بالاست می‌باشد؛ بنابراین برای کاهش بار مرده روی پل، تا حد امکان باید از استفاده بالاست بر روی پل‌ها اجتناب گردد و همچنین به دلیل این که استفاده از ماشین‌آلات نگهداری و تعمیر در تونل‌ها مشکل و بعضاً غیرممکن می‌باشد، بنابراین نباید از بالاست در تونل‌ها استفاده گردد.
 - سوم این که اگر روسازی بالاستی بر روی پل اجرا شود، عبور وسیله نقلیه ریلی باعث می‌شود که سنگ‌دانه‌های بالاست از روی پل به محیط اطراف پرتاب شده و باعث وارد آوردن خسارت به ابنیه و تأسیسات کنار مسیر گردد.
- در هر سه نوع روسازی با افزایش سرعت سیر و بار محوری، هم حداکثر جابجایی قائم و هم حداکثر شتاب قائم افزایش یافته و در سرعت‌های بالاتر برای این مقدار (سرعت ۲۵۰ و ۳۰۰)، فاین افزایش بیشتر می‌باشد. در انتها با توجه به نمودارهای ۴-۲۴ و ۴-۲۵ ارائه شده در فصل چهارم، در محدوده سرعت ۲۵۰ تا ۲۶۰ (سرعتی که صحت‌سنجی در آن انجام شده است) حداکثر شتاب قائم و حداکثر جابجایی قائم بیشترین مقدار خود را دارند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که در این محدوده فرکانس وارده بر پل از طرف وسیله نقلیه ریلی به فرکانس طبیعی پل نزدیک بوده و امکان رخ دادن پدیده تشدید بیشتر و محتمل‌تر می‌باشد.

۵-۳- پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آتی

- ۱- در این پژوهش تأثیر حرکت قطار در یک جهت مورد مطالعه قرار گرفته‌است، پیشنهاد می‌گردد تأثیر حرکت همزمان دو قطار در دو جهت مختلف، یک بار با سرعت‌های یکسان و بار دیگر با سرعت‌های متفاوت بر پاسخ‌های دینامیکی پل مورد بررسی قرار گیرد.
- ۲- در این پژوهش از تأثیرات نئوپرن بر میزان جذب ارتعاشات قائم پل صرف نظر شده‌است، لذا می‌توان در مطالعات بعدی این پارامتر را نیز لحاظ نمود.
- ۳- در این پژوهش از پل موجود در خط سریع‌السیر کشور چین استفاده شده‌است، پیشنهاد می‌شود بر روی پل‌های جدید راه‌آهن کشور عزیزمان ایران نیز پارامترهای دینامیکی روسازی نردبانی امتحان گردد.
- ۴- در این پژوهش توجه بر روی خصوصیات دینامیکی پل می‌باشد، لذا پیشنهاد می‌گردد پارامترهای پایداری قطار و راحتی سفر نیز مورد پژوهش قرار گیرد.
- ۵- نسبت میرایی پل مورد نظر برابر ۲,۵ درصد می‌باشد، پیشنهاد می‌شود تأثیر نسبت‌های میرایی مختلف پل را بر پاسخ‌های دینامیکی پل بررسی شود.

پیوست:

داده‌های حاصل از آزمایش میدانی مورد استفاده در صحت‌سنجی
(سرعت ۲۶۰ کیلومتر بر ساعت)

| زمان | جابجایی قائم | زمان | جابجایی قائم | زمان | جابجایی قائم |
|----------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|
| 0 | 0 | 2.18199 | -0.52396 | 4.66528 | 0.068846 |
| 0.124021 | 0.013916 | 2.28122 | -0.35041 | 4.74466 | -0.06269 |
| 0.175864 | -0.00024 | 2.37984 | -0.18626 | 4.82234 | 0.04986 |
| 0.247126 | 0.01375 | 2.40738 | -0.30364 | 4.88597 | -0.05349 |
| 0.297442 | -0.02387 | 2.45586 | -0.36942 | 4.94361 | 0.021534 |
| 0.368093 | -0.01927 | 2.50282 | -0.45867 | 5.00938 | -0.04896 |
| 0.437395 | -0.30569 | 2.51124 | -0.5995 | 5.08461 | 0.026039 |
| 0.481298 | -0.44188 | 2.55008 | -0.54322 | 5.13309 | -0.03974 |
| 0.557319 | -0.62504 | 2.57316 | -0.45876 | 5.20741 | 0.02118 |
| 0.582108 | -0.78467 | 2.63509 | -0.31803 | 5.27348 | -0.04462 |
| 0.606719 | -0.67674 | 2.73004 | -0.2102 | 5.34688 | 0.002217 |
| 0.628886 | -0.60636 | 2.80637 | -0.38867 | 5.3978 | -0.02601 |
| 0.744967 | -0.71448 | 2.88239 | -0.57183 | 5.4709 | 0.016133 |
| 0.769883 | -0.60186 | 2.94248 | -0.45926 | 5.5385 | -0.0262 |
| 0.800296 | -0.40475 | 3.0044 | -0.31852 | 5.61067 | 0.001863 |
| 0.825518 | -0.28744 | 3.00898 | -0.24812 | 5.6798 | -0.01701 |
| 0.901666 | -0.19836 | 3.11328 | -0.26704 | 5.75167 | 0.006368 |
| 0.931952 | -0.2735 | 3.19357 | -0.38449 | 5.8029 | -0.01717 |
| 0.98746 | -0.23133 | 3.18777 | -0.47367 | 5.87508 | 0.010897 |
| 1.07038 | -0.57879 | 3.25109 | -0.58172 | 5.9257 | -0.02203 |
| 1.1748 | -0.32546 | 3.31271 | -0.44567 | 5.99696 | -0.00804 |
| 1.27312 | -0.166 | 3.35552 | -0.32838 | 6.0667 | -0.01752 |
| 1.3343 | -0.3069 | 3.44986 | -0.22994 | 6.15616 | 0.005826 |
| 1.38401 | -0.3539 | 3.49865 | -0.29102 | 6.2077 | -0.01302 |
| 1.42516 | -0.53233 | 3.54561 | -0.38027 | 6.26168 | 0.005684 |
| 1.42027 | -0.60742 | 3.57345 | -0.49296 | 6.31291 | -0.01785 |
| 1.47517 | -0.57464 | 3.60374 | -0.56811 | 6.43571 | -0.02271 |
| 1.52226 | -0.39164 | 3.66505 | -0.43676 | 6.50728 | -0.00403 |
| 1.52836 | -0.29777 | 3.76184 | -0.30076 | 6.66555 | -0.00425 |
| 1.62057 | -0.23218 | 3.81979 | -0.22104 | 6.80502 | -0.02321 |
| 1.65941 | -0.1759 | 3.86888 | -0.27744 | 6.87598 | -0.01392 |
| 1.69031 | -0.24166 | 3.88006 | -0.37603 | 7 | 0 |
| 1.75027 | -0.40133 | 3.93605 | -0.59672 | | |
| 1.76236 | -0.48584 | 3.96267 | -0.72818 | | |
| 1.79356 | -0.5469 | 4.04248 | -0.58278 | | |
| 1.86879 | -0.4719 | 4.1 | -0.78 | | |
| 1.91435 | -0.31237 | 4.18531 | -0.55011 | | |
| 1.95593 | -0.21385 | 4.30243 | -0.3719 | | |
| 1.98775 | -0.26553 | 4.42091 | 0.097338 | | |
| 2.04264 | -0.23274 | 4.46176 | -0.08578 | | |
| 2.0893 | -0.32668 | 4.54218 | 0.069012 | | |
| 2.16135 | -0.57087 | 4.60214 | -0.09066 | | |

داده‌های حاصل از نرم‌افزار المان محدود مورد استفاده در صحت‌سنجی
(سرعت ۲۶۰ کیلومتر بر ساعت)

| زمان | جابجایی قائم | زمان | جابجایی قائم | زمان | جابجایی قائم |
|----------|--------------|--------|--------------|----------|--------------|
| 0 | 0 | 1.6975 | -0.28019 | 3.4075 | -0.18819 |
| 0.016625 | 0 | 1.7275 | -0.32051 | 3.4375 | -0.22303 |
| 0.045125 | -4.6E-07 | 1.7575 | -0.43348 | 3.4675 | -0.27595 |
| 0.073625 | -9.9E-06 | 1.7875 | -0.58082 | 3.4975 | -0.32336 |
| 0.102125 | -5.9E-05 | 1.8175 | -0.63389 | 3.5275 | -0.44684 |
| 0.130625 | -0.00018 | 1.8475 | -0.57795 | 3.5575 | -0.58386 |
| 0.159125 | -0.00032 | 1.8775 | -0.51631 | 3.5875 | -0.62091 |
| 0.187625 | -0.00038 | 1.9075 | -0.4113 | 3.6175 | -0.56775 |
| 0.216125 | -0.00032 | 1.9375 | -0.31288 | 3.6475 | -0.50055 |
| 0.244625 | -0.00028 | 1.9675 | -0.22424 | 3.6775 | -0.40236 |
| 0.273125 | -0.00048 | 1.9975 | -0.18058 | 3.7375 | -0.29891 |
| 0.301625 | -0.00085 | 2.0275 | -0.21856 | 3.7575 | -0.21109 |
| 0.330125 | -0.00113 | 2.0575 | -0.27193 | 3.7875 | -0.17961 |
| 0.358625 | -0.00316 | 2.0875 | -0.32425 | 3.8375 | -0.23521 |
| 0.387125 | -0.0387 | 2.1175 | -0.44839 | 3.8575 | -0.28581 |
| 0.415625 | -0.14563 | 2.1475 | -0.57134 | 3.8775 | -0.31685 |
| 0.444125 | -0.28047 | 2.1775 | -0.60619 | 3.8975 | -0.40797 |
| 0.472625 | -0.3678 | 2.2075 | -0.56031 | 3.9175 | -0.61683 |
| 0.501125 | -0.4528 | 2.2375 | -0.49273 | 3.9475 | -0.73538 |
| 0.529625 | -0.52846 | 2.2675 | -0.39375 | 3.9775 | -0.74889 |
| 0.558125 | -0.61851 | 2.2975 | -0.29022 | 4.0075 | -0.70827 |
| 0.586625 | -0.6809 | 2.3275 | -0.20664 | 4.0375 | -0.67167 |
| 0.615125 | -0.68293 | 2.3575 | -0.1819 | 4.0675 | -0.74014 |
| 0.643625 | -0.67771 | 2.3875 | -0.24547 | 4.0975 | -0.76381 |
| 0.672125 | -0.73873 | 2.4175 | -0.3025 | 4.1275 | -0.74714 |
| 0.700625 | -0.78716 | 2.4475 | -0.36861 | 4.1575 | -0.69534 |
| 0.729125 | -0.73936 | 2.4775 | -0.49903 | 4.1875 | -0.5571 |
| 0.757625 | -0.66455 | 2.5075 | -0.60197 | 4.259675 | -0.4777 |
| 0.786125 | -0.60352 | 2.5375 | -0.61778 | 4.289975 | -0.39029 |
| 0.814625 | -0.46568 | 2.5675 | -0.57665 | 4.320275 | -0.29596 |
| 0.843125 | -0.29777 | 2.5975 | -0.47853 | 4.350575 | -0.1927 |
| 0.871625 | -0.18349 | 2.6275 | -0.37062 | 4.380875 | -0.07992 |
| 0.900125 | -0.17935 | 2.6575 | -0.26775 | 4.411175 | 0.009529 |
| 0.928625 | -0.27392 | 2.6875 | -0.19809 | 4.441475 | 0.064061 |
| 0.957125 | -0.32319 | 2.7175 | -0.18916 | 4.4275 | 0.015416 |
| 0.985625 | -0.35855 | 2.7475 | -0.24972 | 4.4575 | -0.05033 |
| 1.014125 | -0.47492 | 2.7775 | -0.29958 | 4.4875 | -0.04068 |
| 1.042625 | -0.57664 | 2.8075 | -0.39056 | 4.5175 | 0.03328 |
| 1.071125 | -0.59385 | 2.8375 | -0.52874 | 4.5475 | 0.042533 |
| 1.099625 | -0.54006 | 2.8675 | -0.59777 | 4.5775 | -0.01005 |
| 1.128125 | -0.42498 | 2.8975 | -0.57982 | 4.6075 | -0.03939 |
| 1.156625 | -0.32797 | 2.9275 | -0.54642 | 4.6375 | -0.00898 |
| 1.185125 | -0.25343 | 2.9575 | -0.44912 | 4.6675 | 0.033043 |

| | | | | | |
|-----------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
| 1.213625 | -0.19787 | 2.9875 | -0.34516 | 4.6975 | 0.021004 |
| 1.3075 | -0.18079 | 3.0175 | -0.24524 | 4.7275 | -0.02074 |
| 1.3375 | -0.23131 | 3.0475 | -0.18835 | 4.7575 | -0.02499 |
| 1.3675 | -0.29036 | 3.0775 | -0.19977 | 4.7875 | 0.006717 |
| 1.3975 | -0.40294 | 3.1075 | -0.25946 | 4.8175 | 0.02453 |
| 1.4275 | -0.54693 | 3.1375 | -0.30855 | 4.8475 | 0.004403 |
| 1.4575 | -0.60355 | 3.1675 | -0.41834 | 4.8775 | -0.02002 |
| 1.4875 | -0.58103 | 3.1975 | -0.5636 | 4.9075 | -0.01139 |
| 1.471975 | -0.56092 | 3.2275 | -0.61888 | 4.9375 | 0.013472 |
| 1.501075 | -0.46876 | 3.2575 | -0.57841 | 4.9675 | 0.014713 |
| 1.530175 | -0.42503 | 3.2875 | -0.5334 | 4.9975 | -0.00522 |
| 1.6075 | -0.2434 | 3.3175 | -0.43322 | 5 | -0.00734 |
| 1.6375 | -0.19171 | 3.3475 | -0.32616 | | |
| 1.6675 | -0.2194 | 3.3775 | -0.23045 | | |

منابع و مراجع

- [1] Amtrack. High- speed rail: a national prespective, high- speed rail experience in the United States. Austin, Texas: Cambridge Systematics; 2008.
- [2] Todorovich P, Schned D, USA: Lincoln Institute of Land Policy; 2011.
- [3] Albate D, Bel G. High- speed rail: Lessons for Policy makers from experiences abroad. Public Admin Rev 2012; 72:336-41.
- [4] Astralian Department of Infrastructure and Transport. High speed rail study phase 2 report. Australian Government Report; 2013.
- [5] UIC (international Union of Railways). High speed lines in the world. <[http:// www.uic.org/ spip.php? articles573](http://www.uic.org/spip.php?articles573)> [retrieved May 2013].
- [6] Hu ST, Niu B, Ke ZT, Liu XG. Study on the Optimization of standard span length simply supported box girder for high- speed railway. China Rail Sci 2013; 34:15-21 [00 00000000].
- [7] Sun SL. Bridge engineering in Beijing- Shanghai high- speed railway. Rail Stand Des2008; 6:1-4 [in Chinese].
- [8] Sun SL. Design and practice of high speed railway bridges. China Railway Press; 2011.
- [10] Hu N, Dai GL, Yan B, Liu K. Recent Development of design and construction of medium and long span high- speed railway bridges in China. Eng Struct 2014; 74:233- 41.
- [11] Sun YF, Zhang GA, Wang MJ. Reasurch on technological innovation dynamic mechanism of railway of railway engineering project. J China Rail Soc 2012; 34:76-81 [00 00000000].
- [12] Hu N, Dai GL. The introduction of high- speed railway bridges in Wuhan- Guangzhou passanger line. In: Proceeding of IABSE symposium 2009 Bangkok;

- [13] People's Republic of China Ministry of Railway, Fundamental code for design on Railway Bridge and culvert, TB 10002.1-۲۰۰۵. *中国铁道出版社* Railway Press; ۲۰۰۵ [*中国铁道出版社*].
- [14] People's Republic of Railway. Code for seismic design of railway continuous welded rail. TB10015- 2۰۱۲, *中国铁道出版社* ۲۰۱۳ [*中国铁道出版社*].
- [15] Han Y, Xia H. Dynamic response of high- speed railway bridges and running safety of vehicles during earthquakes. *China Rail Sci* 2006; 27:136-۷ [*中国铁道出版社* Chinese].
- [16] Xu QY. Influence of short- wave random irregularity on the dynamic characteristics of train- slab track- bridge system. *China civil Eng J* 2011; ۴۴:۱۳۲-۷ [*中国铁道出版社*].
- [17] Zhao PR, Xiao JL, Kiu XY. The influence of the displacement at bridge ends to the fastening system used on ballastless tracks. *J China Rail Soc* 2008; ۳۰: ۶۸- ۷۳ [*中国铁道出版社*].
- [18] Wei YH. Research on beam end displacement relevant problems for high-speed railway ballastless track bridge, Ph. D Dissertation. China Academy of Railway Sciences; 2012 [in Chinese].
- [19] Luo H. The impact of creep deformation of long- span prestressed concrete continuous beam bridges to coupled vibration analysis of train- bridge system on high- speed railway. Ph.D. Dissertation. Central South University; 2011 [in Chinese].
- [20] He YB. Study on Post creep deformation of long- span concrete continuous bridge with ballastless tracks. *J China Rail Soc* 2008; 30: 120- 4 [in Chinese].
- [21] Bu YZ. Research on the transmission mechanism of longitudinal force for high- speed railway bridges. Ph.D. Dissertation in Civil Engineering, Southwest Jiaotong University; 1998 [in Chinese].
- [22] Yan B, Dai GL, Zhang HP. Beam- track interaction of high- speed Railway Bridge with ballast track. *J Cent South Univ Technol* 2012; 19: 1447- 53.

- [23] Yan B, Dai GL. Seismic pounding and reducing of simply- supported beam considering the interaction of continuously welded rail and bridges. *Struct Eng Int* 2013; 23:61-7 [in Chinese].
- [24] Niu B. Summary of Chinese high- speed railway bridges. In: 18th Proceedings of China bridges technology collection; 2008 [in Chinese].
- [25] Dai GL, Hu N, Liu WS. The recent improvement of high- speed railway bridges in China. In: Proceeding of IABSE2010 34th symposium, September 22- ۲۴, ۰۰۰۰۰۰۰۰, ۰۰۰۰۰۰۰۰ ۲۰ ۱۰.
- [26] Zhu M, Yang YQ Chen L, Bai QC, He TG. Pier design reasurch on Wuhan- Guangzhou high- speed railway. *Rail Stand Des* 2010; 1:100- ۴ [۰۰ ۰۰۰۰۰۰۰۰].
- [27] Zhen JJ. Pier design of high- speed railway standard bridges. *Rail Stand Des* 2007; 2:32-5 [in Chinese].
- [28] Zheng J. High speed railway bridges in China. China Higher Education pres; 2008 [in Chinese].
- [29] Liu WS, Dai GL, Hu N. Small and medium continuous beams in high- speed railway of China. *J Rail Sci Eng* 2010; 7:45-5 ۱ [۰۰ ۰۰۰۰۰۰۰۰].
- [30] Frýba, Ladislav. *Dynamics of Railway Bridges*. Thomas Telford Limited, 1996
- [31] Esveld C., *Modern Railway Track*, 2nd ed., MRT Productions, 2001
- [32] Desai, C. S., Siriwardane, A. M. (1982). Numerical models for track support structures. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 108(3), 461-480.
- [33] *Railway Engineering*, Vassilios A. Profillidis, Avebury Technical, 1995, the University of Michigan
- [34] *Karoumi, R. (1998). Response of Cable-Stayed and Suspension Bridge to Moving Vehicles. Analysis methods and practical modeling techniques. Doctoral Thesis. Royal Institute of Technology.*

[35] H. Xia, N. Zhang, R. GAO. Experimental Analysis of Railway Bridge under High- speed Trains. Journal of Sound and Vibration 282 (2005) 517-528.

[36] Meysam Jahangiri, Jabbar- Ali Zakeri. Dynamic analysis of Train- Bridge System under One- Way and Two- Way High- Speed Train Passing. Structural Eng. And Mecanics, Vol. 64, No. 1 (2017) 33- 44.

[37] خسرو برگی، علیرضا آقابزرگی. آنالیز دینامیکی پل‌های راه‌آهن تحت اثر عبور قطار سریع‌السیر با در نظر گرفتن اندرکنش پل و قطار (۱۳۸۹).

[38] جزوه راه‌آهن پیشرفته دکتر محمد میرصادقی.

[39] مرجع کامل کاربردی نرم افزار آباکوس؛ مهندس سرو سهیل نژاد- چاپ چهارم (۱۳۹۵).

[40] H. Xia, G. De Roeck, N. Zhang, J. Maeck. Experimental Analysis of a High- Speed Railway Bridge under Thalys Trains. Journal of Sound and Vibration 268 (2003) 103- 113.

[41] Wanming Zhai, He Xia, Chenbiao Cai, Mangmang Gao, Xiaozhen Li, Xiangrong Guo, Nan Zhang and Kiayun Wang. High- Speed Train-Track-Bridge Dynamic Interactions- Part I: Theoretical Model and Numerical Simulation. International Journal of Rail Transportation, 2013.

[42] He. Xia, Yushu Deng, Yongwei ZOU, Guido DE ROECK, Geert DEGRANDE. Dynamic Analysis of Rail Transit Elevated Bridge with Ladder Track. Front. Archit. Civ. Eng. China 2009, 3 (1): 2-8.

[43] He. Xia, Nan Zhang, Guido De Roeck. Dynamic Analysis of High- Speed Railway Bridge under Articulated Trains. Computers and Structures 81 (2003) 2467- 2478.

[44] W.W. Guo, H. Xia, G. De Roeck, K. Liu. Integral Model for Train- Track-Bridge Interaction on the Sesia Viaduct: Dynamic Simulation and Critical Assesment. Computers and Structures 112- 113 (2012) 205- 216.

Family: Javdanipour

Name: Amin

Title: Investigation of Dynamic High Speed Train- Bridge Interaction with Ladder track in comparison with ballast and Slab Track

Supervisor: Dr. Mohammad-Hossein Aminfar

Consultant: Dr. Masoud Ranjbarnia

MSc of Civil Engineering- Railway Engineering

University: Tabriz University

College: Civil Engineering

Graduated Year: 1397

Page Number: 150

Abstract

In this reasurch, after modeling and validation of high-speed train/ bridge system, dynamic train- bridge interaction of ladder track in comparison with ballast and Slab Track is investigated.

Dynamic parameters that we examined, are maximum vertical acceleration and maximum vertical displacement of box girder and the results are extracted with Abaqus finite element software at axcial loads of 14, 20 and 25 tons and speeds of 30, 80, 110, 250 and 300 kilometers per hour. At the end, results are compared with eachother.

Results show that ballast track has better mannar in reducing of maximum vertical displacement in comparison with two other tracks. On the other hand, slab track reduces maximum vertical acceleration better than two other tracks.

At the end, results indicated that, speed of 250 and 260 kilometers per hour are critical speeds of bridge girder in our reasurch.

Key Words: High-speed train, Dynamic Interaction, Ladder Track, Ballast Track, Slab Track, Box Girder, maximum vertical acceleration, maximum vertical displacement, Abaqus Finite Element Software, Critical Speed.