

بسم الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی عمران

رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی سه بعدی روسازی بتنی راه آهن به منظور بررسی پاسخ فرکانسی خط

نگارنده: مجید قلی زاده

استاد راهنما:

دکتر ایمان آقایان

شهریور ۱۳۹۵



## تقدیم به پدر و مادرم:

خدا را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسیم ساخته تا در سایه درخت  
پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و  
دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم،  
چرا که این دو وجود پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده، دستم را گرفته و راه رفتن را در این  
وادی زندگی پر از فراز و نشیب به من آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن  
را معنا کردند ...

## سپاس و تشکر:

سپاس و ستایش مخصوص خالق بی همتایی است که الطاف بی کرانش لحظه زندگی ام را در بر گرفته و فضل بی قیاسش در مراحل دشوار زندگانی شامل حالم گشته که اگر عنایت بی منت او نبود، رساندن این بار به سر منزل مقصود غیر ممکن می نمود. اکنون که این پژوهش به زیور چاپ آراسته می گردد بر خود لازم می دانم تا مطابق سنت حسنه سپاسگزاری، والاترین مراتب سپاس خویش را به محضر استادان فرزانه ای که در طول تحصیل همواره افتخار شاگردی آنان را داشته ام و مرا مرهون الطاف خالصانه خود قرار داده اند تقدیم نمایم.

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به جناب آقای دکتر ایمان آقایان، استاد راهنمای محترم پایان نامه، که صبورانه مرا در مراحل سخت و دشوار این پژوهش راهنمایی نمودند.

با سپاس فراوان

## تعهد نامه

اینجانب مجید قلی زاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدلسازی سه بعدی روسازی بتنی راه آهن به منظور بررسی پاسخ فرکانسی خط تحت راهنمایی دکتر ایمان آقاییان به عنوان استاد راهنمای اول متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه/رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام << دانشگاه صنعتی شاهرود >> و یا << Shahrood university of Technology >> به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در بدست آوردن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه/رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه/رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه/رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

\*متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیرشده پایان نامه / رساله وجود داشته باشد.

## چکیده

در دهه های اخیر، استفاده از سیستم حمل و نقل ریلی به دلیل ایمنی زیاد، بازده بالا و اثرات مخرب کمی که بر محیط زیست دارد، رونق یافته است. این موضوع منجر شده تا بشر به فکر راهکارهایی برای افزایش سرعت، افزایش ظرفیت باربری و استفاده مفیدتر از قطارها گردد. به دلیل محدودیت های زیاد خطوط بالاستی (برای مثال محدودیت افزایش سرعت، ظرفیت باربری و ...) و هزینه های بالای تعمیرات این خطوط، طرح استفاده از خطوط بتنی، جایگزین خطوط بالاستی شد. با افزایش استفاده از خطوط بتنی، چالش های جدیدی در زمینه دینامیک این خطوط به وجود آمده که نیازمند داشتن درکی بهتر از دینامیک خطوط راه آهن است. هدف این پایان نامه، بررسی تاثیر پارامترهای ابعادی و مکانیکی اجزای تشکیل دهنده خط (شامل ضخامت لایه ها، مدول الاستیسیته لایه ها، فاصله تراورس ها و پابندها و عرض لایه بستر) روی پاسخ دینامیکی قائم مدل سه بعدی با استفاده از روش المان محدود به کمک نرم افزار آباکوس است. با توجه به تنوع بسیار زیاد خطوط بتنی، دو نوع از پرکاربردترین خطوط (رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن) بررسی شده است. تحلیل اجزای محدود خط به دو صورت تحلیل فرکانسی و تحلیل دینامیکی حالت پایدار انجام شده است. با استفاده از تحلیل فرکانسی، فرکانس های طبیعی و مدهای ارتعاشی متناظر آن استخراج شده و سپس به کمک تحلیل دینامیکی حالت پایدار، تابع پاسخ فرکانسی خط از نرم افزار استخراج می شود. در ادامه رفتار اجزای تشکیل دهنده خط به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته و در پایان مقایسه ای بین اثرات لایه ها بررسی شده است. نتایج این پایان نامه نشان می دهد، کاهش مدول الاستیسیته اجزای تشکیل دهنده خط منجر به کاهش فرکانس های تشدید و افزایش پاسخ فرکانسی قائم خط می شود. همچنین افزایش ضخامت لایه ها منجر به افزایش فرکانس های تشدید و کاهش پاسخ های فرکانسی می شود. مدول لایه هیدرولیکی در خطوط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن، ضخامت لایه بتنی در خط رهدا ۲۰۰۰ و ضخامت لایه هیدرولیکی در خط شینکانسن پارامترهایی هستند که بیشترین تاثیر را در رفتار دینامیکی قائم این خطوط بتنی دارند.

**واژه های کلیدی:** مدلسازی خط بتنی، رفتار دینامیکی قائم خط، روش اجزای محدود، پاسخ فرکانسی، تشدید

## فهرست مطالب

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| فصل اول : مقدمه .....                                    | ۱  |
| ۱-۱ مقدمه .....                                          | ۲  |
| ۲-۱ ضرورت انجام تحقیق .....                              | ۲  |
| ۳-۱ اهداف تحقیق .....                                    | ۳  |
| ۴-۱ کارهای انجام شده در این تحقیق .....                  | ۴  |
| ۵-۱ نوآوری .....                                         | ۵  |
| ۶-۱ ساختار تحقیق .....                                   | ۶  |
| فصل دوم : مرور ادبیات و پیشینه تحقیق .....               | ۹  |
| ۱-۲ مقدمه .....                                          | ۱۰ |
| ۲-۲ اجزای تشکیل دهنده خط و ویژگی های دینامیکی آنها ..... | ۱۱ |
| ۱-۲-۲ ریل .....                                          | ۱۱ |
| ۲-۲-۲ بالشتک ریل و پابند .....                           | ۱۵ |
| ۳-۲-۲ تراورس .....                                       | ۱۶ |
| ۴-۲-۲ خط بتنی .....                                      | ۱۷ |
| ۳-۲ ویژگی های دینامیکی خط .....                          | ۲۶ |
| ۱-۳-۲ رسپتنس .....                                       | ۲۶ |
| ۲-۳-۲ تشدید .....                                        | ۳۳ |



|    |                                                        |
|----|--------------------------------------------------------|
| ۳۵ | ۴-۲ مدل های ریاضی .....                                |
| ۳۵ | ۴-۲-۱ مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی .....                |
| ۳۶ | ۴-۲-۲ تیر (ریل) روی تکیه گاه های مجزا .....            |
| ۳۷ | ۴-۲-۳ تیر روی تکیه گاه های مجزا شامل توده بالاست ..... |
| ۳۸ | ۵-۲ مدلسازی خط .....                                   |
| ۴۷ | <b>فصل سوم : تئوری ها و روش ها .....</b>               |
| ۴۸ | ۳-۱ مقدمه .....                                        |
| ۴۸ | ۳-۲ مدلسازی در آباکوس .....                            |
| ۴۹ | ۳-۲-۱ ماژول ها .....                                   |
| ۵۰ | ۳-۲-۲ المان ها .....                                   |
| ۵۲ | ۳-۳ انواع تحلیل .....                                  |
| ۵۲ | ۳-۳-۱ تحلیل مقدار ویژه خطی (تحلیل فرکانسی) .....       |
| ۵۳ | ۳-۳-۲ تحلیل دینامیکی حالت پایدار .....                 |
| ۵۴ | ۳-۴ مدلسازی خطوط .....                                 |
| ۵۴ | ۳-۴-۱ مدل رهدا ۲۰۰۰ .....                              |
| ۵۶ | ۳-۴-۲ مدل شینکانسن .....                               |
| ۵۹ | <b>فصل چهارم : نتایج مدلسازی .....</b>                 |
| ۶۰ | ۴-۱ مقدمه .....                                        |
| ۶۰ | ۴-۲ اعتبار سنجی مدلسازی .....                          |

|     |                                         |
|-----|-----------------------------------------|
| ۶۰  | ..... ۱-۲-۴ مدل جرم و فنر               |
| ۶۳  | ..... ۲-۲-۴ شکل مدهای ارتعاشی خط بتنی   |
| ۶۴  | ..... ۳-۴ مدل سازی خطوط بتنی            |
| ۶۴  | ..... ۱-۳-۴ خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰          |
| ۷۶  | ..... ۲-۳-۴ خط بتنی شینکانسن            |
| ۸۶  | ..... ۳-۳-۴ مقایسه مدل های مختلف        |
| ۹۱  | ..... فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادات |
| ۹۲  | ..... ۱-۵ مقدمه                         |
| ۹۲  | ..... ۲-۵ جمع بندی و نتیجه گیری         |
| ۹۴  | ..... ۳-۵ پیشنهادات                     |
| ۹۵  | ..... پیوست الف                         |
| ۱۰۳ | ..... منابع                             |

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ : شمای کلی خط بتنی و اجزای تشکیل دهنده آن ..... ۱۰
- شکل ۲-۲ : مقطع ریل UIC60 ..... ۱۱
- شکل ۳-۲ : تیر و بار اعمال شده بر آن ..... ۱۲
- شکل ۴-۲ : المان تیر دو بعدی ..... ۱۴
- شکل ۵-۲ : ریل متصل شده به تراورس به وسیله پابند و بالشتک ..... ۱۶
- شکل ۶-۲ : سه مقطع متفاوت از سازه خطوط بتنی ..... ۱۸
- شکل ۷-۲ : پیشی بینی ساخت خطوط پر سرعت در سال ۲۰۲۵ در جهان ..... ۲۲
- شکل ۸-۲ : مهمترین مدل های توسعه یافته خط بتنی ره‌دا ..... ۲۴
- شکل ۹-۲ : خط بتنی شینکانسن ..... ۲۵
- شکل ۱۰-۲ : مدل خطی تابع پاسخ فرکانسی ..... ۲۷
- شکل ۱۱-۲ : سیستم یک درجه آزادی و دیاگرام آزاد آن ..... ۲۸
- شکل ۱۲-۲ : تابع رسپتنس سیستم یک درجه آزادی ..... ۳۲
- شکل ۱۳-۲ : تابع رسپتنس یک خط راه آهن تحت بارگذاری سینوسی ..... ۳۴
- شکل ۱۴-۲ : محل ضد تشدید و مقدارهای کمینه در نمودارهای تابع پاسخ فرکانسی ..... ۳۵
- شکل ۱۵-۲ : مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی ..... ۳۵
- شکل ۱۶-۲ : مدل ریل روی تکیه گاه های مجزا ..... ۳۷
- شکل ۱۷-۲ : ریل روی تکیه گاه های مجزا و تراورس ها به صورت توده های صلب ..... ۳۸
- شکل ۱-۳ : مثال هایی از انواع مختلف المان های محدود ..... ۵۰
- شکل ۲-۳ : هندسه و ابعاد خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ ..... ۵۴
- شکل ۳-۳ : مقطع ریل UIC60 ..... ۵۵

- شکل ۳-۴ : مدل سه بعدی خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ در آباکوس..... ۵۵
- شکل ۳-۵ : ابعاد خط بتنی شینکانسن..... ۵۶
- شکل ۳-۶ : مدل سه بعدی خط بتنی شینکانسن در آباکوس..... ۵۷
- شکل ۴-۱ : سیستم دو درجه آزادی جرم و فنر با تحریک هارمونیک..... ۶۱
- شکل ۴-۲ : قسمت حقیقی تابع پاسخ فرکانسی سیستم دو درجه آزادی..... ۶۱
- شکل ۴-۳ : مدل دو درجه آزادی در آباکوس..... ۶۲
- شکل ۴-۴ : قسمت حقیقی منحنی رسپتنس سیستم دو درجه آزادی..... ۶۲
- شکل ۴-۵ : شکل مدهای ارتعاشی خروجی آباکوس ۲۰۰۰..... ۶۳
- شکل ۴-۶ : رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات مدول تراورس..... ۶۵
- شکل ۴-۷ : رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات مدول لایه بتنی..... ۶۶
- شکل ۴-۸ : رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات ضخامت لایه بتنی..... ۶۷
- شکل ۴-۹ : رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات مدول لایه هیدرولیکی..... ۶۸
- شکل ۴-۱۰ : رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات ضخامت لایه هیدرولیکی..... ۶۹
- شکل ۴-۱۱ : رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات مدول لایه محافظ یخ زدگی..... ۷۰
- شکل ۴-۱۲ : رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات ضخامت لایه محافظ یخ زدگی..... ۷۱
- شکل ۴-۱۳ : رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات مدول بستر خاکی..... ۷۲
- شکل ۴-۱۴ : رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات ضخامت بستر خاکی..... ۷۳
- شکل ۴-۱۵ : رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات عرض بستر خاکی..... ۷۴
- شکل ۴-۱۶ : رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات فاصله تراورس ها..... ۷۵
- شکل ۴-۱۷ : رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات مدول لایه بتنی..... ۷۷
- شکل ۴-۱۸ : رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات ضخامت لایه بتنی..... ۷۷

- شکل ۴-۱۹: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات مدول لایه آسفالتی..... ۷۸
- شکل ۴-۲۰: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات ضخامت لایه آسفالتی..... ۷۹
- شکل ۴-۲۱: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات مدول لایه هیدرولیکی..... ۸۰
- شکل ۴-۲۲: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات ضخامت لایه هیدرولیکی..... ۸۱
- شکل ۴-۲۳: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات مدول بستر خاکی..... ۸۲
- شکل ۴-۲۴: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات ضخامت بستر خاکی..... ۸۳
- شکل ۴-۲۵: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات عرض بستر خاکی..... ۸۴
- شکل ۴-۲۶: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات فاصله پابند ها..... ۸۵
- شکل ۴-۲۷: رسپتنس خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ با یکدهم برابر کردن مدول..... ۸۷
- شکل ۴-۲۸: رسپتنس خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ با سه برابر کردن ضخامت..... ۸۸
- شکل ۴-۲۹: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با یکدهم برابر کردن مدول..... ۸۹
- شکل ۴-۳۰: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با سه برابر کردن ضخامت..... ۹۰

## فهرست اشکال پیوست الف

- شکل پ- ۱ : شکل مدهای ارتعاشی خط بالاستی الف) مطالعه هوآن فنگ ب) مدل آباکوس ..... ۹۶
- شکل پ- ۲ : شکل مد ارتعاشی خط رهدا ۲۰۰۰ با دو برابر کردن ضخامت لایه هیدرولیکی ..... ۹۷
- شکل پ- ۳ : شکل مد ارتعاشی خط رهدا ۲۰۰۰ با سه برابر کردن ضخامت لایه هیدرولیکی ..... ۹۷
- شکل پ- ۴ : شکل مد ارتعاشی خط رهدا ۲۰۰۰ با دو برابر کردن ضخامت لایه بتنی ..... ۹۸
- شکل پ- ۵ : شکل مد ارتعاشی خط رهدا ۲۰۰۰ با سه برابر کردن ضخامت لایه بتنی ..... ۹۸
- شکل پ- ۶ : شکل مد ارتعاشی خط رهدا ۲۰۰۰ با دو برابر کردن عرض بستر خاکی ..... ۹۹
- شکل پ- ۷ : شکل مد ارتعاشی خط رهدا ۲۰۰۰ با سه برابر کردن عرض بستر خاکی ..... ۹۹
- شکل پ- ۸ : شکل مد ارتعاشی خط شینکانسن با دو برابر کردن ضخامت لایه بتنی ..... ۱۰۰
- شکل پ- ۹ : شکل مد ارتعاشی خط شینکانسن با سه برابر کردن ضخامت لایه بتنی ..... ۱۰۰
- شکل پ- ۱۰ : شکل مد ارتعاشی خط شینکانسن با دو برابر کردن ضخامت لایه هیدرولیکی ..... ۱۰۱
- شکل پ- ۱۱ : شکل مد ارتعاشی خط شینکانسن با سه برابر کردن ضخامت لایه هیدرولیکی ..... ۱۰۱

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲ : سیستم های مختلف روسازی بتنی ..... ۲۰
- جدول ۲-۲ : طول کل سیستم های خط بتنی ساخته شده در جهان ..... ۲۱
- جدول ۱-۳ : خواص مکانیکی اجزای تشکیل دهنده خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ ..... ۵۶
- جدول ۲-۳ : خواص مکانیکی اجزای تشکیل دهنده خط شینکانسن ..... ۵۸

## **فصل اول : مقدمه**

## ۱-۱ مقدمه

در خطوط بتنی راه آهن<sup>۱</sup>، خرابی های هندسی و اجزای تشکیل دهنده خط<sup>۲</sup> به نسبت خطوط بالاستی<sup>۳</sup> کمتر شده و در نتیجه عملیات تعمیر و نگهداری کاهش چشمگیری یافته است. با این وجود، در صورت خرابی یا وقوع سانحه در خطوط بتنی، هزینه تعمیرات آن نسبت به خطوط بالاستی بسیار بالاتر خواهد بود. بنابراین بایستی در طراحی این خطوط، به گونه ای عمل شود که در عمر مفید خود، نیازمند کمترین عملیات نگهداری بخصوص در لایه های زیرسازی باشد. از طرف دیگر به دلیل اینکه با حذف بالاست و جایگزینی آن با بتن سخت تر، ارتعاشات<sup>۴</sup> در خط بتنی نسبت به خط بالاستی افزایش می یابد، در طراحی این خطوط بایستی رفتار ارتعاشی لایه ها و اجزای سازنده خط مورد بررسی دقیق قرار گیرد.

## ۱-۲ ضرورت انجام تحقیق

از پیدایش خطوط بتنی در سیستم های حمل و نقل سریع ریلی<sup>۵</sup>، چیزی در حدود ۴۰ سال می گذرد. در این بازه زمانی، محققین در پی یافتن پاسخی برای پیش بینی رفتار دینامیکی خطوط بتنی<sup>۶</sup> بوده اند. با توجه به اینکه بهره برداری از خطوط حمل و نقل پر سرعت قدمت فراوانی ندارد، مطالعات جامعی در زمینه دینامیک لایه های این خطوط انجام شده است. یکی از مشکلات اصلی در طراحی این خطوط، عدم شناخت دقیق رفتار دینامیکی خط در شرایط عبور قطار است که به دلیل طراحی های نادرست ممکن است هزینه های هنگفتی پس از اجرا، صرف تعمیر و نگهداری آن گردد.

---

<sup>۱</sup> Slab Track Railway

<sup>۲</sup> Track components

<sup>۳</sup> Ballasted track

<sup>۴</sup> Vibrations

<sup>۵</sup> High speed railway

<sup>۶</sup> Dynamic behavior of slab track



در نتیجه داشتن درکی کامل از رفتار و مکانیزم عملکرد دینامیکی این خطوط از ملزومات مهندسی خطوط راه آهن است. در حال حاضر در جهان، خطوط بتنی مختلفی در حال اجرا است. مطالعات نشان می دهد مدل های رهدا<sup>۱</sup> و شینکانسن<sup>۲</sup> جزو پرکاربردترین خطوط هستند. در این پایان نامه سعی بر این است تا با مدلسازی سه بعدی<sup>۳</sup> این دو خط، با استفاده از روش المان محدود<sup>۴</sup> به بررسی رفتار دینامیکی قائم آنها پرداخته شود و شناخت بهتری از میزان تاثیر پارامترهای ابعادی و مکانیکی اجزای تشکیل دهنده خط (شامل ضخامت لایه ها، مدول الاستیسیته لایه ها، فاصله تراورس ها و پابندها و عرض لایه بستر) روی پاسخ های فرکانسی<sup>۵</sup> بدست آید. در نهایت نتایج بدست آمده از تمام لایه های یک مدل در دو بخش تغییرات ضخامت و تغییرات مدول الاستیسیته در کنار یکدیگر گذاشته شده است تا مقایسه ای بین میزان اثرگذاری هر لایه در رفتار دینامیکی قائم خط انجام شود.

### ۱-۳ اهداف تحقیق

اهداف این تحقیق به ترتیب عبارتند از:

۱. مدلسازی سه بعدی و تحلیل دینامیکی دو خط بتنی رهدا<sup>۱</sup> و شینکانسن به روش المان محدود در آباکوس<sup>۶</sup>.
۲. بررسی اثر کاهش مدول الاستیسیته تراورس ها، لایه بتنی<sup>۷</sup>، لایه هیدرولیکی<sup>۸</sup>، لایه محافظ

---

<sup>۱</sup> Rheda 2000

<sup>۲</sup> Shinkansen

<sup>۳</sup> 3D Modelling

<sup>۴</sup> Finite Element Method (FEM)

<sup>۵</sup> Frequency response

<sup>۶</sup> ABAQUS

<sup>۷</sup> Concrete Bearing Layer (CBL)

<sup>۸</sup> Hydraulically bonded Bearing Layer (HBL)

- یخ زدگی<sup>۱</sup> و لایه بستر خاکی<sup>۲</sup> روی تابع رسپتنس<sup>۳</sup> در دو خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن.
۳. بررسی اثر افزایش ضخامت لایه بتنی، لایه هیدرولیکی، لایه محافظ یخ زدگی و ضخامت و عرض لایه بستر خاکی روی تابع رسپتنس در دو خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن.
۴. بررسی اثر افزایش فاصله تراورس ها<sup>۴</sup> و فاصله پابندها<sup>۵</sup> روی تابع رسپتنس به ترتیب در خطوط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن.
۵. رتبه بندی میزان اثرگذاری پارامترهای ابعادی و مکانیکی اجزای تشکیل دهنده خطوط به تفکیک خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن روی تابع رسپتنس به نسبت شرایط معمول طراحی.

## ۴-۱ کارهای انجام شده در این تحقیق

در این مطالعه، اثرات دینامیکی قائم اجزای تشکیل دهنده دو نوع خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن به روش المان محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. مدلسازی ریل با فرض استفاده از تئوری تیر اولر-برنولی<sup>۶</sup> انجام شده است. در تمام مدلسازی ها، اجزای تشکیل دهنده خط به صورت الاستیک فرض شده اند. در مدلسازی ریل از المان تیر و در سایر اجزا از المان سه بعدی هشت گره ای<sup>۷</sup> و تغییر شکل پذیر استفاده شده است. در این پایان نامه، تئوری تیر بر روی تکیه گاه های مجزا<sup>۸</sup> بر مدلسازی ها حاکم است. ابعاد، خواص فیزیکی و خواص مکانیکی استاندارد، از آیین نامه ها و مطالعات پیشین محققین استخراج شده است. به منظور شبیه سازی رفتار ویسکو الاستیک

---

<sup>۱</sup> Frost Protective Layer (FPL)

<sup>۲</sup> Subsoil

<sup>۳</sup> Receptance function

<sup>۴</sup> Sleepers

<sup>۵</sup> Fastenings

<sup>۶</sup> Euler-Bernoulli beam

<sup>۷</sup> Solid element

<sup>۸</sup> Rails on discrete support

بالشتک ریل<sup>۱</sup> در مدلسازی از فنر و میراگر<sup>۲</sup> موازی استفاده شده است. برای شبیه سازی شرایط مرزی بی نهایت در اجزای تشکیل دهنده خط، جابجایی ها در جهت نرمال محدود گردیده است. با انجام تحلیل فرکانسی<sup>۳</sup> و تحلیل دینامیکی حالت پایدار<sup>۴</sup>، شکل مدهای ارتعاشی<sup>۵</sup> خط آهن و اثرات دینامیکی قائم اجزای تشکیل دهنده آن بر روی پاسخ فرکانسی مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه بین حالات مختلف انجام شده است. برای دستیابی به تابع رسپتانس در تحلیل دینامیکی حالت پایدار، بار هارمونیک واحد در وسط خط و بین دو تراورس اعمال شده است و کل خط را در بازه فرکانسی ۱ تا ۱۵ هرتز تحریک می نماید. این نوع بارگذاری در مطالعات به عنوان معیاری جهت بررسی رفتار دینامیکی خط آهن معرفی شده است. نتایج مدلسازی ها، بحث و بررسی و نتیجه گیری در پایان آورده شده است.

## ۱-۵ نوآوری

با مروری بر پژوهش های انجام شده توسط نگارنده، می توان گفت تاکنون مطالعه جامعی در زمینه بررسی رفتار دینامیکی قائم خطوط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن در دسترس نبوده است. در این پایان نامه با تغییر در پارامترهای ابعادی و مکانیکی (برای مثال مدول الاستیسیته، ضخامت و عرض بستر خاکی)، پاسخ فرکانسی خطوط مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین تاثیر افزایش فاصله تراورس ها در خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و فاصله پابندها در خط بتنی شینکانسن روی رفتار دینامیکی قائم خطوط بررسی شده است. برای نزدیکتر شدن شرایط مدلسازی به شرایط واقعی سعی شده از داده های دقیق و واقعی استفاده شود.

---

<sup>۱</sup> Railpad

<sup>۲</sup> Spring and Dashpot

<sup>۳</sup> Frequency analysis

<sup>۴</sup> Steady-state dynamic analysis

<sup>۵</sup> Vibration mode shapes

## ۱-۶ ساختار تحقیق

به منظور آشنایی با ساختار کلی پایان نامه، توضیح کوتاهی از هر فصل در زیر آورده شده است.

در فصل دوم، مروری بر مطالعات انجام شده در بحث دینامیک خطوط بتنی که پایه و اساس این تحقیق است ارائه شده است. همچنین به طور مختصر توضیحاتی در خصوص ویژگی های دینامیکی اجزای تشکیل دهنده خطوط بتنی و مدلسازی های سایر محققین آورده شده است.

روش های ایجاد مدل در نرم افزار آباکوس در فصل سوم بررسی شده است. الگوریتم های استفاده شده و دیدگاه تحلیل های دینامیکی در آباکوس به طور مختصر توضیح داده شده است.

نتایج مدلسازی های المان محدود در فصل چهارم مشاهده می شود. تحلیل های دینامیکی در دو بخش تحلیل فرکانسی و تحلیل دینامیکی حالت پایدار انجام شده و مدهای ارتعاشی و پاسخ های فرکانسی خط از آباکوس استخراج می گردد. در ادامه با استفاده از تابع رسپتانس، نمودار های پاسخ دینامیکی قائم خطوط در بازه فرکانسی ۱ تا ۱۵ هرتز ترسیم شده است.

برای اعتبار سنجی پاسخ های خروجی آباکوس، قبل از فرآیند مدلسازی خط آهن، یک مدل دو درجه آزادی<sup>۱</sup> جرم و فنر در نرم افزار مدل شده است. همچنین به منظور سنجش درستی مدلسازی خطوط بتنی و ویژگی های آن در آباکوس (به خصوص شرایط مرزی)، شکل مدهای ارتعاشی بررسی شده است.

فصل پنجم شامل بحث و بررسی نتایج و خروجی های مدلسازی است. در این فصل منحنی های رسپتانس بدست آمده پس از اعمال تغییرات در مدول الاستیسیته، ضخامت و عرض لایه ها و فاصله تراورس ها و پابندها ترسیم شده است. هر شکل از سه منحنی تشکیل شده است که یک منحنی مربوط

---

<sup>۱</sup> Degree Of Freedom (DOF)

به رسپتس خط معمولی و دو منحنی دیگر با اعمال تغییرات مختلف در پارامتر موردنظر ترسیم شده است. همچنین در پایان نتایج بدست آمده از تمام لایه های یک مدل در دو بخش تغییرات ضخامت و تغییرات مدول الاستیسیته در کنار یکدیگر گذاشته شده است تا مقایسه ای بین میزان اثرگذاری هر لایه در رفتار دینامیکی قائم خط انجام شود.

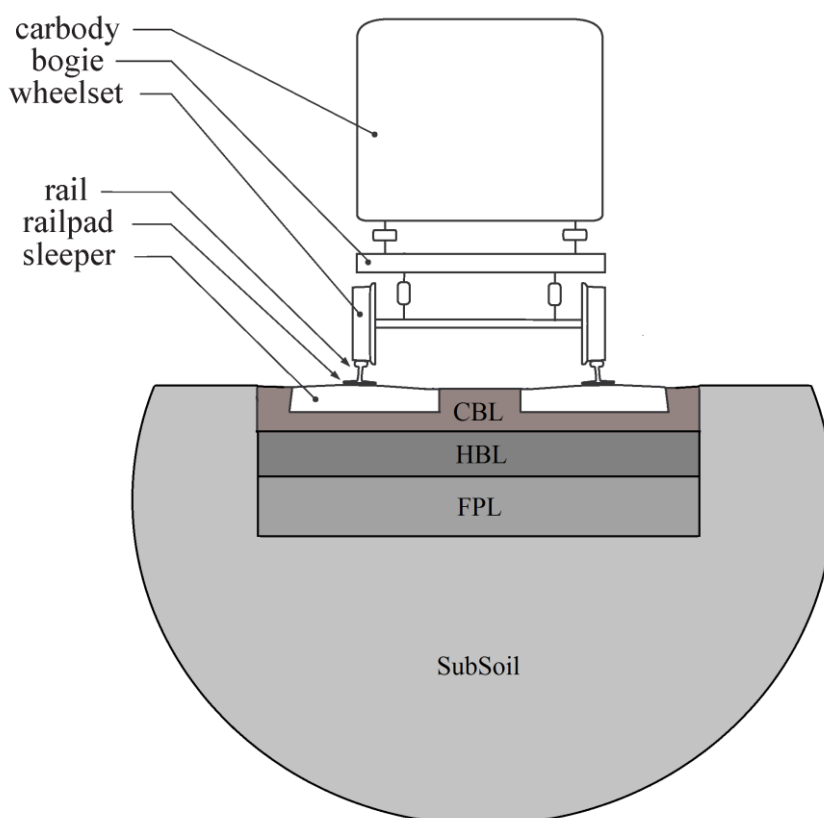
در فصل ششم، نتیجه گیری های اصلی مدلسازی ذکر شده و در ادامه پیشنهاداتی برای انجام مطالعات در آینده ارائه شده است.



## **فصل دوم : مرور ادبیات و پیشینه تحقیق**

## ۱-۲ مقدمه

یک خط بتنی متشکل از اجزای مختلفی است که این اجزا در کنار یکدیگر وظیفه انتقال بار و تنش های ناشی از عبور قطار به زمین را دارند. همانطور که در شکل ۱-۲ دیده می شود بار ناشی از وزن قطار متشکل از وزن اتاق ها، بوژی ها و مجموعه چرخ ها، و نیروهای طولی و جانبی ناشی از حرکت قطار به وسیله چرخ ها به ریل و زیرسازی آن منتقل می شود. با توجه به نوع سیستم خط بتنی ممکن است ریل بر روی بالشتک قرار گرفته و به کمک پابند به تراورس متصل شود (برای مثال خط بتنی رهدا ۲۰۰۰) و یا اینکه مجموعه ریل، بالشتک و پابند مستقیماً روی دال بتنی خط نصب گردند (برای مثال خط بتنی شینکانسن). لایه های زیرین به ترتیب شکل ۱-۲ در زیر تراورس و لایه بتنی قرار می گیرند.



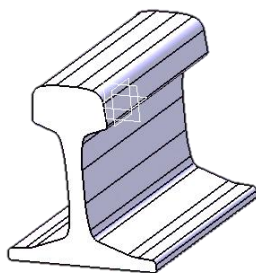
شکل ۱-۲ : شمای کلی خط بتنی و اجزای تشکیل دهنده آن



## ۲-۲ اجزای تشکیل دهنده خط و ویژگی های دینامیکی آنها

### ۲-۲-۱ ریل

وظیفه اصلی ریل فراهم کردن یک سطح هموار برای چرخ های قطار و هدایت قطار در مسیر خط است. ریل همچنین بار قطار را روی تراورس ها و تکیه گاه ها توزیع می کند. نیروهای جانبی چرخ ها و نیروهای طولی ایجاد شده ناشی از حرکت و ترمز گیری قطار نیز توسط ریل به تراورس ها و لایه های پایین تر منتقل می شود (اسولد<sup>۱</sup>، ۲۰۰۱). مطابق شکل ۲-۲ یک ریل مدرن فولادی دارای قسمت تحتانی صاف است و مقطعی شبیه I دارد. بال های بالایی ریل برای جانمایی چرخ قطار طراحی شده اند. در این پایان نامه از ریل استاندارد UIC60 در شبیه سازی المان محدود استفاده شده است.



شکل ۲-۲: مقطع ریل UIC60

در استفاده از مدل های ریاضی می توان ارتعاشات خمشی یک ریل آزاد را به صورت تیر بدون تکیه گاه در نظر گرفته و فقط در نواحی مرزی برای آن تکیه گاه قرار داد. ریل ممکن است به صورت تیر اولر-برنولی یا تیر رایی-تیموشنکو<sup>۲</sup> مدل شود (دالبرگ<sup>۳</sup>، ۲۰۰۳).

#### • تیر اولر-برنولی

در تئوری تیر اولر-برنولی تنها خمش ریل در نظر گرفته شده و در صورت وجود ارتعاش، تنها

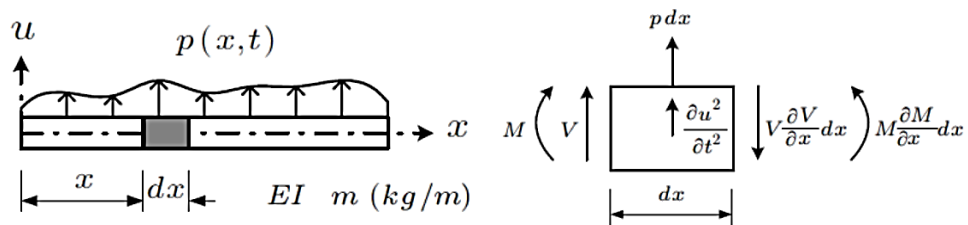
---

<sup>۱</sup> Esveld

<sup>۲</sup> Rayleigh-Timoshenko beam

<sup>۳</sup> Dahlberg

اینرسی<sup>۱</sup> ریل در جابجایی تیر اثر گذار است. برای دستیابی به معادله ارتعاش در یک تیر دو بعدی<sup>۲</sup>، سازه زیر بررسی می شود. مطابق شکل ۲-۳، تیر تحت اثر بار خارجی بوده، توزیع جرم آن به صورت  $m = \rho A$  و صلبیت خمشی آن  $EI$  است که می تواند با جابجایی در طول تیر و زمان تغییر کند.



شکل ۲-۳: تیر و بار اعمال شده بر آن

معادله دیفرانسیل<sup>۳</sup> تغییر شکل تیر  $w(x, t)$  به صورت زیر است:

$$EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = q(x, t) \quad (۱-۲)$$

که در آن،

$EI$  = سختی<sup>۴</sup> خمشی تیر

$\rho$  = جرم مخصوص تیر

$A$  = سطح مقطع تیر

$q(x, t)$  = بار روی تیر

$t$  = زمان

میرایی<sup>۵</sup> تیر در این مدل لحاظ نشده است. برای حالت ارتعاشات پایدار یک تیر غیر میرا، جواب

معادله ممکن است به صورت رابطه (۲-۲) نوشته شود که در آن  $X_x$  حالت مد ارتعاشی تیر را نشان

<sup>۱</sup> Inertia

<sup>۲</sup> 2D beam

<sup>۳</sup> Differential equation

<sup>۴</sup> Stiffness

<sup>۵</sup> Damping

می‌دهد و  $\omega$  فرکانس زاویه ای<sup>۱</sup> ارتعاش است.

$$w(x, t) = X(x).T(t) = X(x)\sin\omega t \quad (۲-۲)$$

### • تیر رایلی-تیموشنکو

تئوری تیر رایلی-تیموشنکو شامل تغییر شکل برشی<sup>۲</sup> و اینرسی دورانی<sup>۳</sup> تیر است. در این حالت، برای تشریح ارتعاش دو معادله دیفرانسیل مورد نیاز است. تغییر شکل خمشی  $w(x, t)$  و تغییر شکل برشی  $\psi(x, t)$  توابع مجهول هستند. معادله دیفرانسیل تغییر شکل خمشی  $w(x, t)$  به صورت زیر می‌شود.

$$EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} - \rho I \left( 1 + \frac{E}{kG} \right) \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho^2 I}{kG} \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} = q(x, t) \quad (۳-۲)$$

$$EI = \text{سختی خمشی تیر}$$

$$G = \text{مدول برشی}^۴$$

$$k = \text{ضریب برش}^۵$$

$$\rho = \text{جرم مخصوص تیر}$$

$$A = \text{سطح مقطع تیر}$$

$$q(x, t) = \text{بار روی تیر}$$

$$t = \text{زمان}$$

در رابطه (۳-۲) با فرض اینکه مقدار  $k$  بسیار بزرگ فرض شود و همچنین اینرسی جرم در دوران

تیر نادیده گرفته شود رابطه (۲-۲) در تئوری تیر اولر-برنولی بدست می‌آید. تغییر شکل برشی ریل در

---

<sup>۱</sup> Angular frequency

<sup>۲</sup> Shear deformation

<sup>۳</sup> Rotational inertia

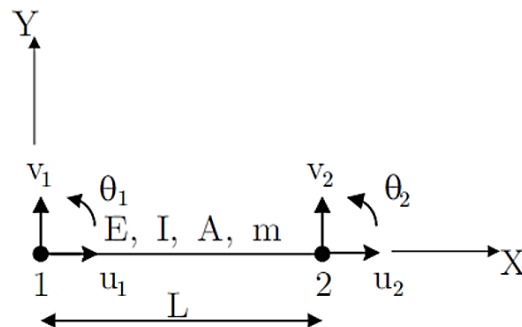
<sup>۴</sup> Shear modulus

<sup>۵</sup> Shear factor

فرکانس های زیر ۵۰۰ هرتز قابل اغماض است. دالبرگ (۲۰۰۳) نشان داد که در فرکانس ۵۰۰ هرتز و برای ریل UIC60، تئوری تیر اولر-برنولی، فرکانس های ارتعاشی را بین ۱۰ تا ۱۵ درصد بیشتر نشان می دهد.

### • المان تیر<sup>۱</sup>

در شکل ۴-۲ یک تیر یکنواخت که روی محور افقی گذاشته شده دیده می شود. این تیر دو بعدی در هر انتهای خود یک گره دارد و هر گره ۳ درجه آزادی دارد. حرکت محوری، حرکت جانبی و چرخشی در این شکل نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: المان تیر دو بعدی

ماتریس سختی<sup>۲</sup> برای این تیر تیموشنکو به صورت زیر تعریف می شود.

$$k = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & -X & 0 & 0 \\ 0 & Y_1 & Y_2 & 0 & -Y_1 & Y_2 \\ 0 & Y_2 & Y_3 & 0 & -Y_2 & Y_4 \\ -X & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & -Y_1 & -Y_2 & 0 & Y_1 & -Y_2 \\ 0 & Y_2 & Y_4 & 0 & -Y_2 & Y_3 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

<sup>۱</sup> Beam element

<sup>۲</sup> Stiffness matrices

که در آن،

$$\begin{aligned} X &= \frac{AE}{L} & Y_1 &= \frac{12EI_z}{(1+\phi_y)L^3} & Y_2 &= \frac{6EI_z}{(1+\phi_y)L^2} \\ Y_3 &= \frac{(4+\phi_y)EI_z}{(1+\phi_y)L} & Y_4 &= \frac{(2-\phi_y)EI_z}{(1+\phi_y)L} & \phi_y &= \frac{12EI_zk_y}{AGL^2} \end{aligned} \quad (5-2)$$

ماتریس جرم برای المان تیر به صورت زیر است.

$$m = \frac{mL}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L & 0 & 54 & -13L \\ 0 & 22L & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L & 0 & 156 & -22L \\ 0 & -13L & -3L^2 & 0 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

## ۲-۲-۲ بالشتک ریل و پابند

بالشتک ریل عضوی است که بین ریل و تراورس قرار می گیرد و باعث کاهش اثر ضربه ناشی از عبور قطار می گردد. این عضو وظیفه انتقال نیروی ریل به تراورس و فیلتر کردن فرکانس های بالای ضربه را دارد. بالشتک ها علاوه بر اینکه عایق الکتریسیته هستند جلوی فرسایش تراورس را می گیرند. بالشتک ریل همچنین بر روی رفتار دینامیکی خط آهن اثر گذار است (اسولد، ۲۰۰۱). سختی بالشتک باید حتی الامکان تا حد مشخصی پایین باشد. بالشتک هایی با سختی دینامیکی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ MN/m و سختی استاتیکی بین ۵۰ تا ۱۰۰ MN/m به طور معمول در اروپا استفاده می شوند. از دیدگاه دینامیکی، بالشتک ریل نقش مهمی در سازه خط آهن دارد. این عضو روی سختی کل خط تاثیر گذار است. وجود یک بالشتک نرم منجر به تغییر شکل بیشتر ریل تحت بارگذاری دینامیکی قطار می شود بنابراین تراورس های بیشتری تحت اثر بار قطار قرار می گیرند.

از آنجایی که بالشتک های نرم مانع از انتقال ارتعاشات با فرکانس زیاد به تراورس می شود از این رو می توان آنها را عایق ارتعاشات فرکانس بالا<sup>۱</sup> در نظر گرفت (اسولد، ۲۰۰۱). معمول ترین مدل فیزیکی بالشتک به صورت سیستم فنر-میراگر است. فنر را می توان به صورت خطی و میراگر را متناسب با نرخ تغییر شکل بالشتک فرض کرد. بر طبق مقایسه ای که بین مدل های خط آهن و اندازه گیری های میدانی صورت گرفته، مدلسازی بالشتک ریل برای دستیابی به یک پاسخ دقیق لازم است. در اندازه گیری هایی که قبلاً انجام شده، بالشتک نرم نسبت به بالشتک سخت، روی شتاب های پایین ایجاد شده در تراورس و شتاب های بالای قارچ ریل<sup>۲</sup> تاثیر گذار است.

پابندها اجزایی هستند که ریل و تراورس را به یکدیگر متصل می کنند. انتخاب نوع پابند صرفاً بستگی به نوع تراورس و هندسه ریل دارد. سختی پابند ریل معمولاً خیلی کمتر از بالشتک ریل است. بنابراین، در مطالعات دینامیک خط آهن معمولاً تاثیر پابندها قابل اغماض است.



شکل ۲-۵: ریل متصل شده به تراورس به وسیله پابند و بالشتک

## ۲-۲-۳ تراورس

تراورس ها وظیفه نگه داشتن دو ریل و حفظ مسیر را دارند. این اعضا نیروی انتقال یافته از ریل را به لایه های پایین منتقل کرده و انواع غیر فلزی آن عایق الکتریکی بین دو ریل ایجاد می کند.

<sup>۱</sup> High-Frequency isolator

<sup>۲</sup> Railhead

بسته به اینکه بازه بررسی فرکانس چه مقدار باشد، تراورس بتنی را می توان به صورت جرم صلب<sup>۱</sup> (در فرکانس زیر ۱۰۰ هرتز) یا تیر شکل پذیر در نظر گرفت. برای فرکانس بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ هرتز از تئوری تیر اولر-برنولی استفاده می شود. در فرکانس های بالاتر باید از تئوری تیر رایلی-تیموشنکو برای تشریح دقیق ارتعاشات تراورس استفاده گردد (دالبرگ، ۲۰۰۳).

سختی ریل در طول آن به دلیل داشتن تکیه گاه در فواصل حدود ۶۵ سانتی متری تغییر می کند. بیشترین مقدار سختی ریل زمانی است که چرخ از روی تراورس عبور می کند. فرکانس ارتعاش ایجاد شده در ریل ناشی از وجود فاصله بین تراورس ها از رابطه (۷-۲) بدست می آید که در آن  $V$  سرعت حرکت قطار و  $D$  فاصله تراورس ها است.

$$f = \frac{V}{D} \quad (7-2)$$

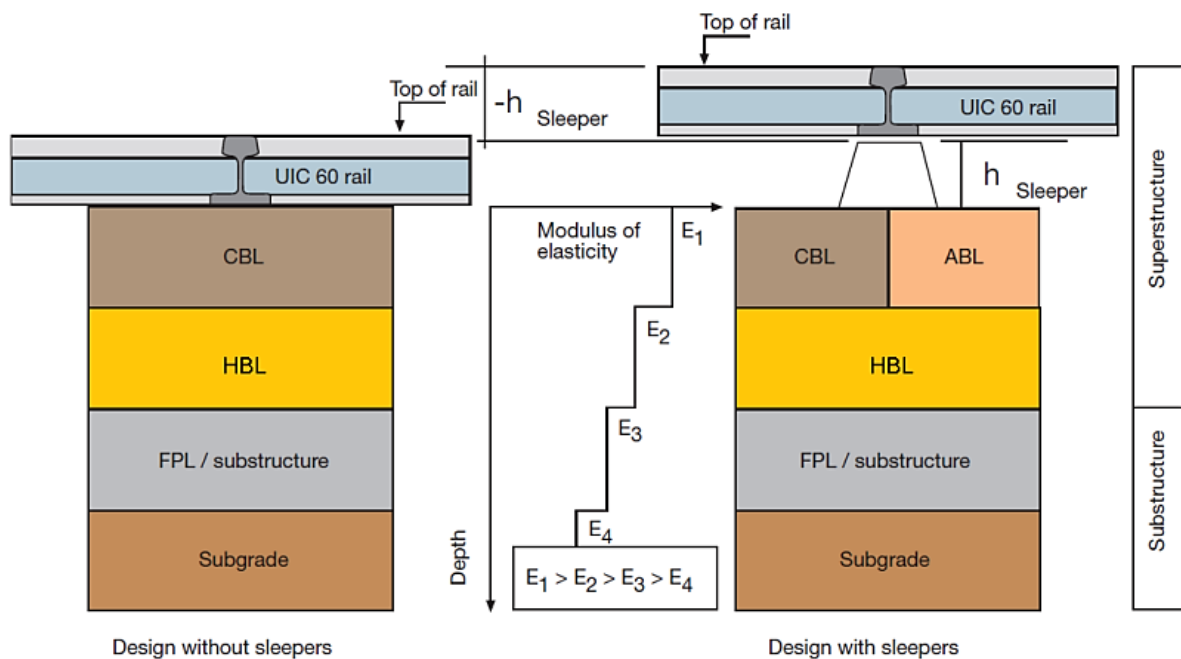
## ۲-۲-۴ خط بتنی

خط بتنی، یک رویه بتنی یا آسفالتی بوده که جایگزین خط بالاستی متداول شده است. این سازه متشکل از مصالح سخت و ترد است لذا برای رفع مشکل شکنندگی آن از مصالح ارتجاعی در زیر ریل یا تراورس ها استفاده می شود. بتن ماده غالب مورد استفاده در خطوط بتنی در سراسر جهان است و گاهی از آسفالت به عنوان ماده ساخت خط استفاده می شود. خطوط بتنی را معمولا در سازه هایی نظیر خطوط سریع السیر یا خطوط حمل و نقل سبک<sup>۲</sup> شهری می توان مشاهده نمود. در شکل ۲-۶ ساختار کلی خطوط بتنی نشان داده شده است.

مطابق شکل ۲-۶، ساختار خط بتنی عمدتا از پنج لایه بستر خاکی، لایه محافظ یخ زدگی، لایه هیدرولیکی، لایه بتنی یا آسفالتی و ریل تشکیل شده است.

<sup>۱</sup> Rigid mass

<sup>۲</sup> Light railway track



شکل ۲-۶: سه مقطع متفاوت از سازه خطوط بتنی (دار<sup>۱</sup>، ۲۰۰۰)

در ادامه ملزومات تشکیل دهنده خط بتنی شرح داده شده و جزئیات آن تحلیل می شود.

#### • لایه بتنی

لایه بتنی یا آسفالتی که در زیر ریل یا تراورس قرار می گیرد باید دارای مقاومت کافی برای تحمل بارهای وارده و انتقال آن به لایه های پایین تر باشد. همچنین این لایه به دلیل اینکه در تماس با هوای آزاد است می بایست دارای مقاومت کافی در برابر یخ زدگی و سایر عوامل جوی باشد. در ساخت این لایه معمولاً ضخامتی در حدود ۲۰ تا ۲۵ سانتی متر در نظر می گیرند و به دو صورت درجا و پیش ساخته مورد استفاده قرار می گیرد (لیچبرگر، ۲۰۰۵).

#### • لایه هیدرولیکی

لایه هیدرولیکی لایه ای است متشکل از ترکیب مصالح سنگی و عامل چسباننده مانند سیمان که در زیر لایه بتنی یا لایه آسفالتی قرار می گیرد و علاوه بر افزایش ظرفیت باربری خط از نفوذ آب از

<sup>۱</sup> Darr, E.



لایه بتنی یا آسفالتی به لایه های پایین تر جلوگیری می نماید. این لایه عموماً دارای ضخامت ۳۰ سانتی متری است (لیچبرگر، ۲۰۰۵).

#### • لایه محافظ یخ زدگی

وظیفه این لایه محافظت از یخ زدگی لایه های بالاتر است. این لایه همچنین تفاوت زیاد سختی لایه های مختلف نسبت به بستر خاکی را جبران کرده و باعث هدایت سریع رطوبت به اطراف می شود. در مقابل شرایط نامناسب جوی و یخ زدگی مقاومت می کند و به دلیل دارا بودن شن ریزدانه از نفوذ و بالا آمدن رطوبت از بستر خاکی جلوگیری می نماید (لیچبرگر، ۲۰۰۵). در طراحی ها عموماً ضخامتی در حدود ۵۰ سانتی متر برای این لایه در نظر می گیرند.

#### • بستر خاکی

خطوط بتنی راه آهن اساساً نیازمند بستری مقاوم و بدون هرگونه احتمال نشست بوده تا بتواند عملکرد مناسبی از خود نشان دهد. به همین علت این خطوط بیشتر در تونل ها و پل های راه آهن مورد استفاده قرار می گیرند (لیچبرگر، ۲۰۰۵). با توجه به این امر که تعمیرات خطوط بتنی راه آهن پس از احداث با محدودیت های زیادی روبرو است باید قبل از احداث خط تمهیداتی جهت جلوگیری از ایجاد مشکلاتی از قبیل عدم مقاومت کافی خاک بستر و نشست موضعی خط در نظر گرفته شود (اسولد، ۲۰۰۱).

## ۱-۴-۲-۲ سیستم های مختلف روسازی بتنی

سیستم های مختلف روسازی بتنی متداول در جهان که امروزه مورد استفاده قرار می گیرند در جدول ۱-۲ نشان داده شده است. این سیستم ها به دو دسته ریل روی تکیه گاه مجزا و ریل روی تکیه گاه های پیوسته تقسیم بندی می شوند.

جدول ۱-۲ : سیستم های مختلف روسازی بتنی (اسولد، بودیسا<sup>۱</sup>، باستین<sup>۲</sup> و لیچبرگر)

| سیستم های روسازی بتنی           |                            |                                  |                              |                              |                                |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| ریل روی تکیه گاه مجزا           |                            |                                  |                              | ریل روی تکیه گاه پیوسته      |                                |
| تراورس یا بلوک های مدفون در بتن | تراورس بر روی لایه آسفالتی | خطوط بتنی پیش ساخته <sup>۵</sup> | طرح های یکپارچه <sup>۴</sup> | ریل مدفون <sup>۳</sup> (ERS) | ریل روی تکیه گاه پیوسته و مقید |
| Rheda                           | ATD                        | Shinkansen                       | Lawn Track (Rasengleis)      | INFUNDO-Edilon               | Cocon Track                    |
| Rheda Berlin                    | BTD                        | Bögl                             | FFC                          | Deck Track                   | ERL                            |
| Rheda 2000                      | SATO                       | ÖBB-Porr                         | Hochtief                     | BBERS                        | Vanguard                       |
| Züblin                          | FFYS                       | IPA                              | BES                          |                              | KES                            |
| Stedef                          | GETRAC                     |                                  | PACT                         |                              | SFF                            |
| SONNEVILLE-LVT                  | WALTER                     |                                  | BTE-BWG/HILTI                |                              | Saargummi                      |
| Heitkamp                        |                            |                                  |                              |                              |                                |
| SBV                             |                            |                                  |                              |                              |                                |
| VALO                            |                            |                                  |                              |                              |                                |

<sup>۱</sup> Budisa

<sup>۲</sup> Bastin

<sup>۳</sup> Embedded rail

<sup>۴</sup> Monolithic

<sup>۵</sup> Prefabricated

## ۲-۴-۲-۲ رتبه بندی انواع خطوط بتنی در جهان

سیستم های روسازی بتنی خط به طور گسترده در سراسر جهان و به خصوص در چهار دهه اخیر استفاده شده اند. الگوی رشد استفاده از روسازی بتنی به علت سرعت بالای حمل و نقل و ظرفیت باربری بیشتر همواره صعودی بوده است. جدول ۲-۲ طول فعلی سیستم های روسازی بتنی اجرا شده در سراسر جهان را بر اساس منابع موجود نشان می دهد.

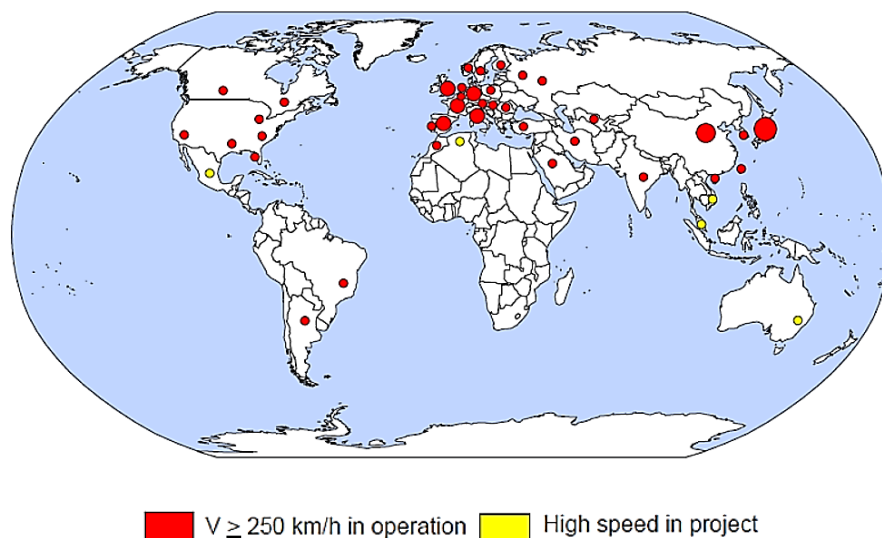
جدول ۲-۲ : طول کل سیستم های خط بتنی ساخته شده در جهان (جورج میکاس<sup>۱</sup>)

| نام خط بتنی           | کشور طراح    | کل متر از ساخته شده (km) |
|-----------------------|--------------|--------------------------|
| Bögl                  | آلمان        | ۴۳۹۱                     |
| Shinkansen            | ژاپن         | ۳۰۴۴                     |
| Rheda                 | آلمان        | ۲۲۰۵                     |
| Sonneville-LVT        | سوئیس        | ۱۰۳۱                     |
| Züblin                | آلمان        | ۶۰۶                      |
| Stedef                | فرانسه       | ۳۳۴                      |
| Infundo-Edilon        | هلند         | ۲۱۱                      |
| ÖBB-Porr              | استرالیا     | ۱۲۲/۲                    |
| IPA                   | ایتالیا      | ۱۰۰                      |
| PACT                  | ایالات متحده | ۹۵/۴                     |
| SATO                  | آلمان        | ۳۵/۸                     |
| FFYS                  | آلمان        | ۳۳/۱                     |
| BTD                   | آلمان        | ۳۲                       |
| ATD                   | آلمان        | ۳۱/۷                     |
| Getrac                | آلمان        | ۱۵/۳                     |
| Walter                | آلمان        | ۹/۴                      |
| FFC                   | آلمان        | ۱                        |
| Heitkamp              | آلمان        | ۰/۳۹                     |
| BTE                   | آلمان        | ۰/۳۹                     |
| BES                   | آلمان        | ۰/۳۹                     |
| Lawn Track/Rasengleis | آلمان        | ۰/۳۹                     |
| Hochtief              | استرالیا     | ۰/۳۹                     |

<sup>۱</sup> Michas, G.

بر اساس جدول ۲-۲، بیشترین سهم خط بتنی در سراسر جهان به ترتیب متعلق به بوژل<sup>۱</sup>، شینگانسن، رهدا، سونویل<sup>۲</sup>، زوبلین<sup>۳</sup>، استدف<sup>۴</sup> و اینفاندو<sup>۵</sup> است. یکی از عوامل مهم تاثیر گذار بر انتخاب نوع روسازی بتنی در کشورها تجربیات بدست آمده از ساخت و سازها در طول زمان است. دانش سیستم های روسازی بتنی بسیار محدود بوده و بیشتر اظهار نظرها در مورد عملکرد این خطوط، ناشی از فرضیات تجربی است که این اتفاق عموماً به دلیل عمر نسبتاً جوان آنهاست. به همین علت قدیمی ترین و طولانی ترین (از نظر ساخت در واحد کیلومتر) سیستم خط بتنی را می توان بهترین سیستم برای انجام مطالعات و بررسی انتخاب نمود.

در شکل ۲-۷، پیشی بینی ساخت خطوط پر سرعت در سال ۲۰۲۵ در نقاط مختلف جهان به منبع اتحادیه بین المللی راه آهن<sup>۶</sup> نشان داده شده است.



شکل ۲-۷: پیشی بینی ساخت خطوط پر سرعت در سال ۲۰۲۵ در جهان (اتحادیه بین المللی راه آهن)

<sup>۱</sup> Bögl

<sup>۲</sup> Sonnevile-LVT

<sup>۳</sup> Züblin

<sup>۴</sup> Stedef

<sup>۵</sup> Infundo

<sup>۶</sup> International Union of Railways (UIC)

## ۲-۴-۳ پیشینه تاریخی

مطالعات نشان می دهد در ایران، اغلب استفاده از خطوط بتنی مدفون، مرسوم بوده است که البته به دلیل نداشتن صرفه اقتصادی، نسبت به سایر سیستم ها با اقبال مناسب مواجه نشده و سیستم های جایگزین رهدا و شینکانسن پیشنهاد گردیده است (برخورداری و فلاحی، ۱۳۹۲). در این پایان نامه به تبعیت از مطالعات پیشین و رتبه بندی خطوط بتنی متداول، دو خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. با توجه به گستردگی انواع خطوط بتنی، در ادامه تنها به آشنایی مختصری از تاریخچه و مزایا و معایب این دو خط بسنده می شود.

### • خط بتنی رهدا ۲۰۰۰

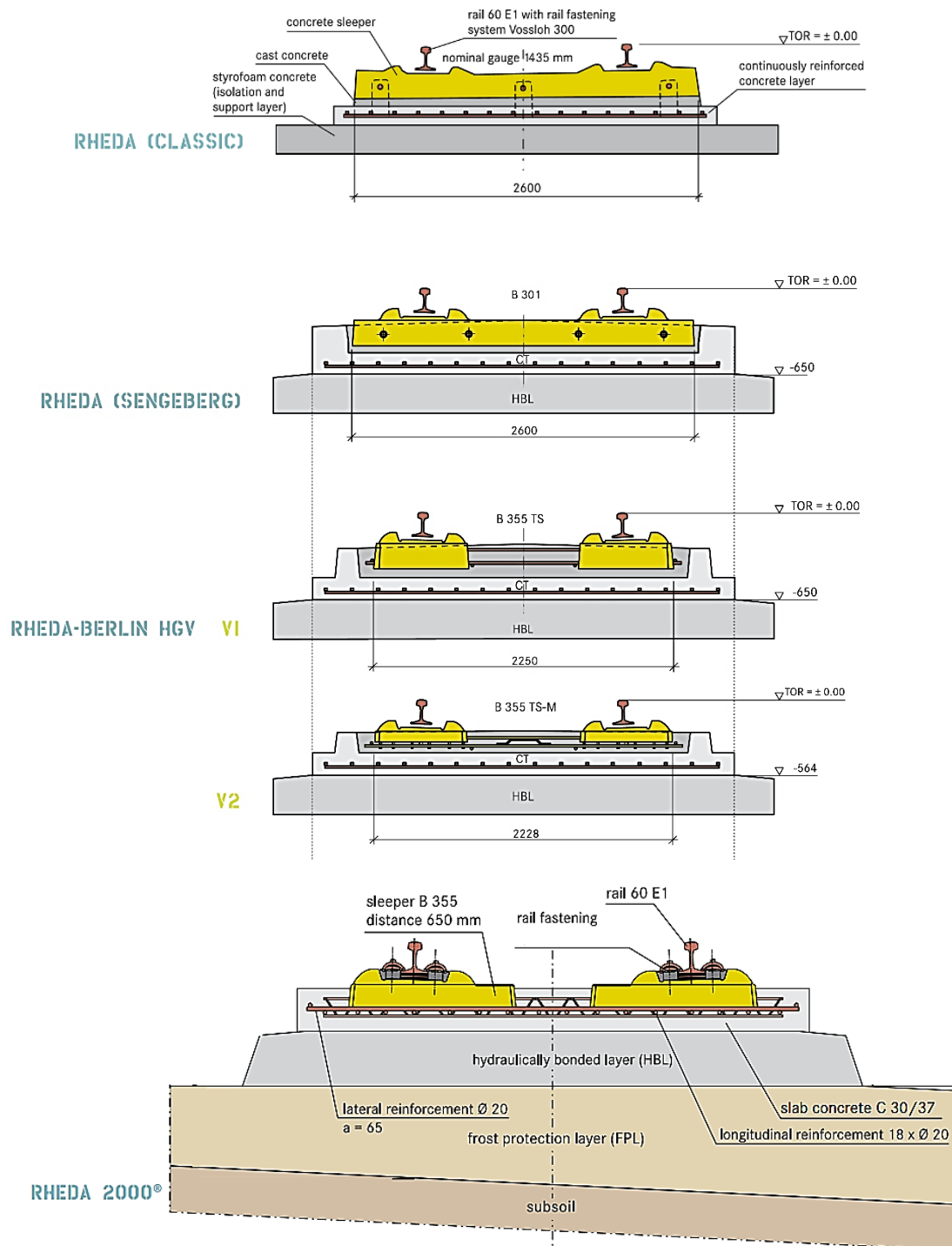
مدل های توسعه یافته و مختلف سیستم رهدا، از رایج ترین سیستم های روسازی بتنی در سرتاسر جهان هستند. بررسی ها نشان می دهد، این مدل با طول ۴۰۰ کیلومتر در آلمان (باستین، ۲۰۰۶)، ۱۵۰ کیلومتر در هلند، ۵۲ کیلومتر در تایوان، ۵۶ کیلومتر در اسپانیا، ۴۰ کیلومتر به صورت آزمایشی در چین، ۲۲ کیلومتر در یونان و همچنین دو بخش کوتاه در بریتانیا از پر ساخت ترین سیستم های خط بتنی در جهان است. امروزه این سیستم به دلیل عملکرد رضایت بخش پس از تجربه ساخت بیشتر نسبت به دیگر سیستم های روسازی بتنی، به شکل گسترده مورد استفاده قرار گرفته است.

مهمترین نسخه های توسعه یافته خط بتنی رهدا در شکل ۲-۸ نشان داده شده است. سیستم رهدا دارای امتیاز حق انحصاری در اختیار کشور خاصی نیست و به همین دلیل از زمان پیدایش این خط، همواره تحت توسعه مستمر توسط پیمانکاران مختلف بوده و نسخه های ساختاری متفاوتی در پروژه های متنوع اجرا شده است. اولین سیستم رهدا در شهر رهدا-وایدنبروک<sup>۱</sup> آلمان و در سال ۱۹۷۲ ساخته شد. با وجود پیشرفت های مستمر، ساختار رهدا همواره اساس طرح پایه و کلاسیک خود را

---

<sup>۱</sup> Rheda-wiedenbruck

حفظ کرده است. سیستم رهدا ۲۰۰۰، آخرین نسخه توسعه یافته این مدل است.



شکل ۲-۸: مهمترین مدل های توسعه یافته خط بتنی رهدا (ابعاد بر حسب میلی متر) (موسسه ریل وان<sup>۱</sup>)

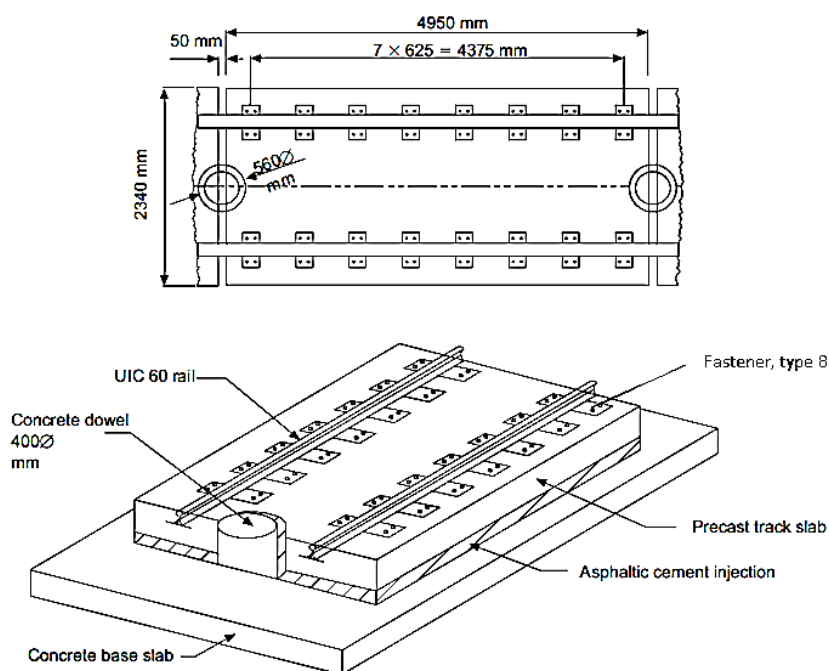
<sup>۱</sup> Rail One

از جمله مزایا و اهداف اصلی توسعه خطوط بتنی ره‌دا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ساختار یکنواخت خط به علت یکپارچه بودن بتن لایه بتنی.
- وفق پذیری عالی با تمام شیوه‌های اجرای زیرسازی، به دلیل ساخت لایه بتنی تکیه‌گاهی تراورس‌ها به روش بتن ریزی درجا.
- وجود انعطاف پذیری زیاد و سرعت بالا در فرآیند ساخت خط به دلیل سادگی اجرا.
- عدم نیاز به عملیات تعمیر و نگهداری زیاد در طول عمر مفید خط.
- آلودگی صوتی کم به دلیل مدفون بودن تراورس‌ها در لایه بتنی.

#### • خط بتنی شینکانسن

سیستم خط بتنی شینکانسن ابتدا در ژاپن و در سال ۱۹۷۲ طراحی و استفاده گردید. این خط از ترکیب دال‌های بتنی پیش‌ساخته به طول ۴/۹۵ متر، عرض ۲/۳۴ متر و ضخامت ۰/۱۹ متر با پیش‌تندگی اندک در جهت طولی و عرضی تشکیل شده است (اسولد، ۲۰۰۱). جزئیات خط بتنی شینکانسن در شکل ۹-۲ نشان داده شده است.



شکل ۹-۲ : خط بتنی شینکانسن

وزن هر کدام از این قطعات بتنی ۵ تن است که در بالای لایه نازک آسفالتی قرار می گیرد. ضخامت لایه آسفالت زیر دال حداقل ۴ سانتی متر است و گاهی از بالشتک های لاستیکی ضد لرزش استفاده می شود (گزارش اتحادیه بین المللی راه آهن، ۱۹۹۹). از حرکت جانبی و طولی دال ها با استفاده از نگهدارنده های استوانه ای شکل بتنی<sup>۱</sup> (میله پایدار کننده) جلوگیری می شود که این قطعات به بتن لایه هیدرولیکی متصل شده است (لیچبرگر، ۲۰۰۵).

از مهمترین مزایای خطوط بتنی شینکانسن می توان به موارد زیر اشاره کرد.

- ایمنی بالا در مقابل نیروهای جانبی به دلیل استفاده از قطعات نگهدارنده
- کم بودن عرض و ارتفاع خطوط شینکانسن به دلیل تعداد کم لایه ها.
- کم شدن ارتعاشات ناشی از عبور قطار به دلیل وجود لایه آسفالتی در ساختار خط.
- سرعت ساخت بسیار بالا به دلیل پیش ساخته بودن دال های بتنی خط.
- عدم نیاز به عملیات تعمیر و نگهداری زیاد در طول عمر مفید خط.

## ۲-۳ ویژگی های دینامیکی خط

### ۲-۳-۱ رسپتنس

یکی از روش های بررسی ویژگی های دینامیکی خط آهن، اعمال بار سینوسی هارمونیک<sup>۲</sup> و تحلیل پاسخ خط نسبت به آن است. رسپتنس عبارت است از نسبت تغییر شکل سازه به بار روی آن؛ لذا این پارامتر نشان دهنده تغییر شکل در واحد متر بر نیوتن بار وارده است. رسپتنس معکوس سختی خط می باشد. تابع رسپتنس عضوی از مجموعه توابع پاسخ فرکانسی<sup>۳</sup> است که نشان دهنده دامنه

---

<sup>۱</sup> Dowel/Bollard

<sup>۲</sup> Harmonic sinusoidal load

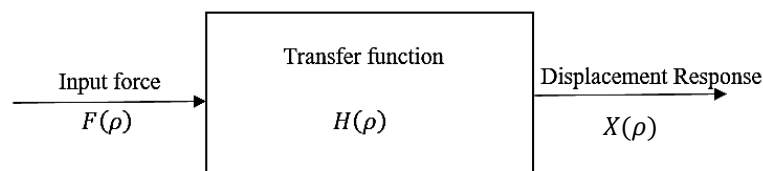
<sup>۳</sup> Frequency Response Functions (FRF)



ارتعاش<sup>۱</sup> سازه خط به عنوان تابعی از فرکانس ارتعاش بوده و به طور دقیق تر تغییر شکل سازه خط را تحت بارگذاری واحد نمایش می دهد (دالبرگ، ۲۰۰۳). برای شناخت دقیق رسپتنس ابتدا لازم است تابع پاسخ فرکانسی شناخته شود.

ابزارهای زیادی به منظور بررسی رفتار دینامیکی و تحلیل ارتعاشی راه آهن موجود است. تابع پاسخ فرکانسی یکی از مهمترین و کاربردی ترین این ابزارها است. تابع پاسخ فرکانسی، تابع انتقالی<sup>۲</sup> است که در حوزه فرکانس عمل می نماید. توابع پاسخ فرکانسی توابع پیچیده ای هستند که از دو بخش حقیقی و موهومی<sup>۳</sup> تشکیل شده اند. این توابع همچنین به صورت جملات جبری بزرگی<sup>۴</sup> و زاویه فاز<sup>۵</sup> نشان داده می شوند. توابع رسپتنس را می توان هم با اندازه گیری های میدانی و هم به صورت تحلیل سازه ها بدست آورد. یک تابع پاسخ فرکانسی، پاسخ سازه را در اثر اعمال بار به صورت تابعی از فرکانس نشان می دهد. این پاسخ ها ممکن است با استفاده از پارامترهایی نظیر تغییر مکان، سرعت و یا شتاب بدست بیایند (ایروین<sup>۶</sup>، ۲۰۰۰).

سیستم خطی شکل ۲-۱۰ را در نظر بگیرید.



شکل ۲-۱۰: مدل خطی تابع پاسخ فرکانسی (ایروین، ۲۰۰۰)

<sup>۱</sup> Vibration amplitude

<sup>۲</sup> Transfer function

<sup>۳</sup> Imaginary

<sup>۴</sup> Magnitude

<sup>۵</sup> Phase angle

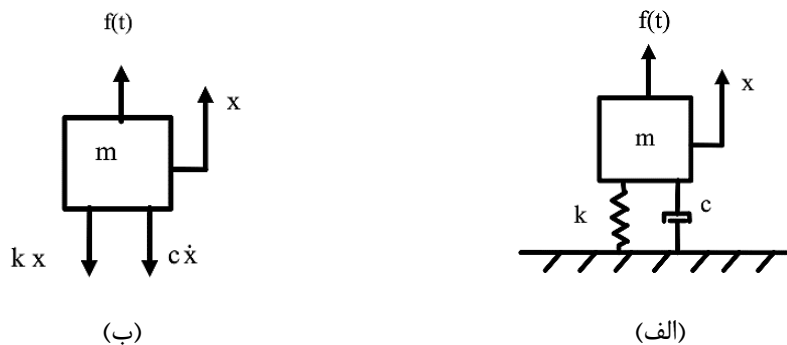
<sup>۶</sup> Irvin, T.

در شکل ۱۰-۲،  $F(\rho)$  بار ورودی به صورت تابعی از فرکانس زاویه ای،  $H(\rho)$  تابع انتقال و  $X(\rho)$  تابع پاسخ تغییر شکل سیستم است. در این شکل، تمام توابع می توانند پیچیده باشند و به صورت جملات بزرگی و فاز نشان داده شوند. رابطه موجود در شکل ۱۰-۲ را می توان به صورت زیر نمایش داد.

$$X(\rho) = F(\rho) \times H(\rho) \quad (۸-۲)$$

$$H(\rho) = \frac{X(\rho)}{F(\rho)} \quad (۹-۲)$$

رابطه (۹-۲) تابع پاسخ فرکانسی خط با در نظر گرفتن تغییر شکل یا همان رسپتنس است. برای شناخت بهتر این رابطه سیستم یک درجه آزادی شکل ۱۱-۲ (الف) را در نظر می گیریم.



شکل ۱۱-۲: الف) سیستم یک درجه آزادی ب) دیاگرام آزاد سیستم یک درجه آزادی

که در آن،

$$m = \text{جرم}$$

$$c = \text{ضریب میرایی ویسکوز}$$

$$k = \text{سختی}$$

$$x = \text{تغییر مکان مطلق جرم}$$

$$f(t) = \text{بار وارده}$$

دیاگرام آزاد شکل ۱۱-۲ (الف) در شکل ۱۱-۲ (ب) نشان داده شده است. با برقراری تعادل در جهت قائم خواهیم داشت،

$$\sum F = m\ddot{x} \quad (۱۰-۲)$$

$$m\ddot{x} = -c\dot{x} - kx + f(t) \quad (۱۱-۲)$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (۱۲-۲)$$

با تقسیم طرفین رابطه (۱۲-۲) بر  $m$  می توان نوشت،

$$\ddot{x} + \left(\frac{c}{m}\right)\dot{x} + \left(\frac{k}{m}\right)x = \left(\frac{1}{m}\right)f(t) \quad (۱۳-۲)$$

با تبدیل،

$$\left(\frac{c}{m}\right) = 2\xi\omega_n \quad (۱۴-۲)$$

$$\left(\frac{k}{m}\right) = \omega_n^2 \quad (۱۵-۲)$$

که در آن،

$\omega_n$  = فرکانس طبیعی بر حسب (rad/sec)

$\xi$  = ضریب میرایی

با جایگذاری روابط (۱۴-۲) و (۱۵-۲) در رابطه (۱۳-۲)،

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = \frac{1}{m}f(t) \quad (۱۶-۲)$$

حال با فرض تابع بار سینوسی که بیانگر تحریک هارمونیک سیستم است رابطه (۱۷-۲) بدست می آید،

$$f(t) = f_0 \sin(\omega t) \quad (۱۷-۲)$$

با جایگذاری رابطه (۱۷-۲) در رابطه (۱۶-۲)،

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = \frac{1}{m}f_0 \sin(\omega t) \quad (۱۸-۲)$$

سمت راست رابطه (۱۸-۲) را می توان به صورت زیر نوشت.

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = \frac{\omega_n^2}{k}f_0 \sin(\omega t) \quad (۱۹-۲)$$

حال با گرفتن تبدیل فوریه<sup>۱</sup> از طرفین رابطه (۲-۱۹)،

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x\} e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{\omega_n^2}{k} f_0 \sin(\omega t) \right\} e^{-j\omega t} dt \quad (2-20)$$

با فرض،

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \{x(t)\} e^{-j\omega t} dt \quad (2-21)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \{f_0 \sin(\omega t)\} e^{-j\omega t} dt \quad (2-22)$$

حال با گرفتن تبدیل فوریه از عبارت سرعت،

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{\dot{x}(t)\} e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{dx(t)}{dt} \right\} e^{-j\omega t} dt \quad (2-23)$$

با انتگرال گیری از هر بخش،

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \{\dot{x}(t)\} e^{-j\omega t} dt \\ = \int_{-\infty}^{\infty} d\{x(t)e^{-j\omega t}\} dt - \int_{-\infty}^{\infty} [x(t)](-j\omega)e^{-j\omega t} dt \end{aligned} \quad (2-24)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{\dot{x}(t)\} e^{-j\omega t} dt = x(t)e^{-j\omega t} \Big|_{-\infty}^{\infty} + (j\omega) \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2-25)$$

$$x(t)e^{-j\omega t} \Big|_{-\infty}^{\infty} = 0 \quad (2-26)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{\dot{x}(t)\} e^{-j\omega t} dt = (j\omega) \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2-27)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{\dot{x}(t)\} e^{-j\omega t} dt = j(\omega)X(\omega) \quad (2-28)$$

به علاوه

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{\ddot{x}(t)\} e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \right\} e^{-j\omega t} dt \quad (2-29)$$

---

<sup>۱</sup> Fourier transform

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \{\ddot{x}(t)\} e^{-j\omega t} dt \\ = \int_{-\infty}^{\infty} d\left\{\frac{dx(t)}{dt} e^{-j\omega t}\right\} - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx(t)}{dt} (-j\omega) e^{-j\omega t} dt \end{aligned} \quad (۳۰-۲)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{\ddot{x}(t)\} e^{-j\omega t} dt = \frac{dx(t)}{dt} e^{-j\omega t} \Big|_{-\infty}^{\infty} + (j\omega) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx(t)}{dt} e^{-j\omega t} dt \quad (۳۱-۲)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} e^{-j\omega t} \Big|_{-\infty}^{\infty} = 0 \quad (۳۲-۲)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{\ddot{x}(t)\} e^{-j\omega t} dt = (j\omega) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx(t)}{dt} e^{-j\omega t} dt \quad (۳۳-۲)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{\ddot{x}(t)\} e^{-j\omega t} dt = (j\omega)(j\omega)X(\omega) \quad (۳۴-۲)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{\ddot{x}(t)\} e^{-j\omega t} dt = -\omega^2 X(\omega) \quad (۳۵-۲)$$

با فراخوانی رابطه (۲۰-۲) و جایگذاری روابط قبل در آن،

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x\} e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{\omega_n^2}{k} f_0 \sin(\omega t) \right\} e^{-j\omega t} dt \quad (۲۰-۲)$$

با جایگذاری،

$$-\omega^2 X(\omega) + j\omega(2\xi\omega_n)X(\omega) + \omega_n^2 X(\omega) = \frac{\omega_n^2}{k} F(\omega) \quad (۳۶-۲)$$

$$\{-\omega^2 + j\omega(2\xi\omega_n) + \omega_n^2\}X(\omega) = \frac{\omega_n^2}{k} F(\omega) \quad (۳۷-۲)$$

$$X(\omega) = \frac{\omega_n^2}{k} \left[ \frac{1}{-\omega^2 + j\omega(2\xi\omega_n) + \omega_n^2} \right] F(\omega) \quad (۳۸-۲)$$

$$\frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{k} \left[ \frac{\omega_n^2}{-\omega^2 + j\omega(2\xi\omega_n) + \omega_n^2} \right] \quad (۳۹-۲)$$

$$\frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{k} \left[ \frac{\omega_n^2}{\omega_n^2 + j\omega(2\xi\omega_n) - \omega^2} \right] \quad (۴۰-۲)$$

$$\frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{k} \left[ \frac{1}{\left[ \frac{\omega_n^2 - \omega^2}{\omega_n^2} \right] + j2\xi \frac{\omega}{\omega_n}} \right] \quad (۴۱-۲)$$

با فرض

$$\rho = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (42-2)$$

$$\frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{k} \left[ \frac{1}{[1 - \rho^2] + j2\xi\rho} \right] \quad (43-2)$$

تابع انتقال معمولاً به صورت  $H(\rho)$  نشان داده می شود بنابراین رابطه (۹-۲) بدست می آید.

$$H(\rho) = \frac{X(\rho)}{F(\rho)} = \frac{1}{k} \left[ \frac{1}{[1 - \rho^2] + j2\xi\rho} \right] \quad (9-2)$$

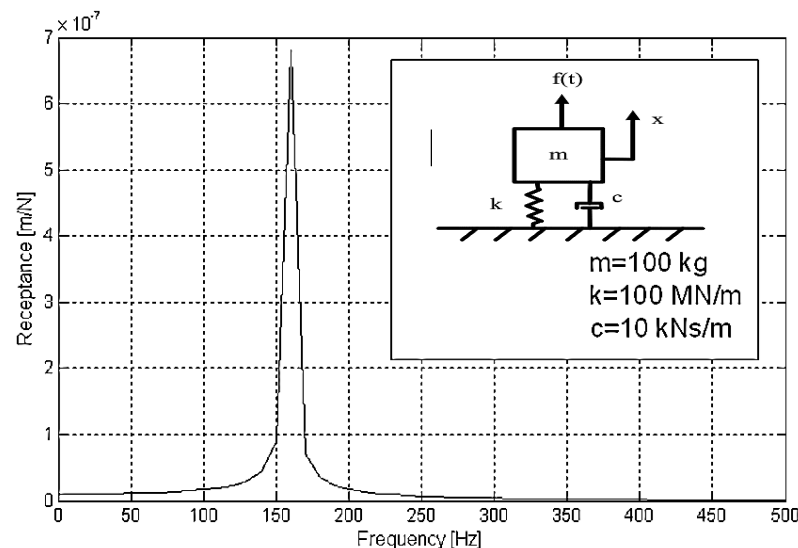
این تابع انتقال، که نسبت تغییر شکل به نیرو را نشان می دهد، تابع رسپتانس نامیده می شود.

تابع انتقال را همچنین می توان به صورت عبارات بزرگی و زاویه فاز نشان داد.

$$|H(\rho)| = \frac{1}{k} \left[ \frac{1}{\sqrt{[1 - \rho^2]^2 + [2\xi\rho]^2}} \right] \quad (44-2)$$

$$\phi = \arctan \left[ \frac{2\xi\rho}{1 - \rho^2} \right] \quad (45-2)$$

برای نمونه در شکل ۱۲-۲، تابع رسپتانس یک سیستم یک درجه آزادی جرم و فنر ترسیم شده است.



شکل ۱۲-۲: تابع رسپتانس سیستم یک درجه آزادی

در سیستم های چند درجه آزادی (برای مثال سیستم های خط آهن) رابطه محاسبه رسپتانس را

می توان به صورت رابطه (۴۶-۲) نوشت (ایروین، ۲۰۱۳).

$$H_{ij}(\rho) = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_{ir}\phi_{jr}}{m\omega_n^2} \cdot \frac{1}{(1-\rho^2) + i(2\xi\rho)} \quad (46-2)$$

$$\rho = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (47-2)$$

$$i = \sqrt{-1} \quad (48-2)$$

که در آن،

$\omega$  = فرکانس زاویه ای تحریک بار ( $rad/sec$ )

$\omega_n$  = فرکانس زاویه ای طبیعی مد  $r$  ( $rad/sec$ )

$N$  = تعداد کل درجات آزادی

$\xi$  = نسبت میرایی

$\phi_{ir}$  = درایه ردیف  $i$  و ستون  $r$  ماتریس مدی

$H_{ij}(\rho)$  = تابع رسپتنس در نقطه  $i$  به ازای تحریک هارمونیک در نقطه  $j$

از آنجا که توابع رسپتنس اساساً توابع انتقال هستند همیشه به یک نقطه مشخص اشاره دارند.

مدل های تحلیلی مانند آنچه در این پژوهش بررسی می شود، امکان محاسبه تابع رسپتنس بین نقطه

بارگذاری و هر نقطه دیگری روی ریل، تراورس و یا سایر اجزا را ایجاد می کنند. به این توابع، رسپتنس

مقطعی<sup>۱</sup> گفته می شود و در مقابل آن زمانی که محاسبه رسپتنس در همان نقطه بارگذاری بدست آید،

به آن رسپتنس مستقیم<sup>۲</sup> گفته می شود (دمان<sup>۳</sup>، ۲۰۰۲).

## ۲-۳-۲ تشدید

تشدید<sup>۴</sup> در سازه ها زمانی رخ می دهد که فرکانس بار اعمال شده (فرکانس تحریک<sup>۵</sup>) معادل

<sup>۱</sup> Cross-Receptance

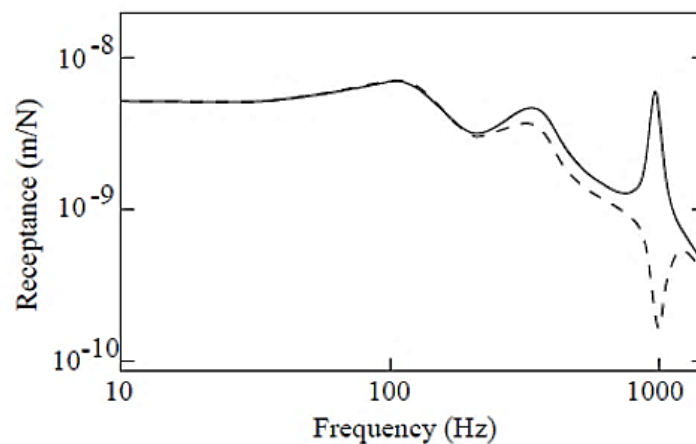
<sup>۲</sup> Direct-Receptance

<sup>۳</sup> De Man, A.

<sup>۴</sup> Resonance

<sup>۵</sup> Excitation frequency

فرکانس طبیعی<sup>۱</sup> سازه شود که در چنین شرایطی آسیب های جدی به سازه وارد شده و ممکن است تخریب سازه را به همراه داشته باشد. امکان وقوع تشدید در سازه خط آهن با توجه به ماهیت دینامیکی ضربه ناشی از حرکت قطار بسیار بالا بوده و مطالعات فراوانی برای کاهش اثرات مخرب این پدیده انجام شده است. در شکل ۲-۱۳ تابع رسپتانس یک خط معمول راه آهن تحت بارگذاری سینوسی دیده می شود. در این شکل، منحنی با خط کامل مربوط به زمانی است که بارگذاری بین دو تراورس<sup>۲</sup> انجام شده باشد و منحنی خط چین مربوط به موقعیت بارگذاری روی تراورس است. اکستریم های نمودار نشان دهنده فرکانس های تشدید و رسپتانس متناظر خط هستند. قسمت های بیشینه و باریک منحنی فرکانس-های تشدید را نشان می دهند که به مقدار زیادی میرا شده اند.



شکل ۲-۱۳: تابع رسپتانس یک خط راه آهن تحت بارگذاری سینوسی (هوآن فنگ<sup>۳</sup>، ۲۰۱۱)

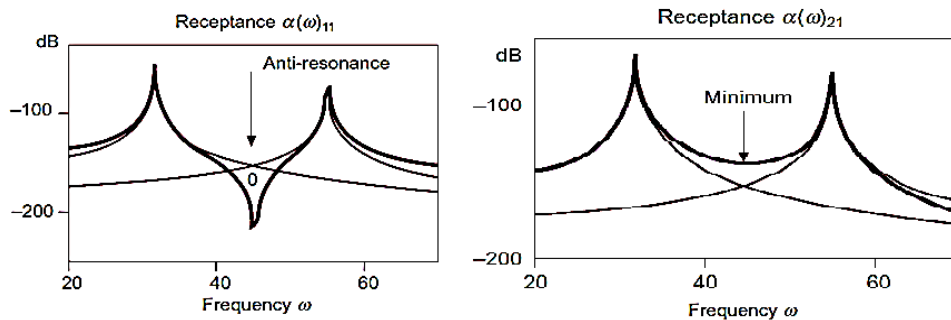
همچنین، عامل های جدیدی مانند ضد تشدید و مقدارهای کمینه همانند شکل ۲-۱۴ در نمودارهای رسپتانس بررسی می شود.

<sup>۱</sup> Natural frequency

<sup>۲</sup> Midspan

<sup>۳</sup> Feng, H.



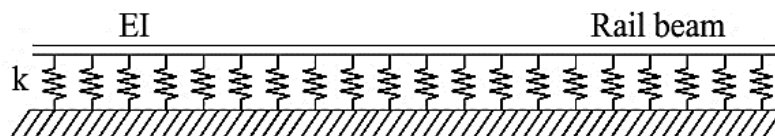


شکل ۲-۱۴: محل ضد تشدید و مقدارهای کمینه در نمودارهای تابع پاسخ فرکانسی (هئو<sup>۱</sup>، ۲۰۰۱)

## ۴-۲ مدل های ریاضی

### ۲-۴-۱ مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی

از دید پیشینه تاریخی، مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی<sup>۲</sup> تئوری قدیمی و کلاسیکی بوده که پشتوانه پیشرفت های بسیاری در طراحی خط است. این مدل در سال ۱۸۶۷ توسط وینکلر<sup>۳</sup> معرفی شد و هنوز هم در محاسبات سریع و ساده تغییر شکل خمشی استفاده می شود (کی جل<sup>۴</sup>، ۲۰۰۲). مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی پیوسته در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۵: مدل تیر (سختی خمشی  $EI$ ) بر روی بستر ارتجاعی (مدول  $k$ )

این مدل یک قاعده ریاضی ساده، واضح و قابل تعبیر دارد. در این مدل، ریل به صورت یک تیر نامحدود اولر بر روی بستر وینکلر که تکیه گاه ها به صورت فنرهای طولی در زیر ریل قرار دارند، مدلسازی می شود. توزیع نیروی تکیه گاهی تیر به نسبت تغییر شکل خمشی تیر است. تغییر شکل

<sup>۱</sup> Heo.

<sup>۲</sup> Beam On Elastic Foundation (BOEF)

<sup>۳</sup> Winkler

<sup>۴</sup> Kjell A. S.

خمشی ریل،  $w(x)$ ، از معادله دیفرانسیل زیر بدست می آید.

$$EI \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + kw(x) = q(x) \quad (۴۹-۲)$$

که در آن،

$x$  = مختصات طولی

$q(x)$  = توزیع بار روی ریل

$EI$  = سختی خمشی ریل ( $Nm^2$ )

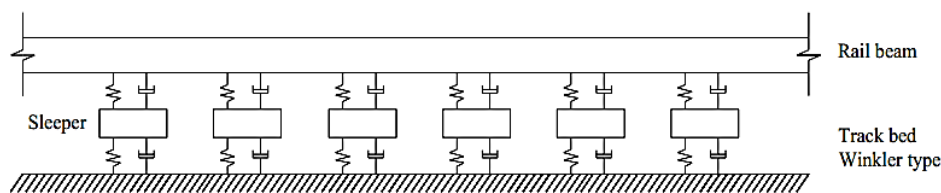
$k$  = سختی بستر ( $N/m^2$ )

مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی پیوسته ممکن است نتایج قابل قبولی به همراه داشته باشد ولی تنها برای حالت بارگذاری استاتیکی روی تکیه گاه نرم مانند تراورس چوبی قابل قبول است. چندین محدودیت واضح در اینگونه مدلسازی ها وجود دارد که می توان از آنها به فرض پیوسته بودن بستر ریل و خطی بودن پاسخ آن، در نظر گرفتن رفتار مواد تنها در جهت قائم، عدم در نظر گرفتن تغییر شکل های برشی در مدلسازی و عدم در نظر گرفتن پارامتر زمان اشاره کرد.

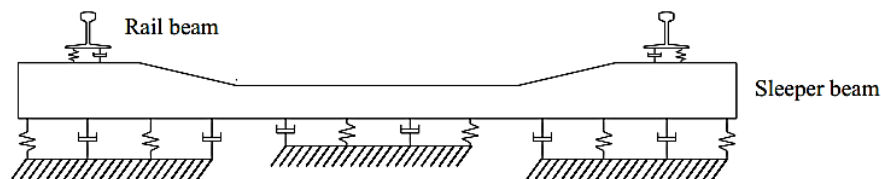
## ۲-۴-۲ تیر (ریل) روی تکیه گاه های مجزا

در این مدل تکیه گاه ها به صورت مجموعه ای از فنر-میراگر یا فنر-جرم- فنر مدل می شوند. همچنین در این تئوری، بالشتک های ریل، تراورس ها و بستر را می توان مدلسازی کرد. همانطور که در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده، در مدل سه بعدی، ریل (المان تیر)، بر روی مجموعه فنر و میراگر به صورت موازی قرار می گیرد. این مجموعه فنر و میراگر بالشتک ریل را شبیه سازی می کند. زیر این مجموعه المان تیر دیگری برای مدل کردن تراورس قرار دارد و در نهایت تراورس ها بر روی بستر ارتجاعی که مجدداً به صورت مجموعه فنر و میراگر مدل شده است قرار می گیرند (کای و ریموند<sup>۱</sup>، ۱۹۹۴).

<sup>۱</sup> Z. Cai, G.P. Raymond



(a) Longitudinal view



(b) Transverse view

شکل ۲-۱۶: مدل ریل روی تکیه گاه های مجزا

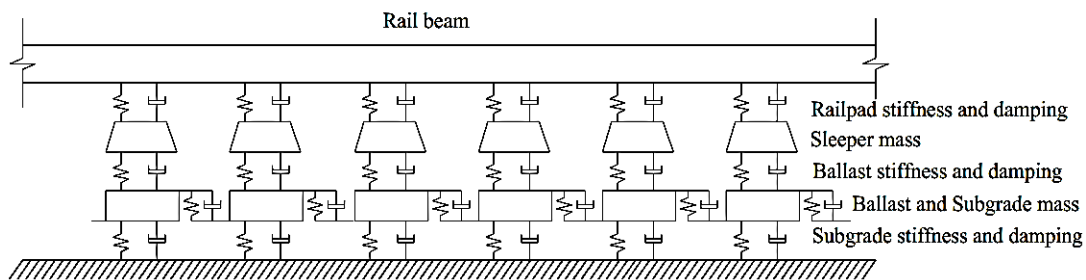
## ۲-۴-۳ تیر روی تکیه گاه های مجزا شامل توده بالاست<sup>۱</sup>

اسکارسون<sup>۲</sup> (۲۰۰۱) برای اینکه بتواند در مدل های فوق، تشدید در فرکانس های پایین (۲۰ تا ۴۰ هرتز) را در مدل بررسی کند، مدلی با جرم های بیشتر ارائه نمود. نتایج مطالعات او نشان می دهد با افزایش جرم بالاست و بستر (بسیار بیشتر از جرم تراورس و ریل) و تنظیم سختی بستر، تشدید در فرکانس های پایین رخ می دهد. در شکل ۲-۱۷ توده های بالاست و بستر با هم ارتباط داشته و لذا تغییر شکل در یک تراورس، تغییر شکل در تراورس های همجوار را تحت تاثیر قرار می دهد. بررسی این موضوع (که در خط راه آهن وجود دارد) در مدل های ساده تر مانند مدل خط شکل ۲-۱۵ امکان پذیر نیست. اثر چگالی بالاست روی نیروی تماسی<sup>۳</sup> بین چرخ و ریل در محل مفصل اتصال دو ریل و شتاب ایجاد شده در بالاست را با این مدل می توان مطالعه کرد.

<sup>۱</sup> Discretely supported rail including ballast mass

<sup>۲</sup> Oscarsson, J.

<sup>۳</sup> Contact force



شکل ۲-۱۷: ریل روی تکیه گاه های مجزا و تراورس ها به صورت توده های صلب

کی جل (۲۰۰۲) در ادامه مطالعه تئوری های متفاوت نشان داد، با توجه به مقدار بار و سرعت حرکت قطار ممکن است تراورس هایی وجود داشته باشند که برای آنها پدیده بلندشدگی<sup>۱</sup> رخ دهد و در واقع تنشی در آنها به وجود نیاید و صرفاً یک نیروی رو به بالا وجود داشته باشد.

## ۲-۵ مدل سازی خط

پیدایش اولین سیستم های روسازی بتنی مدت ها قبل، تقریباً در شروع قرن ۲۰ میلادی بوده است اما این خطوط در ۴۰ سال گذشته رشد و توسعه زیادی داشته اند. محققین بسیاری روی مدل های متفاوت خط کار کرده اند. مدل های دو بعدی برای مطالعه رفتار قائم خط مناسب اند، ولی در این مدل ها خواص عرضی مقطع نادیده گرفته می شود. بنابراین مدل های سه بعدی خط به این دلیل که عملکرد خط و پاسخ های آن را در تمام جهات ارائه می کنند به مرور مورد استفاده قرار گرفتند. به دلیل قدمت بیشتر خطوط بالاستی، شروع مطالعات رفتار دینامیکی روسازی راه آهن با این خطوط همراه بود. این مطالعات شامل بررسی ویژگی های دینامیکی اجزای تشکیل دهنده خط، مدل های ریاضی و ویژگی های دینامیکی خط بوده اند.

مروری بر ادبیات فنی موجود نشان می دهد به طور کلی بر بررسی ارتعاشات خطوط ریلی دو دیدگاه حاکم است. در دیدگاه نخست، ناوگان به صورت مجموعه ای از جرم، فنر و میراگر

<sup>۱</sup> Uplift

در نظر گرفته شده و اندرکنش آن با روسازی خط به صورت یک تیر (ریل) پیوسته و مجموعه ای از جرم، فنر و میراگر بررسی شده است. در این زمینه می توان به مطالعات گراسی و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۸۲) و لو و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۶) اشاره کرد. در دیدگاه دوم مجموعه خط و محیط اطراف آن به صورت یک سیستم پیوسته در نظر گرفته شده و ارتعاشات ناشی از بار متحرک ناوگان، در خط و محیط اطراف آن مطالعه شده است. در ادامه به تفکیک بخشی از مطالعات انجام شده در زمینه تئوری های دینامیکی خطوط راه آهن، مطالعات مربوط به مدلسازی خطوط بالاستی، مطالعات مربوط به مدلسازی خطوط بتنی و مطالعات با رویکرد مقایسه ای بین خطوط بالاستی و بتنی ارائه می شود.

### • پیشینه مطالعات تئوری های دینامیک خطوط راه آهن

دافی<sup>۳</sup> (۱۹۹۰) پاسخ دینامیکی یک ریل با فرض بی نهایت بودن طول آن را بر اثر عبور یک جرم مرتعش بررسی نمود. او در تحلیل خود از بستر وینکلر به عنوان بستر خاکی استفاده کرد. همچنین برای نزدیک شدن شرایط مدل به شرایط فیزیکی خط، بار مرتعش را به صورت های ثابت و متحرک با فرکانس های تحریک متفاوت بر سازه خط اعمال نمود. نتایج مطالعات او نشان می دهد برای یک بار مرتعش و ثابت، با افزایش جرم بار، تشدید در فرکانس های پایین رخ می دهد. همچنین در حالت بار مرتعش و متحرک با افزایش سرعت و/یا جرم، تشدید در فرکانس های پایین اتفاق می افتد.

کای و ریموند (۱۹۹۴) مدل سه بعدی متشکل از المان های فنر و میراگر را برای شبیه سازی مکانیزم عملکرد بالشتک ریل معرفی نمودند. در این مدلسازی تیر به هر دو صورت اولر-برنولی و رایلی-تیموشنکو مدل گردید. المان تیر دیگری برای مدلسازی تراورس در نظر گرفته شد. مجموعه فوق برای شبیه سازی بستر ارتجاعی بر روی فنر و میراگرهای موازی قرار گرفت. آنها در پایان به بررسی پاسخ

---

<sup>۱</sup> Grassie et al.

<sup>۲</sup> Lou et al.

<sup>۳</sup> Duffy, D. G.

دینامیکی خط در اثر ضربه ناشی از حرکت چرخ قطار پرداختند.

کالکر<sup>۱</sup> (۱۹۹۶) مدلسازی خط را به صورت تیر روی تکیه گاه مجزا انجام داد و تغییر مکان های قائم خط را بر اثر عبور بار عمودی متحرک با شدت متغیر بررسی نمود. او در مطالعه خود ریل را به صورت تیر اولر-برنولی مدل کرد. رویکرد او در این مطالعه دستیابی به منحنی های تغییر مکان قائم خط در زمان های مختلف بارگذاری بود.

مدشوس و همکاران<sup>۲</sup> (۱۹۹۹) به کمک مدلسازی عددی به شبیه سازی لرزش ناشی از حرکت قطار در زمین اطراف خط آهن پرداختند. ویژگی اصلی این تحقیق، مدلسازی بی نهایت جانبی زمین طبیعی و امکان تطبیق دادن شرایط خاکریز و ریل در مطالعات عددی است. همچنین مدلسازی آنها قابلیت بررسی فرکانس های پایین ارتعاشات شبه استاتیکی<sup>۳</sup> ناشی از بار متحرک و فرکانس های بالای ناشی از ارتعاشات دینامیکی را دارد. مطالعات آنها نشان داد افزایش سختی خط با ایجاد تیرهای صلب بتنی در بستر، کاهش چشمگیر ارتعاشات ایجاد شده در زمین اطراف خط را به همراه خواهد داشت.

#### • پیشینه مطالعات مربوط به مدلسازی دینامیکی خطوط بالاستی

پاپ و همکاران<sup>۴</sup> (۱۹۹۹) به مطالعه رفتار دینامیکی خط بالاستی در بازه فرکانسی ۵۰ تا ۵۰۰ هرتز پرداختند. آنها در تحقیقات خود اندرکنش وسیله نقلیه و سیستم چرخ های آن را به طور همزمان با سیستم خط بالاستی بررسی نمودند. نتایج مطالعه آنها نشان داد دلیل اصلی خرابی های خط آهن، نقش تعیین کننده بالشتک ریل، بالاست و بستر خاکی در رفتار دینامیکی خط است.

---

<sup>۱</sup> Kalker

<sup>۲</sup> Madshus et al.

<sup>۳</sup> Quasi-Static

<sup>۴</sup> Popp, K et al.

چبلی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۸) با مدلسازی دو بعدی و بررسی میدانی خط بالاستی راه آهن به مطالعه پاسخ دینامیکی آن پرداختند. در این مدلسازی اندرکنش بین خاک و سازه خط آهن در نظر گرفته شد و با اعمال بار متحرک قطار سریع السیر روی خط بالاستی، پاسخ دینامیکی خط مورد ارزیابی قرار گرفت. به علاوه اندازه گیری های میدانی روی خطوط پر سرعت شمال فرانسه انجام شد. در این مطالعه شتاب های طولی و عرضی در نقاط مختلف خط اندازه گیری شده و با داده های مدلسازی مقایسه گردید. نتایج پژوهش آنها همخوانی مناسبی را در شتاب های مثبت بین مدلسازی و اندازه گیری های میدانی نشان می دهد. همچنین آنها دریافتند استفاده از مصالح ایزوتروپیک برای بررسی رفتار مصالح در مدلسازی به جهت دستیابی به پاسخ های رضایت بخش کفایت نمی کند.

ذاکری و ممقانی<sup>۲</sup> (۱۳۸۸) به تحلیل دینامیکی سازه خط آهن بالاستی پرداختند. در این مطالعه، مدل خط بتنی به روش المان محدود برای شبیه سازی دینامیکی سیستم خط آهن بالاستی استفاده شد. آنها با حل همزمان معادلات دیفرانسیل کل سیستم و انجام تحلیل در سرعت های متفاوت قطار، پاسخ های دینامیکی سازه را به صورت تغییر مکان، سرعت و شتاب مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آنها نشان داد با کاهش سرعت قطار به میزان ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت باعث کاهش ۱۷ درصدی شتاب ارتعاشی خط می گردد. همچنین آنها دریافتند که در سرعت های بالا یک باربرداری و بارگذاری در ناحیه تماسی بین چرخ و ریل به وجود می آید که موجب ایجاد اوج در نمودار تغییر مکان قائم ریل شده که به موجب آن نیروی دینامیکی ناحیه تماس چرخ و ریل افزایش می یابد. این باربرداری و بارگذاری به موجب جدا شدن چرخ از روی سطح ریل و تماس مجدد چرخ و ریل با یکدیگر ایجاد می گردد.

---

<sup>۱</sup> Chebli, H. et al.

<sup>۲</sup> Zakeri J. A, and Mamaghani A. N.

نگوین و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۱) به تحلیل دینامیکی بارهای ترافیکی بر سرعت روی خطوط بالاستی پرداختند. ایشان در بررسی های خود از مدل بوژی دو محوره جهت بارگذاری خط استفاده کردند و برای ایجاد ناهمواری های سطح ریل و اندرکنش بین سطح چرخ و آن در مدل دو بعدی خود از الگوریتم لاگرانژ استفاده نمودند. همچنین آنها مدل سه بعدی را به منظور مقایسه نتایج با حالت دو بعدی بررسی کردند. نتایج مطالعات آنها نشان می دهد پاسخ های دینامیکی شدیداً نسبت به ناهمواری و خرابی های سطح ریل و سرعت حرکت قطار حساسیت نشان می دهند. آنها همچنین مدلی با قابلیت پیش بینی پاسخ دینامیکی وسیله نقلیه و اجزای تشکیل دهنده خط ارائه دادند.

ریل و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۴) به مقایسه اثر دو نوع تراورس چوبی و بتنی و سختی های متفاوت بالشتک ریل، روی ارتعاش سازه خط آهن بالاستی پرداختند. آنها با بررسی رفتار انواع مختلف تراورس ها به دنبال یافتن راه حلی برای پایدار تر کردن خطوط بودند. نتایج مطالعه ای آنها نشان داد به دلیل شکل متفاوت و وزن بیشتر تراورس های بتنی ارتعاش سازه خط آهن کاهش پیدا می نماید. همچنین آنها یافتند بالشتک ریل نرم باعث انتشار ارتعاش در ریل می شود و هر چه سختی بالشتک افزایش پیدا کند انتشار ارتعاش از ریل به تراورس و سایر لایه ها منتقل می شود.

ابوسعید و شاهین<sup>۳</sup> (۲۰۱۶) با مدلسازی شالوده خط آهن بالاستی به بررسی دینامیکی خط در سرعت بحرانی آن پرداختند. در این مطالعه یک مدل سه بعدی به روش المان محدود ایجاد گردید و برای شبیه سازی پاسخ های دینامیکی خطوط بالاستی، تحت عبور بار متحرک قطار قرار گرفت و سرعت بحرانی قطار در شرایط مختلف بررسی شد. نتایج مطالعات آنها نشان می دهد زمانی که سرعت قطار به ۷۵٪ سرعت بحرانی می رسد دامنه پاسخ های دینامیکی خط افزایش ناگهانی داشته و لذا ۷۵٪ سرعت

---

<sup>۱</sup> Nguyen Gia et al.

<sup>۲</sup> Real, J. et al.

<sup>۳</sup> Sayeed, M. A., & Shahin, M. A



بحرانی را می توان به عنوان سرعت طراحی خطوط بالاستی در نظر گرفت. همچنین سختی بستر خاکی و ضخامت آن روی دینامیک و سرعت بحرانی خط شدیداً اثر گذار است و با افزایش سختی و ضخامت بستر خاکی پاسخ دینامیکی خط کاهش پیدا می کند. از طرفی با افزایش سختی بستر خاکی، سرعت بحرانی افزایش یافته، در حالی که با افزایش ضخامت بستر سرعت بحرانی روندی نزولی دارد. تحقیقات آنها همچنین نشان می دهد در سرعت بحرانی فرکانس عبور قطار با فرکانس طبیعی خط یکسان می شود.

#### • پیشینه مطالعات مربوط به مدلسازی دینامیکی خطوط بتنی

استین برگن و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۷) به ارزیابی پارامترهای سیستم های خط بتنی با رویکرد دینامیکی پرداختند. آنها در این پژوهش راهکارهای مهندسی ارائه شده جهت دستیابی به سختی قائم مورد انتظار خط را مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه تیر روی بستر نیمه بی نهایت<sup>۲</sup> تحت بارگذاری متحرک بررسی گردید و برای مقابله با اثرات فرسایشی ارتعاش در سازه خط آهن، سطح ارتعاشات خط به منظور حداقل کردن آن مطالعه شد. مطالعات آنها نشان داد که در فرکانس های بالا افزایش سختی خط برای کاهش ارتعاشات بسیار مناسب است در حالی که در فرکانس های پایین ارتقاء کیفیت بستر خاکی، راه حل مناسبتری است. به علاوه آنها دریافتند که متناسب با افزایش وزن خط، دامنه فرکانسی ارتعاشات افزایش پیدا می کند. همچنین عرض دال بتنی خط نقش مهمی در کنترل سطح ارتعاشات خط دارد.

زیائویان لی و بین ژانگ<sup>۳</sup> (۲۰۱۱) با مطالعه روی ویژگی های سازه سیستم خط بتنی چین<sup>۴</sup> و بررسی رفتار دینامیکی آن، مدل جدیدی از خط بتنی ارائه کردند. آنها پارامترهای سختی و میرایی

---

<sup>۱</sup> Steenbergen, M. J. M. M et al.

<sup>۲</sup> Half space

<sup>۳</sup> Lei, Xiaoyan, and Bin Zhang.

<sup>۴</sup> Chines Railway Track II (CRTSII)

بالشتک ریل، آسفالت و بستر زمین در مدلسازی را به عنوان معیارهای ارزیابی پاسخ دینامیکی خط مورد تحقیق قرار دادند. مطالعات آنها نشان می دهد فاکتور های موثر در کنترل پاسخ دینامیکی خط، سختی بالشتک ریل و بستر خاکی بوده در حالی که میرایی بالشتک ریل، آسفالت و بستر خاکی عموماً تأثیری در پاسخ ندارد. همچنین اثر سختی و میرایی بالشتک ریل در شتاب به وجود آمده در سازه غالب بوده و می توان از اثر میرایی و سختی آسفالت و بستر خاکی در شتاب ایجاد شده چشم پوشی کرد.

سنگ یانگ ژو و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۵) اثر خرابی های خط روی پاسخ دینامیکی سازه بتنی راه آهن سریع السیر را مورد مطالعه قرار دادند. در این مدلسازی ریل به صورت المان تیر با تکیه گاه مجزا مدلسازی شد. سپس پاسخ دینامیکی خط بر اثر عبور قطار متحرک مورد ارزیابی قرار گرفت. مطالعات آنها نشان داد شتاب قائم به وجود آمده در ریل به دلیل بار تحریک هارمونیک با طول موج های بلند، دارای فرکانس های پایین تر و نوسانات کمتر نسبت به تحریک های با طول موج کوتاه است. در میان اجزای تشکیل دهنده خط، ریل بیشترین جابجایی ارتعاشی (رسپتانس) را داشته و پس از آن دال خط قرار دارد. همچنین اثرگذاری بالشتک ریل در کاهش ارتعاشات خط بیشتر از اثر استفاده از آسفالت در روسازی بتنی است. همچنین با افزایش سرعت حرکت قطار جابجایی ارتعاشی قائم ریل و تنش های دینامیکی بین لایه ها به تناسب افزایش پیدا می کند.

لی شی و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۶) با انجام تحقیقات تئوری، اثرات خطوط بتنی را روی پاسخ دینامیکی قائم پل های خط آهن مورد بررسی قرار دادند. آنها با در نظر گرفتن دال خط بر روی بستر ارتجاعی ماسه ای، پاسخ دینامیکی خط را بر اثر عبور بار نقطه ای هارمونیک مطالعه کردند. نتایج مطالعات آنها نشان می دهد فرکانس تشدید خط روی بستر ماسه ای مهمترین اثر را روی پاسخ فرکانسی خط دارد.

---

<sup>۱</sup> Zhu, Shengyang, et al.

<sup>۲</sup> Li Shi et al.

## • پیشینه مطالعات با رویکرد مقایسه ای بین دینامیک خطوط بالاستی و بتنی

بلانکو لورنزو و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۰) به مدلسازی و مقایسه دینامیکی خط آهن بالاستی، خط بتنی رهدا، استدف و دال شناور<sup>۲</sup> پرداختند. آنها در این مطالعه، علاوه بر مدلسازی دینامیکی خط آهن، مدلسازی قطار را نیز انجام داده و در نهایت رفتار اجزای خط و نیروهای تماسی بین چرخ و ریل را مطالعه کردند. مطالعات آنها نشان می دهد شدت نوسانات ناشی از نیروهای تماسی بین چرخ و ریل در خطوط بالاستی و استدف نسبت به دو خط دیگر (رهدا و دال شناور) کمتر است. همچنین به دلیل سختی خمشی بیشتر بالشتک ریل و دال بتنی در خط استدف، نیروی منتقل شده به بالشتک در این خط نسبت با سایر خطوط مورد مطالعه کمتر است.

اویارزابال و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۱) به مطالعه ایجاد موج در ریل با تمرکز بر روی خط بتنی و بالاستی پرداختند. در این مطالعه با مدلسازی سه خط آهن متفاوت (خط بالاستی، خط بتنی استدف و خط بتنی آفتراو<sup>۴</sup>)، رشد موج در ریل مورد بررسی قرار گرفت. آنها نتایج رشد موج در ریل را برای سرعت های متفاوت، شعاع قوس های مختلف و چهار سیستم بوژی<sup>۵</sup> متفاوت بررسی کردند. خطوط مدل شده در این مطالعه به کمک روش اجزای محدود مورد بررسی شده و رسپتنس قائم و جانبی خط را بدست آوردند. نتایج مطالعات آنها نشان می دهد در شرایط استفاده از پارامترهای استاندارد در مدلسازی، رشد موج در ریل خط آهن آفتراو کمتر از سایر خطوط بوده و پس از آن خط بالاستی قرار می گیرد. آنها همچنین دریافتند در شعاع قوس های کوچکتر موج افتادگی سطح ریل افزایش می یابد.

---

<sup>۱</sup> Blanco-Lorenzo, Julio, et al.

<sup>۲</sup> Floating slab

<sup>۳</sup> Oyarzabal, O. et al.

<sup>۴</sup> AFTRAV

<sup>۵</sup> Bogie

ریل و همکارانش<sup>۱</sup> (۲۰۱۶) به بررسی رفتار استاتیکی و دینامیکی سه نوع متفاوت خط آهن در ناحیه تغییر خط پرداختند. آنها در مطالعه خود دو نوع ناحیه انتقال را در سه خط بالاستی، خط بتنی دارای لایه آسفالتی و خط بتنی سیستم ریل مدفون مورد مطالعه قرار دادند. به منظور محاسبه سختی خط در طول ناحیه انتقال ابتدا تحلیل استاتیکی انجام شد و سپس با تحلیل دینامیکی، پارامتر شتاب در حالات مختلف را بدست آوردند. نتایج مطالعات آنها نشان می دهد شیب تغییرات سختی در ناحیه انتقال بین خطوط بتنی و بالاستی را می توان با کاهش سختی لاستیک اطراف ریل مدفون یا استفاده از مصالح ارتجاعی در زیر لایه بتنی کاهش داد. همچنین آنها دریافتند کاهش فاصله تراورس ها در ناحیه انتقال کمک شایانی به کاهش اثرات دینامیکی مخرب در ناحیه انتقال می شود. نتیجه دیگر مطالعات آنها نشان می دهد که در ناحیه انتقال بین خط بتنی سیستم ریل مدفون و خط بتنی دارای لایه آسفالتی نه سختی لاستیک اطراف ریل و نه استفاده از مصالح ارتجاعی تاثیری در رفتار ناحیه انتقال ندارد و در این ناحیه باید با افزایش طول ناحیه انتقال اثرات مخرب دینامیکی را کاهش داد.

همانطور که مرور پژوهش های انجام شده در زمینه دینامیک خطوط راه آهن نشان می دهد تاکنون مطالعه جامعی در زمینه بررسی تاثیر پارامترهای ابعادی و مکانیکی اجزای تشکیل دهنده خطوط بتنی روی رفتار دینامیکی قائم آنها صورت نپذیرفته است. لذا با علم به این موضوع، در این مطالعه به بررسی تاثیر مدول الاستیسیته و ضخامت لایه ها، عرض لایه بستر و فاصله تراورس ها و پابندها در دو خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن پرداخته می شود.

---

<sup>۱</sup> Real, T., et al.

## **فصل سوم : تئوری ها و روش ها**

## ۳-۱ مقدمه

در این بخش روش های مدل سازی و تحلیل دینامیکی خط آهن در نرم افزار آباکوس تشریح می شود. ابتدا خلاصه مختصری از روش های مدل سازی که امروزه در مطالعات المان محدود انجام می شود، ارائه می گردد. خطوط بتنی مورد مطالعه، در نرم افزار ABAQUS/CAE با رابط کاربری گرافیکی<sup>۱</sup> مدل سازی می شوند.

## ۳-۲ مدل سازی در آباکوس

یکی از پرکاربردترین نرم افزارها در زمینه انجام آنالیز اجزای محدود، نرم افزار آباکوس است. این نرم افزار در سال ۱۹۷۸ توسط دیوید هابیت<sup>۲</sup>، پاول سورنسن<sup>۳</sup> و بنگت کارلسون<sup>۴</sup> ایجاد شد. ایده اصلی نرم افزار در پایان نامه دکترای دیوید هابیت در سال ۱۹۷۲ میلادی، تحت عنوان ”مکانیک محاسباتی بر پایه روش اجزای محدود“ در دانشگاه براون ارائه شد. در سال ۱۹۹۹ اولین نسخه گرافیکی این نرم افزار تحت عنوان ABAQUS/CAE به بازار عرضه شد. از آنجا که این نرم افزار بر اساس مسائل غیر خطی پایه ریزی شده، توانایی بالایی جهت شبیه سازی مسائل واقعی دارد. با توجه به اینکه آباکوس یک ابزار مدل سازی عمومی و گسترده است، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل های مکانیک جامدات و سازه (تنش – تغییر مکان) نمی شود. با استفاده از این نرم افزار می توان مسائل مختلفی را نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل دینامیکی حالت پایدار، تحلیل دینامیکی صریح، تحلیل حرارتی اجزای الکتریکی، اکوستیک، مکانیک خاک و پیزوالکتریک مورد مطالعه قرار داد.

محیط آباکوس به ماژول های متفاوت تقسیم می شود که هر ماژول یک بخش از فرآیند مدل سازی

---

<sup>۱</sup> Graphical User Interface (GUI)

<sup>۲</sup> David Habbitt

<sup>۳</sup> Paul Sorensen

<sup>۴</sup> Bengt karlsson

را در خود جای داده است (به عنوان مثال تعریف هندسه، تعریف خواص مواد، شبکه بندی<sup>۱</sup> هندسه). ابتدا رابط کاربری گرافیکی نرم افزار یک فایل ورودی با تمام اطلاعات مدل ایجاد کرده و آن را برای تجزیه و تحلیل در اختیار حلگر<sup>۲</sup> قرار می دهد. حلگر پس از انجام پردازش نتایج تحلیل را در قالب اشکال و منحنی ها ارائه می دهد.

### ۳-۲-۱ مازول ها<sup>۳</sup>

اکثر مدل های ایجاد شده در آباکوس از قطعات مختلف تشکیل شده اند. فرآیند مدلسازی معمولاً همیشه با تعریف و ساخت قطعات مدل در مازول Part آغاز می گردد. قطعات مختلف ممکن است دارای مصالح متفاوتی باشند که تعریف این مواد در مازول Property انجام می شود. دامنه وسیعی از ویژگی های مختلف مواد در آباکوس قابل تعریف است که از این دست می توان به تعریف خواص الاستیک، پلاستیک، حرارتی، صوتی و ... مصالح اشاره کرد. سپس با استفاده از مازول Assembly می توان قطعات ساخته شده را با هم ترکیب کرده و در کنار یکدیگر قرار داد. ، نوع تحلیل ها را می توان در مازول Step تعریف نمود. در این بخش می توان تحلیل های متفاوتی را برای دستیابی به هدف مورد نظر ترکیب کرد. تا زمانی که برهم کنش بین قطعات مونتاژ شده در مازول Interaction تعریف نشود، قطعات مذکور نمی توانند با یکدیگر فعل و انفعال داشته باشند. به عنوان مثال از المان های رابط می توان برای شبیه سازی رفتار فنر و میراگر استفاده نمود. بارگذاری مدل و شرایط مرزی را می توان در مازول Load به مدلسازی اضافه کرد. کل مدل را می توان با استفاده از مازول Mesh، مش بندی نمود. لازم به ذکر است تکنیک های متفاوتی برای مش بندی مدل های مختلف در این مازول قرار داده شده است.

---

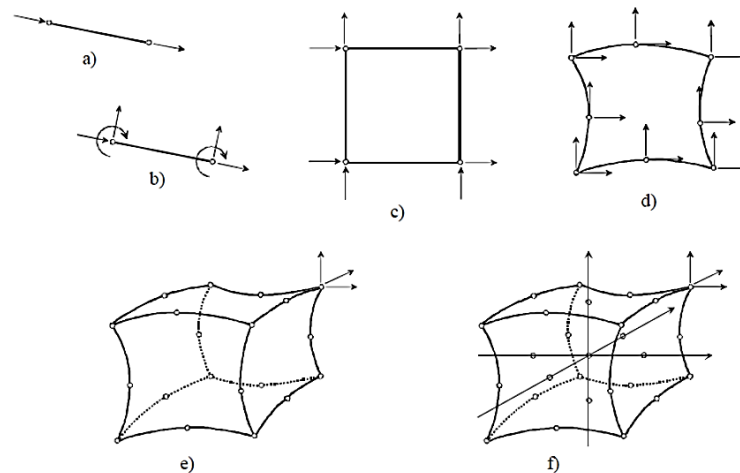
<sup>۱</sup> Mesh

<sup>۲</sup> Solver

<sup>۳</sup> Modulus

### ۳-۲-۲ المان ها

آباکوس دارای مجموعه وسیعی از المان ها است تا ابزارهایی قدرتمند برای حل مسائل مختلف در اختیار کاربر قرار دهد. تمام المان های موجود در نرم افزار آباکوس، بسته به اینکه مدلسازی در چه فضایی انجام شود، به دسته بندی های مختلف تقسیم شده اند. اشکال المان های موجود در آباکوس به صورت المان های تیر، المان های پوسته<sup>۱</sup> و المان های یکپارچه و سه بعدی هشت گره ای تفکیک شده و فضای مدلسازی در حالات سه بعدی، دو بعدی و محوری تقسیم بندی می شوند. در شکل ۱-۳ مثال هایی از انواع مختلف المان در آباکوس نشان داده شده است.



شکل ۱-۳ : مثال هایی از انواع مختلف المان های محدود (گره ها و درجات آزادی به ترتیب با دایره های کوچک و پیکان نمایش داده شده اند). (a) المان خرپا خطی دو گره ای (فقط برای بارهای محوری) (b) المان تیر برای بارگذاری های محوری، پیچشی و خمشی (c) المان دو بعدی چهار گره ای (d) المان دو بعدی ۸ گره ای (e) المان سه بعدی ۲۰ گره ای و (f) المان سه بعدی ۲۷ گره ای

### ۳-۲-۲-۱ المان تیر

المان تیر در مدلسازی ریل و تراورس ها مورد استفاده قرار گرفته است. المان تیر با فرض تک بعدی بودن مسئله استفاده می شود. متغیر دارای اولویت در این المان طول تیر است. برای اینکه بتوان

<sup>۱</sup> Shell element



در مدل‌سازی، المانی را به صورت تیر در نظر گرفت لازم است نسبت بعد طول تیر به ابعاد سطح مقطع آن بزرگ باشد. دو تئوری متفاوت در مدل‌سازی المان تیر، تئوری تیر اولر-برنولی و تئوری تیر رایلی-تیموشنکو بوده که در بخش‌های قبل مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

در تئوری تیر اولر-برنولی فرض بر این است که صفحه مقطع عرضی تیر همواره پس از تغییر شکل‌های خمشی بر محور تیر عمود بوده و نیز پیچیدگی در آن رخ نمی‌دهد. تمام المان‌های خطی تیر در آباکوس بر فرضیات این تئوری استوارند. تئوری تیر تیموشنکو به المان اجازه می‌دهد تا کرنش برشی داشته باشد و در نتیجه سطح مقطع تیر می‌تواند عمود بر محور تیر باقی نمانده و در آن تغییر شکل رخ دهد. این تئوری عموماً در بررسی رفتار تیرهای ضخیم کاربرد دارد (راهنمای آباکوس<sup>۱</sup> ۶,۱۴,۱).

### ۳-۲-۲ المان سه بعدی هشت گره ای (توپر)

المان‌های سه بعدی هشت گره ای به صورت دو بعدی و سه بعدی در آباکوس استفاده می‌شوند. المان توپر دو بعدی در بررسی صفحات و مسائل متقارن کاربرد دارد. در فضای سه بعدی عموماً از المان‌های ۶ وجهی ایزوپارامتریک<sup>۲</sup> استفاده می‌شود ولی در برخی مسائل پیچیده مسئله ممکن از المان‌های چهار وجهی نیز استفاده گردد. استفاده از المان‌های سه وجهی معمولاً در قطعات با هندسه نامناسب (غیر مکعبی) پیشنهاد می‌گردد. آباکوس هر دو المان فوق‌الذکر را در زمره المان‌های سه بعدی هشت گره ای قرار می‌دهد. (راهنمای آباکوس<sup>۱</sup> ۶,۱۴,۱). در این مطالعه در مدل‌سازی لایه‌های خطوط بتنی و تراورس‌ها از المان سه بعدی هشت گره ای استفاده شده است.

### ۳-۲-۳ المان صلب<sup>۳</sup>

در خطوط ریلی روی تکیه‌گاه‌های مجزا، از آنجا که تنها جرم بالاست مدنظر است از المان صلب

---

<sup>۱</sup> ABAQUS 6.14 Documentation

<sup>۲</sup> Isoparametric

<sup>۳</sup> Rigid element

استفاده می گردد. یک المان صلب، نشان دهنده قطعه ای است که سختی به مراتب بیشتری نسبت به سختی سایر قطعات داشته و تغییر شکل آن ناچیز است. مزیت استفاده از این المان ها نسبت به المان های تغییر شکل پذیر، افزایش راندمان محاسباتی نرم افزار است. در المان های صلب ویژگی های فیزیکی قطعه، ویژگی های حرکتی، و بارگذاری ها به طور کامل در یک نقطه مبنا از قطعه در نظر گرفته می شود. قطعات صلب دو نوع هستند: قطعات صلب مطلق<sup>۱</sup> و قطعات صلب تحلیلی<sup>۲</sup>. عموماً زمانی که از یک قطعه صلب صحبت می شود، اولویت با قطعات صلب تحلیلی است زیرا به لحاظ منطقی قطعات صلب مطلق وجود خارجی ندارند و در مطالعات تئوری استفاده می شوند (راهنمای آباکوس ۶,۱۴,۱).

### ۳-۲-۲ المان های فنر و میراگر

در این مطالعه، المان های فنر و میراگر در مدلسازی بالشتک ریل مابین ریل و تراورس استفاده شده است. المان فنر در آباکوس بین دو گره تعریف شده و جهت کنش آن همان جهتی است که دو گره را به یکدیگر وصل می کند. رفتار این فنر را می توان در همه المان های فنر آباکوس به صورت خطی یا غیر خطی در نظر گرفت (راهنمای آباکوس ۶,۱۴,۱).

### ۳-۳ انواع تحلیل

#### ۳-۳-۱ تحلیل مقدار ویژه خطی<sup>۳</sup> (تحلیل فرکانسی)

تحلیل مقدار ویژه خطی، برای محاسبه فرکانس های طبیعی و شکل مدهای ارتعاشی متناظر آن استفاده می شود. این تحلیل می تواند با دو الگوریتم تحلیلی لنکسوز<sup>۴</sup> و ساب اسپیس<sup>۵</sup> انجام شود. حلگر لنکسوز در مدل هایی که تعداد مدهای فرکانسی بیشتری مد نظر است سریعتر عمل می کند در حالی

---

<sup>۱</sup> discrete rigid part

<sup>۲</sup> analytical rigid part

<sup>۳</sup> Linear Eigenvalue Analysis

<sup>۴</sup> Lanczos

<sup>۵</sup> Subspace

که حلگر ساب اسپیس در سیستم های با ابعاد کوچک سریعتر است. در صورت استفاده از حلگر لنکسوز می توان بازه فرکانسی مورد نظر را مشخص کرد ولی در حلگر ساب اسپیس تنها می توان تحلیل را به مقدار بیشینه فرکانس محدود نمود (راهنمای آباکوس ۶,۱۴,۱).

### ۲-۳-۳ تحلیل دینامیکی حالت پایدار

یکی از روش های بررسی ویژگی های دینامیکی خط آهن، بارگذاری خط به صورت سینوسی است. در فرکانس های بالاتر از ۲۰۰ هرتز این بارگذاری می تواند به وسیله سیلندر های هیدرولیکی انجام شود. چنانچه لازم باشد پاسخ خط (به عنوان مثال رسپتنس خط) را در فرکانس های بالاتر مورد مطالعه قرار گیرد، باید با استفاده از بار ضربه ای (برای مثال ضربه چکش) خط را تحریک نمود (دالبرگ، ۲۰۰۳).

تحلیل دینامیکی حالت پایدار آباکوس، پاسخ سیستم را در فرکانس تحریک هارمونیک<sup>۱</sup> بار به صورت دامنه و فاز در اختیار کاربر قرار می دهد. معمولاً در چنین تحلیل هایی روند کار بدین شکل است که پاسخ ها پس از اعمال بار با فرکانس های مختلف ثبت می شود. در یک تحلیل حالت پایدار مستقیم، پاسخ هارمونیک با استفاده از ماتریس های جرم، میرایی و سختی به صورت عباراتی به ازای درجات آزادی مدل محاسبه می گردد (راهنمای آباکوس ۶,۱۴,۱).

در این پایان نامه برای دستیابی به تابع رسپتنس خطوط با استفاده از تحلیل دینامیکی حالت پایدار، بار هارمونیک واحد در وسط خط و بین دو تراورس اعمال شده است و کل خط را در بازه فرکانسی ۱ تا ۱۵ هرتز تحریک می نماید.

---

<sup>۱</sup> Harmonic excitation frequency

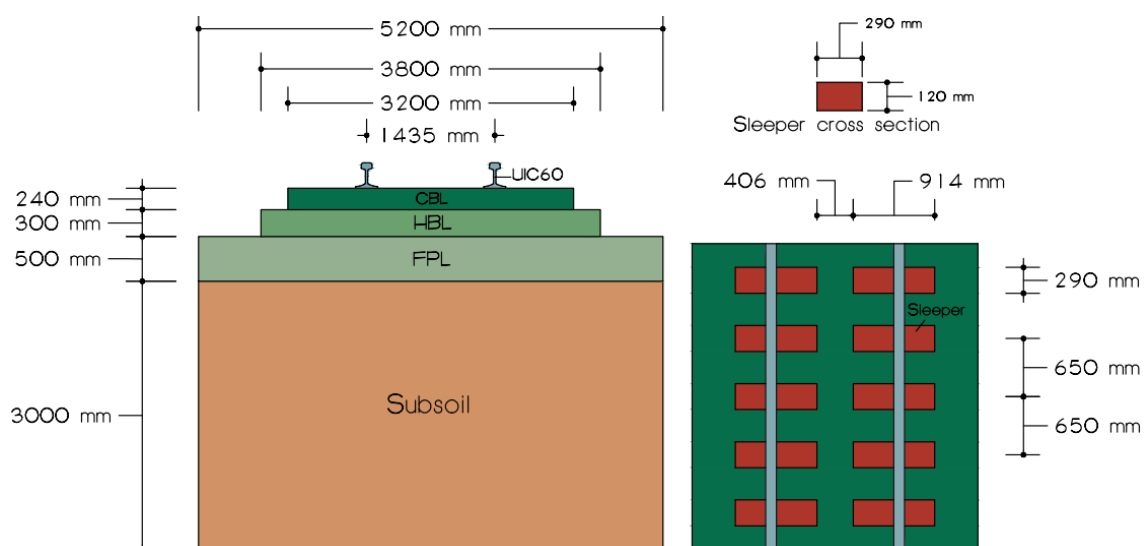
### ۳-۴ مدلسازی خطوط

در این مطالعه، دو سیستم خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ و شینکاسن به صورت سه بعدی در آباکوس مدل‌سازی شده‌اند. طول فرض شده برای هر دو نمونه ۳۰ متر است. مطالعات انجام شده روی رفتار خطوط راه آهن نشان می‌دهد در طول ۳۰ متر اثر تغییر شکل‌ها و نیروها در دو طرف مدل ناچیز بوده و می‌توان مدل را به صورت بی‌نهایت فرض نمود (هوآن فنگ، ۲۰۱۱). تمام ابعاد و خواص مصالحی که در مدل‌سازی استفاده شده تا حد امکان با مقادیر واقعی در طراحی این سیستم‌ها مطابقت دارد. این دو سیستم از متداول‌ترین سیستم‌های روسازی بتنی در جهان بوده که دلیل اصلی بررسی آنها در این مطالعه نیز همین امر است.

#### ۳-۴-۱ مدل ره‌دا ۲۰۰۰

##### ۳-۴-۱-۱ هندسه مدل

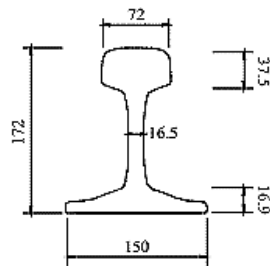
هندسه خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ و مقطع عرضی تراورس به همراه جزئیات ابعادی مدل در شکل ۳-۲ نشان داده شده است و با مشخصات طرح خط ره‌دا ۲۰۰۰ معمول همخوانی دارد.



شکل ۳-۲: هندسه و ابعاد خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ (ریل وان)

ریل استفاده شده در این مدل UIC60 است که عموماً در خطوط راه آهن سریع‌السیر از آن

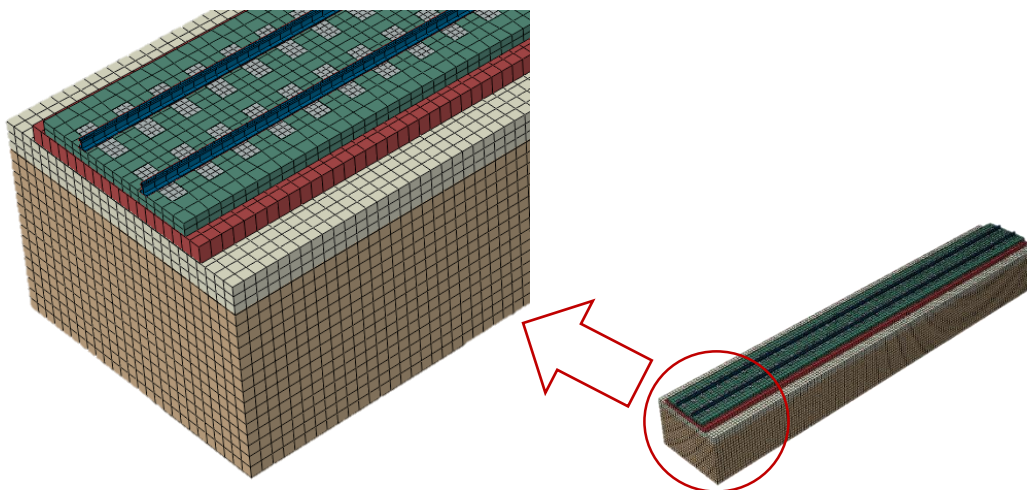
استفاده می شود. مقطع ریل UIC60 در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳: مقطع ریل UIC60 در واحد میلیمتر (مشخصات فنی و عمومی روسازی راه آهن، نشریه شماره ۳۰۱)

در شکل ۳-۴ مدل سه بعدی خط رهدا ۲۰۰۰ در آباکوس به صورت مش بندی شده نشان داده

شده است.



شکل ۳-۴: مدل سه بعدی خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ در آباکوس

### ۲-۱-۴-۳ خواص مصالح

خواص مصالحی که در مدلسازی خط مورد نیاز است به صورت کامل در جدول ۳-۱ آورده شده

است.

جدول ۳-۱: خواص مکانیکی اجزای تشکیل دهنده خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ (جورج میکاس)

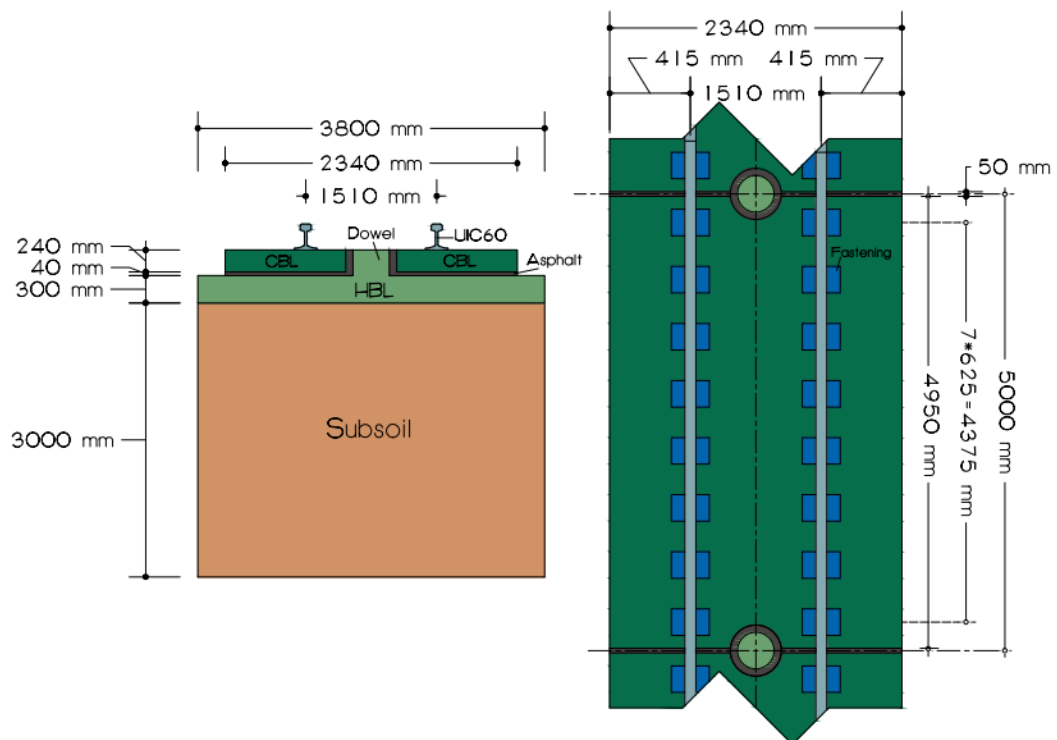
| نام                      | جرم مخصوص<br>$\gamma (kg/m^3)$ | مدول الاستیسیته<br>$E (GPa)$ | ضریب پواسون<br>$\nu$ |
|--------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------|
| ریل                      | ۷۸۵۰                           | ۲۰۷                          | ۰/۲۸                 |
| تراورس                   | ۲۴۰۰                           | ۷۰                           | ۰/۲                  |
| لایه بتنی (CBL)          | ۲۴۰۰                           | ۳۴                           | ۰/۲                  |
| لایه هیدرولیکی (HBL)     | ۲۴۰۰                           | ۵                            | ۰/۲                  |
| لایه محافظ یخ زدگی (FPL) | ۲۴۰۰                           | ۰/۱۲                         | ۰/۲                  |
| بستر خاکی                | ۲۰۰۰                           | ۰/۰۱                         | ۰/۴                  |
|                          |                                |                              |                      |
|                          | سختی $(MN/m)$                  | میرایی $(kNs/m)$             |                      |
| بالشتک ریل               | ۲۳۹                            | ۵۰۰                          |                      |

### ۳-۴-۲ مدل شینکانسن

#### ۳-۴-۲-۱ هندسه مدل

هندسه مدل شینکانسن به صورت کامل در شکل ۳-۵ نشان داده شده است که با مشخصات

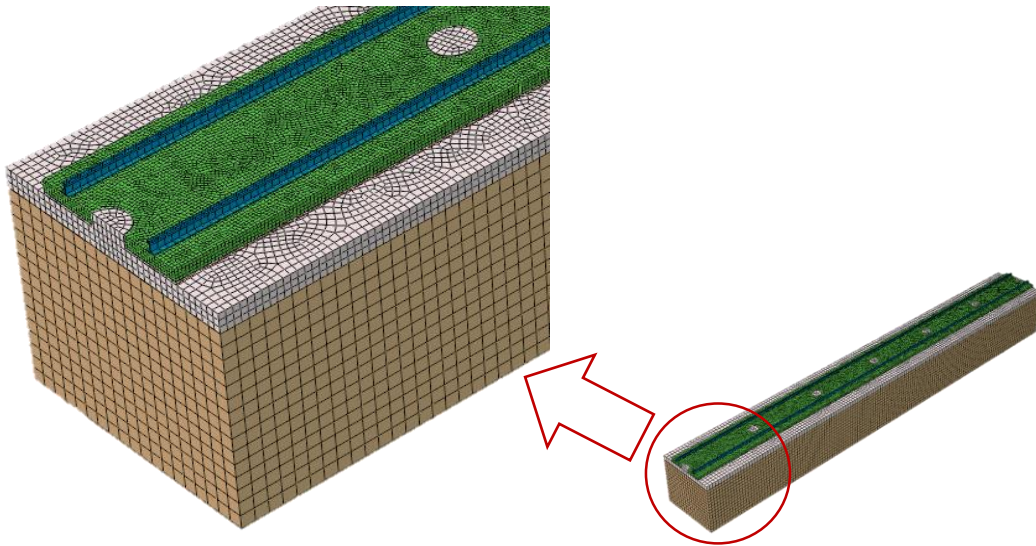
طرح خط شینکانسن معمول همخوانی دارد.



شکل ۳-۵: ابعاد خط بتنی شینکانسن (اسولد، ۲۰۰۳)

در این مدل همانند مدل رهدا ۲۰۰۰، ریل استفاده شده UIC60 است که مقطع آن در شکل ۳-۳ مشاهده گردید. همانگونه که در شکل ۳-۵ مشاهده می شود، در سیستم خط بتنی شینکانسن به دلیل پیش ساخته بودن دال ها دیگر از تراورس استفاده نشده و ریل به وسیله پابند مستقیما بر روی دال نصب می شود. لذا در مدلسازی در موقعیت های قرارگیری پابندها اقدام به استفاده از فنر و میراگر جهت شبیه سازی بالشتک ریل در روی دال بتنی شده است.

در شکل ۳-۶ مدل سه بعدی خط در آباکوس به صورت مش بندی شده نشان داده شده است.



شکل ۳-۶: مدل سه بعدی خط بتنی شینکانسن در آباکوس

### ۲-۲-۴-۳ خواص مصالح

خواص مصالحی که در مدلسازی خط شینکانسن مورد نیاز است به صورت کامل در جدول ۲-۳ آورده شده است.

جدول ۳-۲: خواص مکانیکی اجزای تشکیل دهنده خط شینکانسن (جورج میکاس)

| نام                  | جرم مخصوص<br>$\gamma, (kg/m^3)$ | مدول الاستیسیته<br>$E, (GPa)$ | ضریب پواسون<br>$\nu$ |
|----------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| ریل                  | ۷۸۵۰                            | ۲۰۷                           | ۰/۲۸                 |
| لایه بتنی (CBL)      | ۲۴۰۰                            | ۳۴                            | ۰/۲                  |
| آسفالت               | ۲۳۰۰                            | ۰/۲                           | ۰/۳                  |
| لایه هیدرولیکی (HBL) | ۲۴۰۰                            | ۵                             | ۰/۲                  |
| بستر خاکی            | ۲۰۰۰                            | ۰/۰۱                          | ۰/۴                  |
| سختی $(MN/m)$        |                                 | میرایی $(kNs/m)$              |                      |
| بالمشک ریل           |                                 | ۲۳۹                           |                      |
|                      |                                 | ۵۰۰                           |                      |



## **فصل چهارم : نتایج مدل سازی**

## ۴-۱ مقدمه

در این بخش نتایج مدلسازی های المان محدود آباکوس برای دو خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن به صورت مجزا ارائه می شود. هدف از مدلسازی، مطالعه رفتار دینامیکی قائم اجزای تشکیل دهنده خط آهن بتنی است.

در مدلسازی های این پایان نامه دو تحلیل دینامیکی انجام شده؛ تحلیل فرکانسی و تحلیل دینامیکی حالت پایدار. مثال هایی از مدهای ارتعاشی قائم خط در بخش ۴-۲-۲ نشان داده شده است. برای دستیابی به منحنی های رسپتنس در تحلیل دینامیکی حالت پایدار، بار هارمونیک واحد در وسط خط و بین دو تراورس اعمال شده است. این نوع بارگذاری در مطالعات به عنوان معیاری جهت بررسی رفتار دینامیکی سازه ها معرفی شده است.

قبل از فرآیند مدلسازی خط آهن، یک مدل دو درجه آزادی جرم و فنر تحت تحلیل دینامیکی حالت پایدار در آباکوس مورد بررسی قرار گرفت و اعتبار نتایج خروجی نرم افزار با نتایج مثال کتاب اصول دینامیک سازه های روی کریگ<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) بررسی گردید. همچنین به منظور سنجش درستی مدلسازی خط بتنی و شرایط آن در آباکوس به خصوص شرایط مرزی مدل، شکل مدهای ارتعاشی در اولین مدلسازی خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ با شکل مدهای ارتعاشی خط بالاستی در مطالعات هوآن فنگ (۲۰۱۱) مقایسه شده است.

## ۴-۲ اعتبار سنجی مدلسازی

### ۴-۲-۱ مدل جرم و فنر

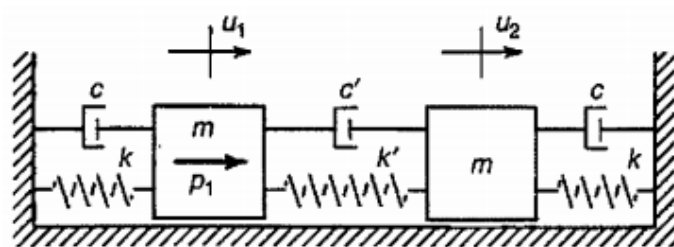
به دلیل پیچیده بودن الگوریتم های تحلیل دینامیکی در آباکوس و جلوگیری از بروز اشتباه و اطمینان از اعتبار نتایج خروجی، ابتدا مدلی با دو درجه آزادی متشکل از جرم و فنر در نرم افزار مدلسازی

---

<sup>۱</sup> Craig, R.R.

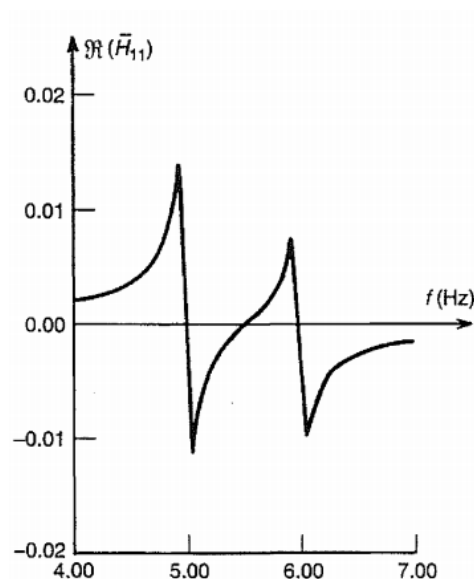
شد. فرکانس های طبیعی و تابع رسپتانس این مدل در کتاب اصول دینامیکی سازه های روی کریگ آورده شده است بنابراین نتایج خروجی نرم افزار به بهترین شکل ممکن اعتبار سنجی می شود.

در این مدل دو درجه آزادی که در شکل ۴-۱ نشان داده شده،  $p_1(t) = P_1 \cos(\omega t)$ ،  $k = 987$ ،  $k' = 217$ ،  $m = 1$ ،  $c = 0.6284$ ،  $c' = 0.0628$  است. ابتدا سازه تحلیل فرکانسی شده و سپس تابع پاسخ فرکانسی آن ترسیم می گردد و در نهایت مقایسه ای بین نتایج انجام می شود.



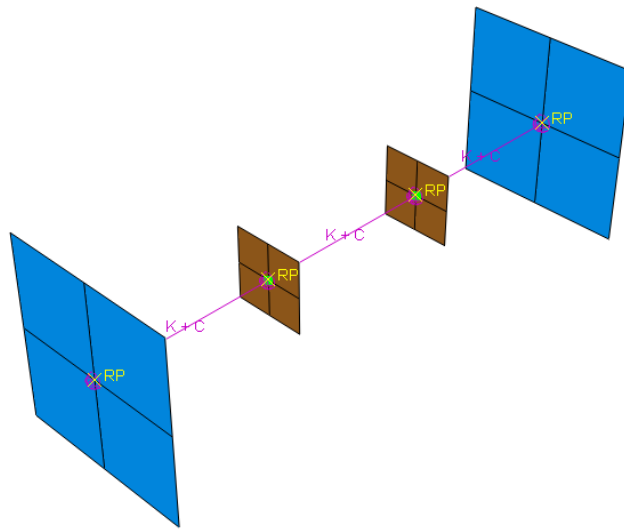
شکل ۴-۱: سیستم دو درجه آزادی جرم و فنر با تحریک هارمونیک (اصول دینامیک سازه ها، روی کریگ، ۲۰۰۶)

فرکانس های طبیعی این سازه به ترتیب  $f_1 = 5 \text{ Hz}$  و  $f_2 = 6 \text{ Hz}$  بوده و تابع پاسخ آن در شکل ۴-۲ آورده شده است.



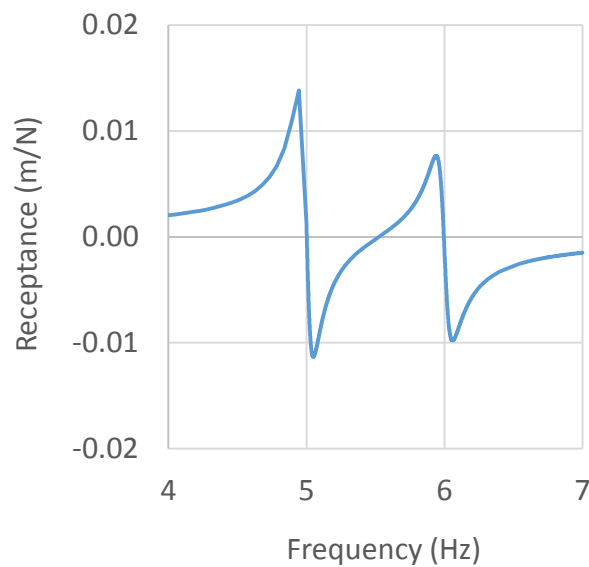
شکل ۴-۲: قسمت حقیقی تابع پاسخ فرکانسی سیستم دو درجه آزادی (اصول دینامیک سازه ها، روی کریگ، ۲۰۰۶)

در شکل ۳-۴، سیستم دو درجه آزادی مدل شده در آباکوس نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: مدل دو درجه آزادی در آباکوس

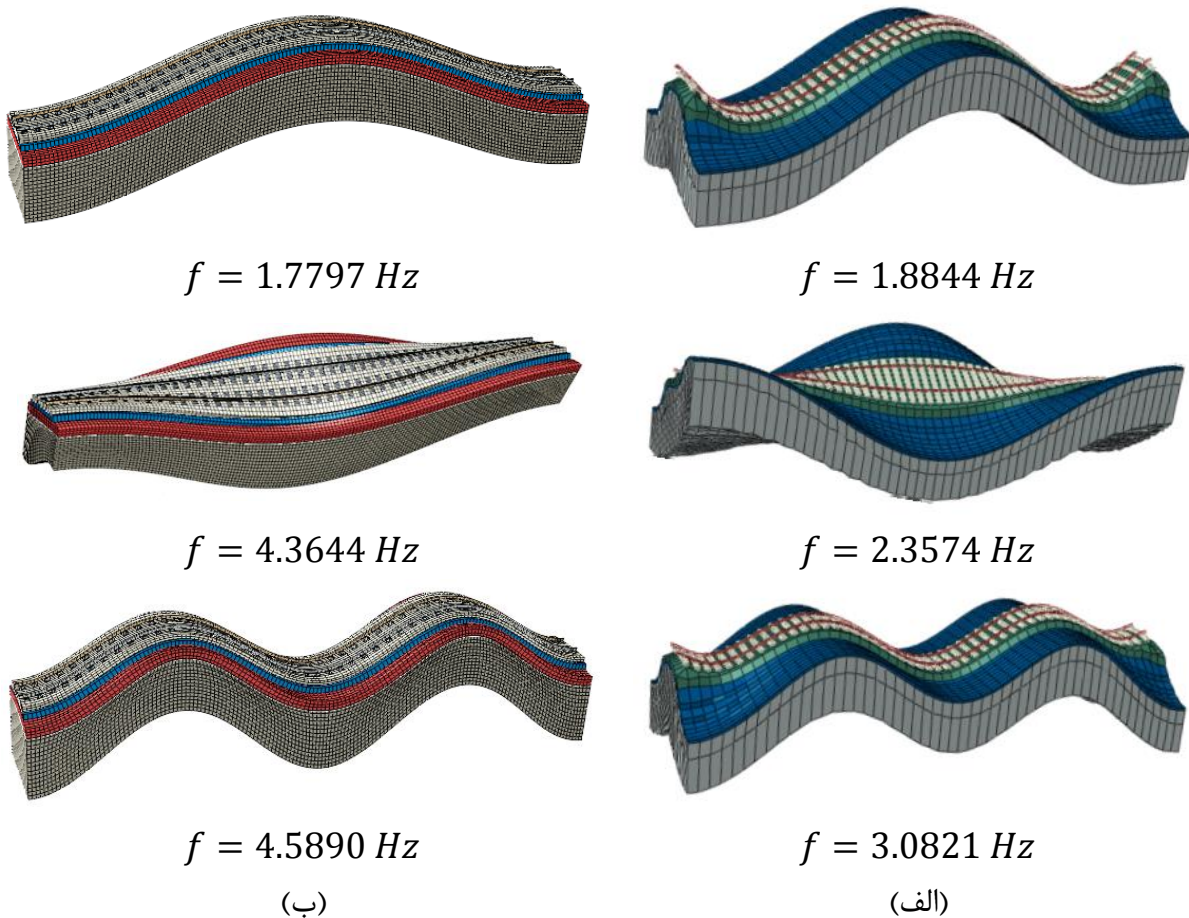
منحنی رسپتانس سیستم دو درجه آزادی مدل شده در آباکوس در شکل ۴-۴ مشاهده می شود. همانطور که در نمودار مشخص است فرکانس های طبیعی سازه به ترتیب ۵ هرتز و ۶ هرتز بدست آمده است. همچنین با مقایسه دو منحنی شکل ۴-۴ و شکل ۳-۴ می توان دریافت خروجی های نرم افزار قابل اعتماد بوده و فرآیند مدلسازی و یافتن پاسخ فرکانسی صحیح انجام شده است.



شکل ۴-۴: قسمت حقیقی منحنی رسپتانس سیستم دو درجه آزادی بدست آمده از خروجی آباکوس

## ۲-۲-۴ شکل مدهای ارتعاشی خط بتنی

در این بخش به منظور اطمینان از اعتبار پاسخ های فرکانسی مدل سه بعدی خطوط بتنی، شکل مدهای ارتعاشی و فرکانس های طبیعی خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ (حاصل نتایج مطالعات نگارنده) با نتایج مدل سازی خطوط بالاستی مطالعات هوآن فنگ (۲۰۱۱) مقایسه می گردد. در این بررسی به دلیل نبود مرجعی جامع در زمینه مطالعه رفتار دینامیکی خطوط بتنی، مقایسه با مدل خطوط بالاستی صورت می پذیرد. همچنین به منظور بررسی اعتبار مدل سازی خطوط، ابتدا مدل بالاستی مذکور در مطالعه هوآن فنگ با همان شرایط در آباکوس مدل سازی شد که فرکانس های طبیعی و شکل مدهای ارتعاشی بدست آمده به دلیل خارج بودن بحث مدل سازی خطوط بالاستی از این بخش در پیوست الف آورده شده است. در شکل ۴-۵ تعدادی از مدهای ارتعاشی خط بالاستی و خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ مشاهده می شود.



شکل ۴-۵: شکل مدهای ارتعاشی خروجی آباکوس الف) نتایج مطالعه هوآن فنگ، ب) نتایج مدل رهدا ۲۰۰۰

باید توجه داشت به دلیل اینکه شرایط و خواص مصالح در خطوط بتنی با خطوط بالاستی یکسان نیست انتظار نمی رود فرکانس های طبیعی دو مدل یکسان باشند و از این جهت منطقی بودن اعداد حائز اهمیت است؛ اما شکل مدهای ارتعاشی با توجه به یکسان بودن ماهیت کلی خطوط راه آهن، باید همخوانی داشته باشد. مقایسه شکل ۴-۵ (الف) و ۴-۵ (ب) نشان می دهد؛ شکل مدهای ارتعاشی بدست آمده در این پایان نامه مشابه شکل مدهای ارتعاشی خط بالاستی مطالعه هوآن فنگ است و تفاوت های اندک در آنها به دلیل تفاوت در ساختار دو سیستم است. همچنین فرکانس های طبیعی خط بتنی مدل شده از نظر مقدار و فواصل با یکدیگر منطقی هستند. لذا می توان گفت نتایج بدست آمده در این پایان نامه از اعتبار لازم برخوردار است.

#### ۴-۳ مدل سازی خطوط بتنی

در این بخش با انتخاب دو سیستم خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن، تاثیر پارامترهای ابعادی و مکانیکی اجزای تشکیل دهنده خط، روی پاسخ دینامیکی قائم سازه بررسی می شود. همچنین سعی شده تغییرات پارامترها منطقی بوده و امکان اجرایی شدن در عملیات ساخت خطوط را داشته باشد. برای این منظور ابتدا در هر دو سیستم، مدل عمومی خط، تحلیل فرکانسی و تحلیل دینامیکی حالت پایدار شده و منحنی رسپتانس این مدل به عنوان منحنی مبنای بررسی ها انتخاب می شود. سپس در هر دو سیستم خط بتنی اشاره شده، با ایجاد تغییرات در مدول های الاستیسیته، ضخامت لایه ها، عرض لایه بستر خاکی و فاصله و مدول الاستیسیته تراورس ها و پابندها منحنی رسپتانس خط مجددا ترسیم می گردد. حال با مقایسه این نمودارها با حالت مبنای می توان اثر تغییرات لایه ها و اجزای تشکیل دهنده خط را در رفتار دینامیکی قائم آن مورد تحلیل و بررسی قرار داد.

#### ۴-۳-۱ خط بتنی رهدا ۲۰۰۰

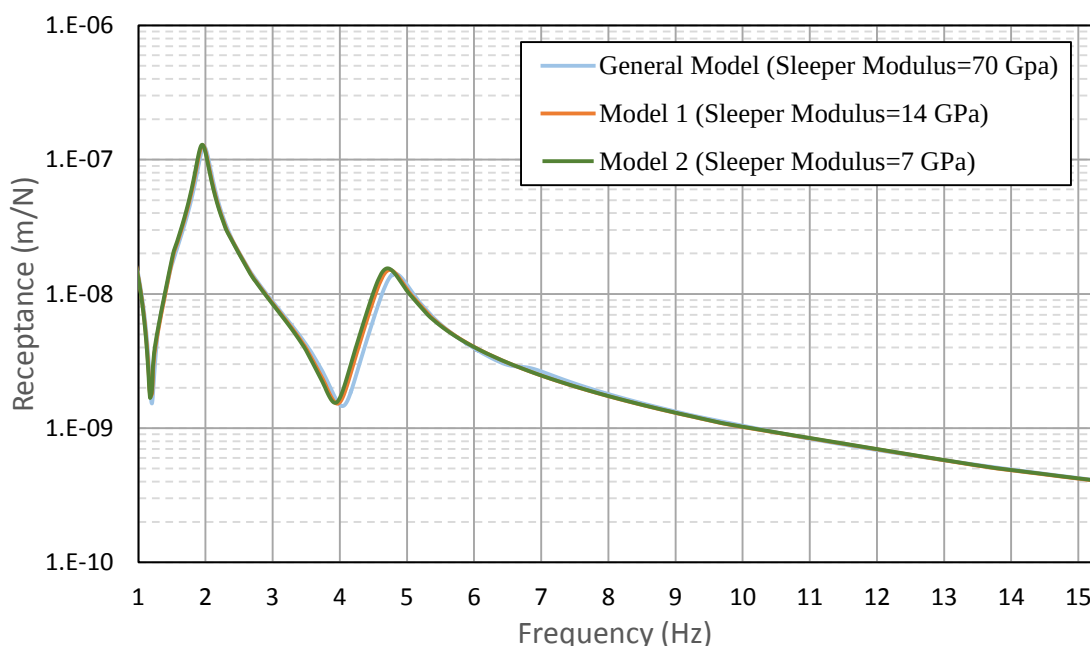
هندس و خواص مکانیکی لایه های مدل رهدا ۲۰۰۰ مطابق آنچه در بخش ۳-۴-۱ گفته شده است در آباکوس مدل سازی گردید. به منظور مطالعه اثرات دینامیکی قائم اجزا، ۲۰ مدل سازی در این

بخش انجام شده است که عبارتند از: یک مدل عمومی خط، دو مدل برای تراورس ها، چهار مدل برای لایه بتنی، چهار مدل برای لایه هیدرولیکی، چهار مدل برای لایه محافظت از یخ زدگی، و شش مدل برای لایه بستر. در مدلسازی ها، ریل و تراورس به صورت المان تیر در نظر گرفته شده و در سایر اجزا و لایه ها از المان سه بعدی هشت گره ای استفاده شده است. اتصال ریل به تراورس با استفاده از المان های فنر و میراگر بوده است. لایه های خط بتنی نیز با پارتیشن بندی کل خط و تخصیص مصالح متفاوت شکل گرفته اند. در مرزهای بی نهایت، جابجایی در جهت عمود بر سطح (نرمال) محدود شده است. در لایه ها با حرکت از پایین به سمت بالا، کیفیت مش بندی افزایش می یابد.

در ادامه نتایج مدلسازی ها به تفکیک هر یک از اجزای خط آورده شده است.

#### ۴-۳-۱-۱ اثر مدول تراورس

نتایج رسیپتنس برای سه حالت مختلف مدول الاستیسیته تراورس در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، هر سه منحنی مدل عمومی، مدل ۱ و مدل ۲ در بیشتر نواحی با هم همپوشانی دارند.

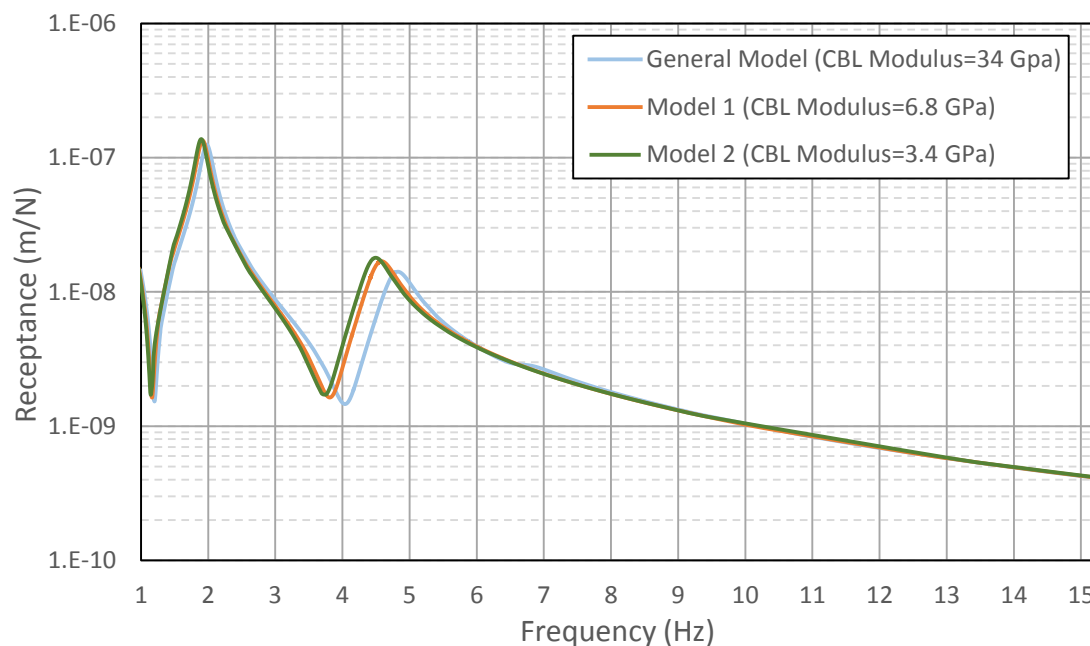


شکل ۴-۶: رسیپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات مدول تراورس

مطابق شکل ۴-۶ تنها در بازه فرکانسی ۴ تا ۵ هرتز تفاوت ۳ منحنی به مقدار خیلی کم مشهود است. تراورس در مجموعه خط بتنی نسبت به سایر اجزای تشکیل دهنده خط از نظر ابعاد المانی کوچک است لذا تاثیر کاهش سختی این المان کوچک، در سختی معادل خط کم است. تغییر در سختی تراورس هرچند تاثیر کمی دارد ولی در نهایت منجر به کم شدن سختی کل خط می شود که فرکانس های طبیعی سیستم را کاهش داده و باعث جابجا شدن اندک منحنی به سمت چپ می گردد.

#### ۴-۳-۱-۲ اثر مدول لایه بتنی

لایه بتنی در ساختار خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ مهمترین نقش سازه ای را بازی می کند بنابراین بررسی رفتار دینامیکی قائم آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. این لایه اولین جزء سازه خط است که ارتعاشات عبور قطار به آن منتقل می شود. سه مدل با مدول الاستیسیته متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. مدول ها از ۳۴ GPa تا ۳/۴ GPa متغیر هستند که نشان دهنده کیفیت اجرای لایه بتنی از خوب به بد است. نتایج تحلیلی برای این مدل ها در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.



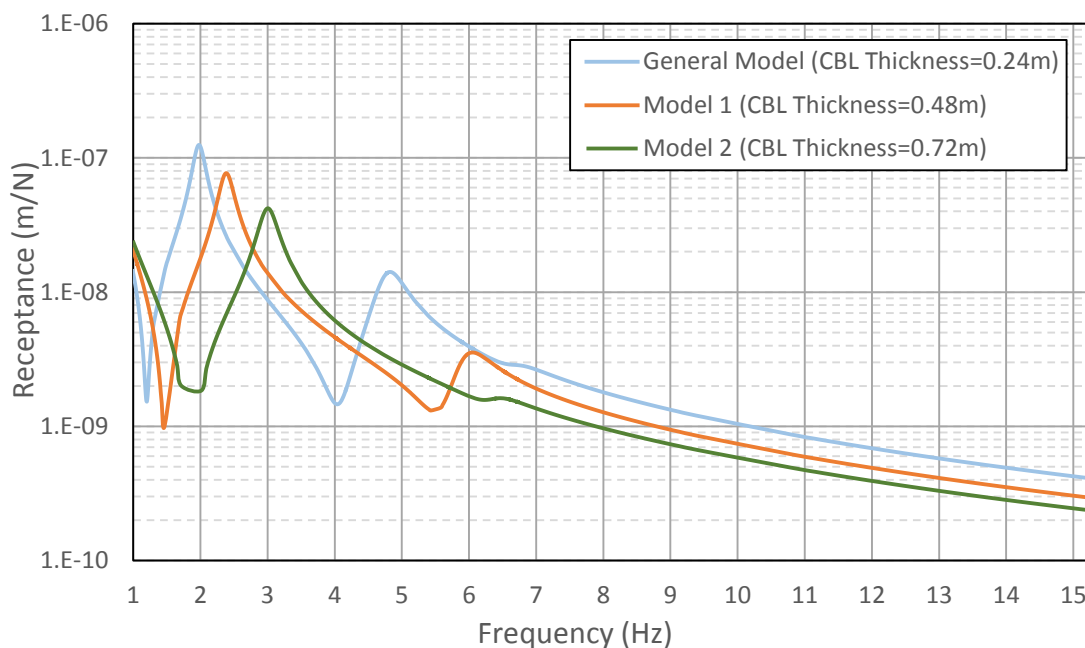
شکل ۴-۷: رسپتانس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات مدول لایه بتنی



همانطور که در شکل ۴-۷ مشخص است، تغییر مدول الاستیسیته لایه بتنی تاثیر چندانی روی فرکانس تشدید اول ندارد ولی در فرکانس تشدید دوم تغییرات محسوس است. کاهش مدول الاستیسیته لایه بتنی باعث کاهش سختی معادل خط شده که منجر به انتقال منحنی به سمت چپ می شود. در این انتقال همزمان با کاهش فرکانس تشدید دوم، رسپتنس افزایش یافته است.

#### ۴-۳-۱-۳ اثر ضخامت لایه بتنی

در این قسمت نتایج تاثیر تغییر ضخامت لایه بتنی در رسپتنس خط نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۸، ضخامت لایه بتنی از ۲۴ سانتی متر تا ۷۲ سانتی متر تغییر می کند.

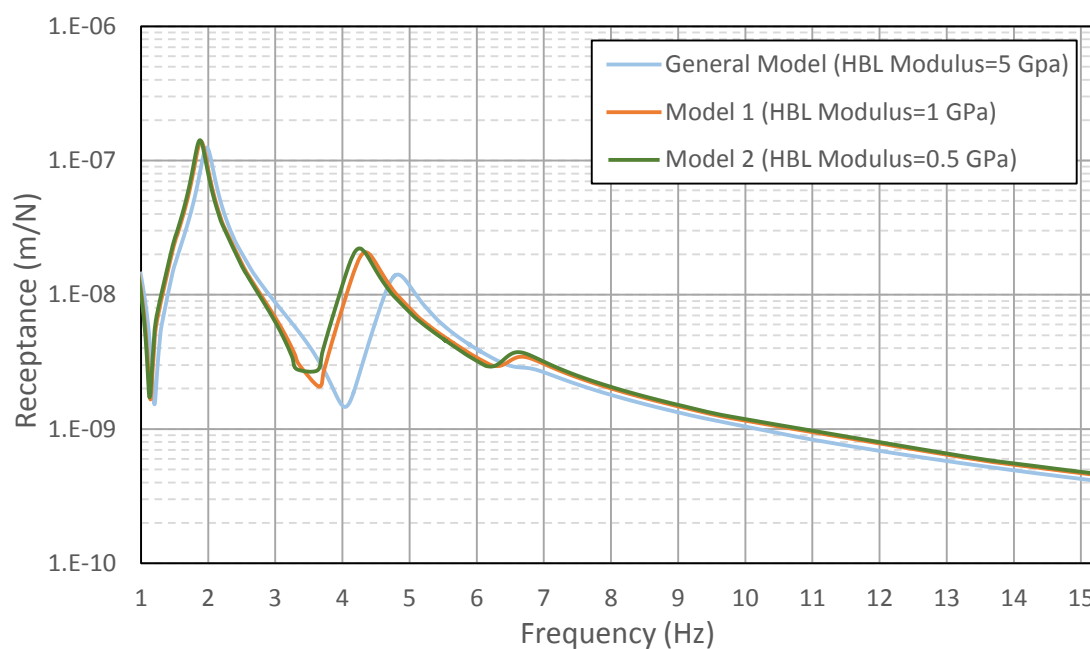


شکل ۴-۸: رسپتنس خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ با تغییرات ضخامت لایه بتنی

در این بررسی می توان دریافت چنانچه به هر دلیل در زمان اجرای خطوط، افزایش یا کاهش در ضخامت لایه بتنی به وجود آید چه تاثیری در دینامیک خط خواهد داشت؟ همانطور که در شکل ۴-۸ نشان داده شده، تغییر در ضخامت لایه بتنی در رسپتنس خط بسیار اثر گذار است و اثر این تغییرات در حوالی فرکانس تشدید دوم و میرا کردن پاسخ خط بیشتر است. افزایش ضخامت منجر به سخت تر شدن سازه خط شده که باعث افزایش فرکانس های طبیعی خط می گردد و کاهش پاسخ خط تا میرا شدن کامل آن را به همراه خواهد داشت.

#### ۴-۳-۱-۴ اثر مدول لایه هیدرولیکی

لایه هیدرولیکی در ساختار خط آهن بیشتر نقشی غیر سازه ای بازی می کند اما با توجه به اینکه جنس این لایه، بتنی است تغییر در مدول الاستیسیته آن در پاسخ فرکانسی خط اثر گذار است. همانطور که در شکل ۴-۹ نشان داده شده، در این بررسی مدول الاستیسیته لایه هیدرولیکی از ۵ GPa تا ۰/۵ GPa تغییر می نماید.

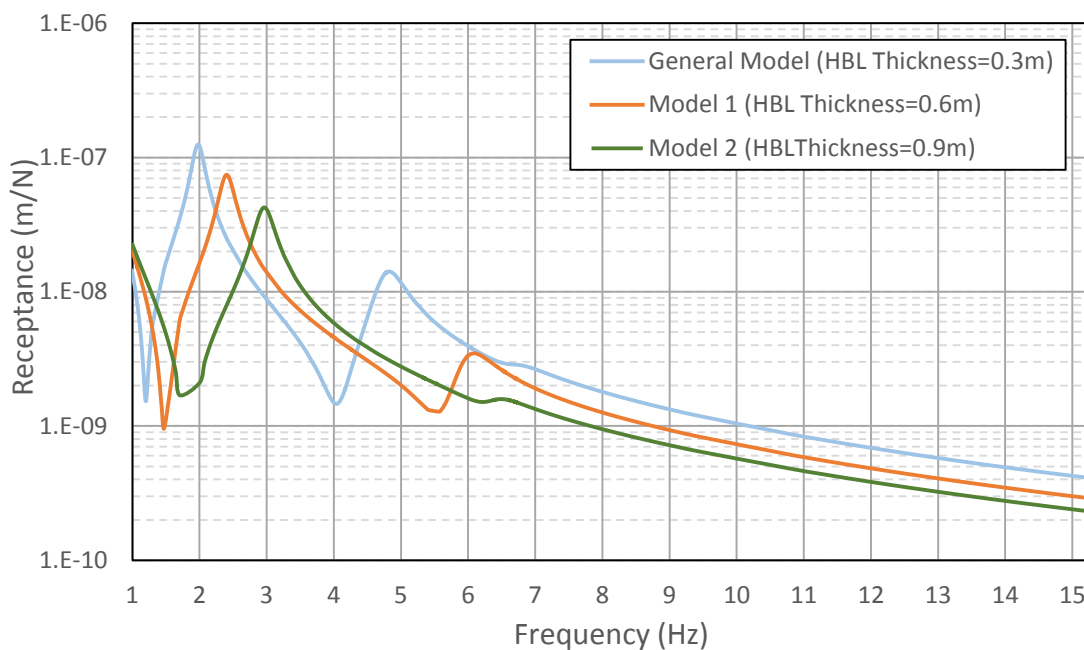


شکل ۴-۹: رسپتانس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات مدول لایه هیدرولیکی

با بررسی منحنی ها می توان دریافت تغییر مدول الاستیسیته لایه هیدرولیکی تاثیر اندکی در پاسخ و فرکانس تشدید اول دارد. در مورد تشدید دوم اما شرایط متفاوت بوده و تغییرات محسوس تر است. مطابق شکل کاهش مدول لایه هیدرولیکی باعث شده در حدود فرکانس ۶/۵ هرتز تشدید دیگری با دامنه پاسخ کمتر نسبت به سایر فرکانس های تشدید رخ دهد. کاهش مدول الاستیسیته به کاهش سختی لایه هیدرولیکی منجر شده و این کاهش سختی منجر به افزایش دامنه پاسخ گردیده است. به صورت بدیهی، کاهش مدول الاستیسیته به کم شدن فرکانس تشدید می انجامد.

#### ۵-۱-۳-۴ اثر ضخامت لایه هیدرولیکی

در شکل ۱۰-۴، تابع پاسخ رسپتانس با تغییر ضخامت لایه هیدرولیکی نشان داده شده است. تغییر ضخامت لایه هیدرولیکی تاثیر بسزایی در رفتار دینامیکی قائم بتنی دارد. در این بررسی ضخامت لایه هیدرولیکی از ۰/۳ متر تا ۰/۹ متر متغیر است.

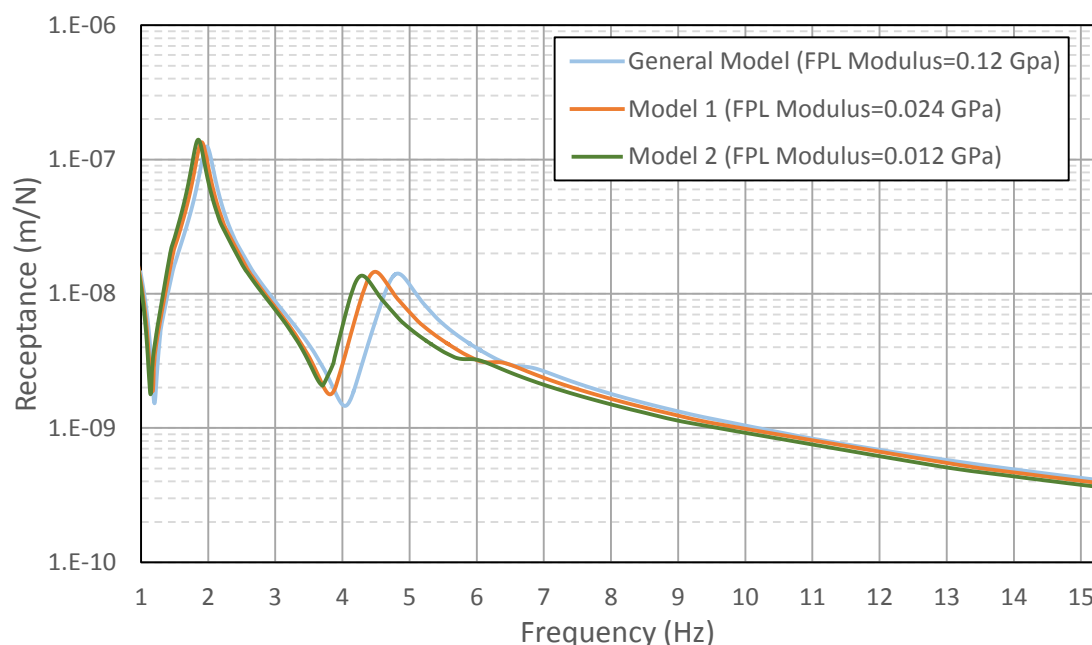


شکل ۱۰-۴: رسپتانس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات ضخامت لایه هیدرولیکی

مطابق شکل هر سه نمودار به سمت راست جابجا شده که همزمان، با کاهش دامنه پاسخ خط همراه است. منحنی‌ها نشان می‌دهند با سه برابر کردن ضخامت لایه هیدرولیکی فرکانس تشدید اول در حدود ۱ هرتز و فرکانس تشدید دوم در حدود ۲ هرتز افزایش خواهد داشت. همچنین مقدار میرا شدگی در فرکانس تشدید دوم به شدت افزایش داشته است. به این ترتیب با افزایش بیشتر ضخامت این لایه می‌توان مستهلک شدن کامل تشدید در حدود فرکانس ۶/۵ هرتز را داشت.

#### ۴-۳-۱-۶ اثر مدول لایه محافظ یخ زدگی

لایه محافظ یخ زدگی آخرین لایه بتنی در سیستم خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ است. در این قسمت مدول الاستیسیته این لایه از ۰/۱۲ GPa تا ۰/۱۲ GPa تغییر می‌کند. در شکل ۴-۱۱ منحنی‌های رسپتانس این تغییرات نشان داده شده است.

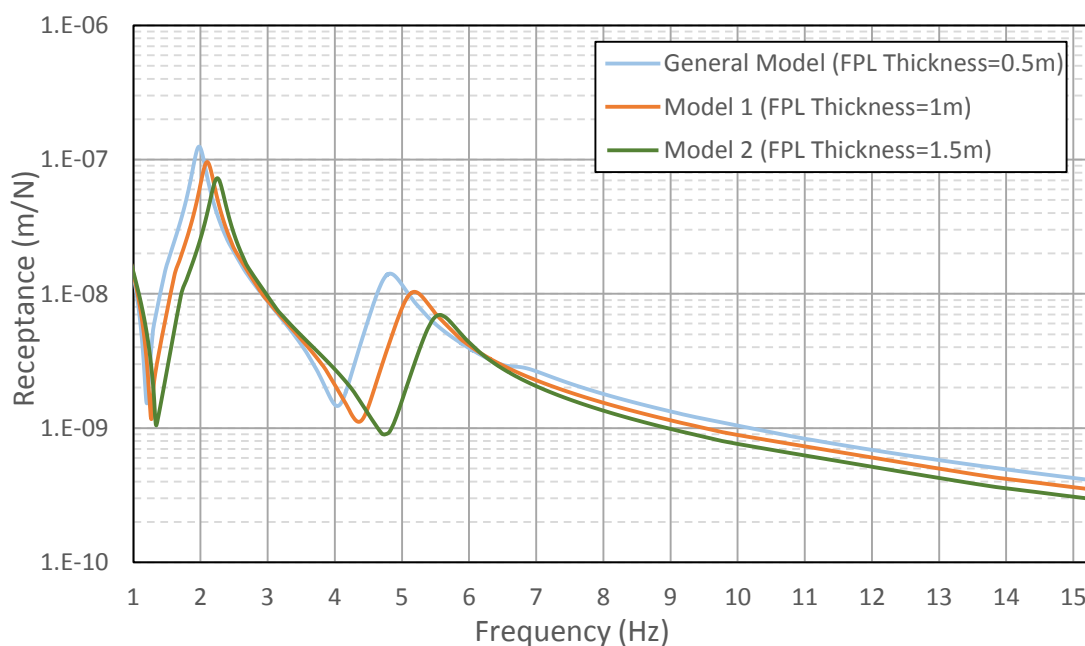


شکل ۴-۱۱: رسپتانس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات مدول لایه محافظ یخ زدگی

همانطور که در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده، تغییر مدول الاستیسیته خط در فرکانس تشدید اول و پاسخ متناظر آن تاثیر چندانی ندارد. در مورد تشدید دوم می‌توان گفت دامنه پاسخ خط ثابت بوده و فقط کاهش سختی لایه منجر به کاهش فرکانس تشدید شده است. در مجموعه اجزای تشکیل دهنده خط، لایه هیدرولیکی نسبت به سایر لایه‌های بتنی از سختی به مراتب کوچکتری برخوردار است حال کمتر کردن این سختی کوچک نیز تاثیر زیادی بر دینامیک خط نخواهد داشت و لذا مطابق نمودارها فقط جابجایی کوچک همراه با کاهش فرکانس طبیعی سازه رخ می‌دهد.

### ۷-۱-۳-۴ اثر ضخامت لایه محافظ یخ زدگی

در شکل ۱۲-۴، رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات ضخامت لایه محافظ یخ زدگی نشان داده شده است. از منحنی‌ها می‌توان دریافت برخلاف تغییر در مدول این لایه که تاثیر چندانی بر فرکانس تشدید اول و پاسخ متناظر آن نداشت، تغییر ضخامت لایه منجر به بزرگ شدن فرکانس تشدید اول و کاهش پاسخ خط شده است. ضخامت لایه‌ها معمولاً با حرکت رو به پایین در سازه خط آهن افزایش می‌یابد. در مورد خط ره‌دا ۲۰۰۰ ضخامت استاندارد ۵/۰ متر است که با دو و یا سه برابر کردن آن سختی خط به میزان قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. این تغییر در سختی منجر به جابجایی منحنی‌ها به سمت راست می‌گردد.

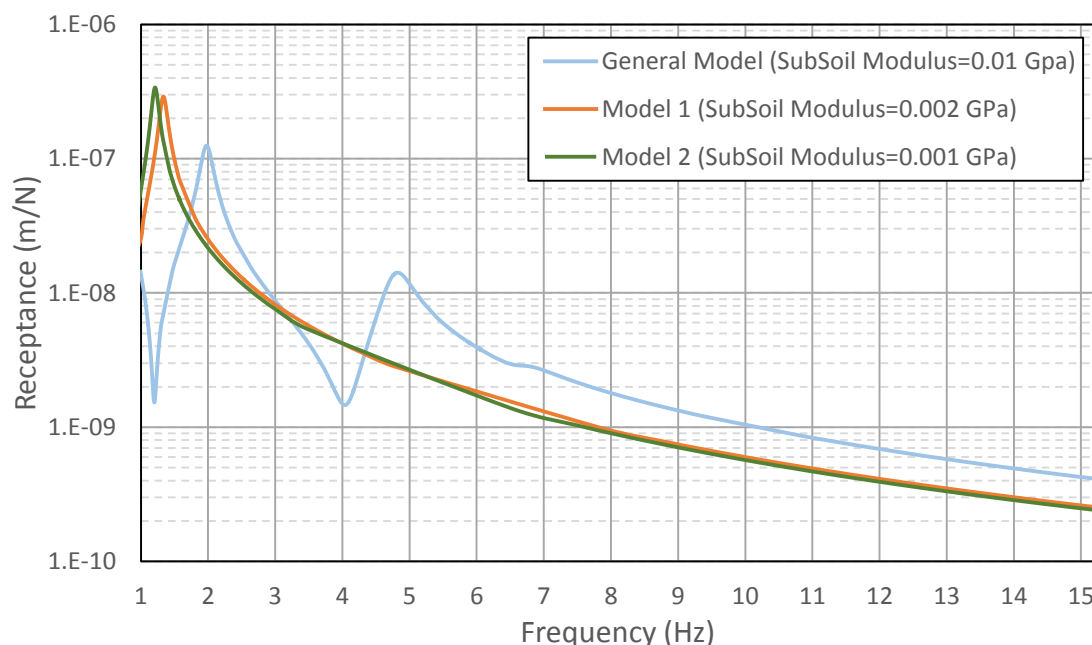


شکل ۱۲-۴: رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات ضخامت لایه محافظ یخ زدگی

اثر تغییر ضخامت بر فرکانس تشدید دوم و پاسخ متناظر آن بیشتر از تشدید اول است. به عنوان نتیجه کلی می‌توان گفت در لایه محافظ یخ زدگی افزایش ارتفاع منجر به جابجایی توام با جمع شدگی آرام نمودار به سمت راست می‌شود.

#### ۴-۳-۱-۸ اثر مدول بستر خاکی

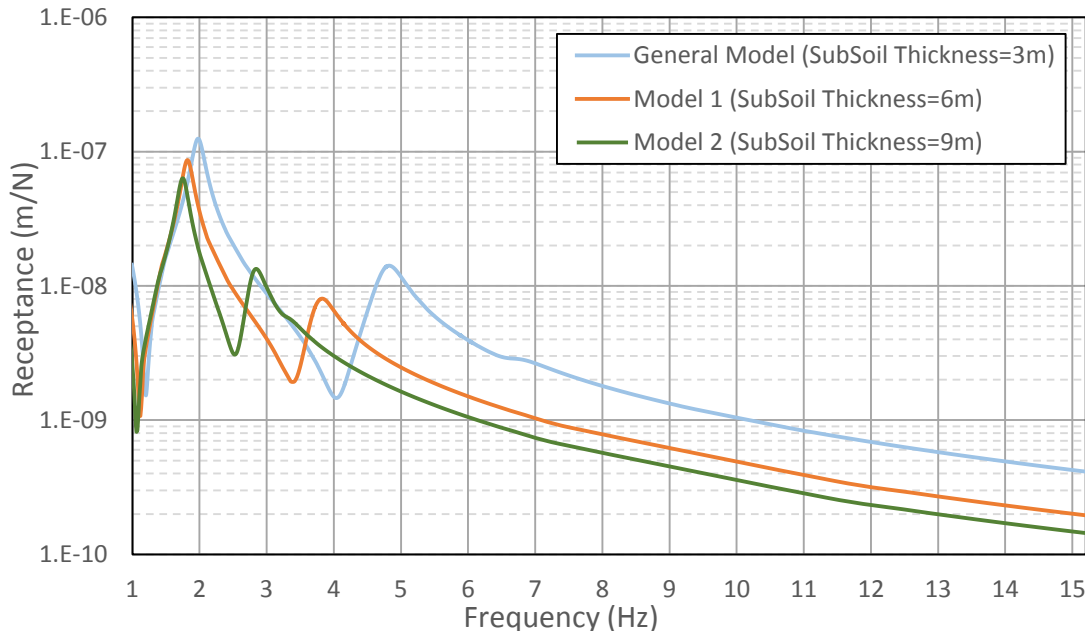
بستر خاکی، پایین ترین لایه در ساخت خطوط راه آهن است. با توجه به توپوگرافی منطقه، این لایه ممکن است با خاکریزی یا خاکبرداری ایجاد گردد و یا همان زمین طبیعی محل اجرای پروژه باشد. این لایه مانند لایه های بتنی در ساختار خط دارای عرض و ارتفاع استاندارد در طراحی ها و مدل سازی ها نیست و به همین خاطر در بررسی رفتار دینامیکی آن می توان ابعاد متفاوتی را در نظر گرفت. در این مطالعه برای مدلسازی لایه از ابعاد در نظر گرفته شده در مطالعات پیشین استفاده شده است. همچنین رفتار خط به صورت الاستیک فرض گردیده است. مطابق شکل ۴-۱۳ مدول بستر تاثیر بسزایی بر پاسخ دینامیکی خط دارد. در مدل سازی شرایط مرزی بی نهایت فقط بر روی این لایه اعمال می شود به همین علت رفتار آن در برخورد با کاهش سختی در مواردی متناقض با لایه های دیگر است. چنانکه دیده می شود شروع نمودار با شیب مثبت بوده است. تشدید دوم در این بررسی به طور کامل میرا شده و هیچ اثری از آن در منحنی دیده نمی شود.



شکل ۴-۱۳: رسپتانس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات مدول بستر خاکی

#### ۹-۱-۳-۴ اثر ضخامت بستر خاکی

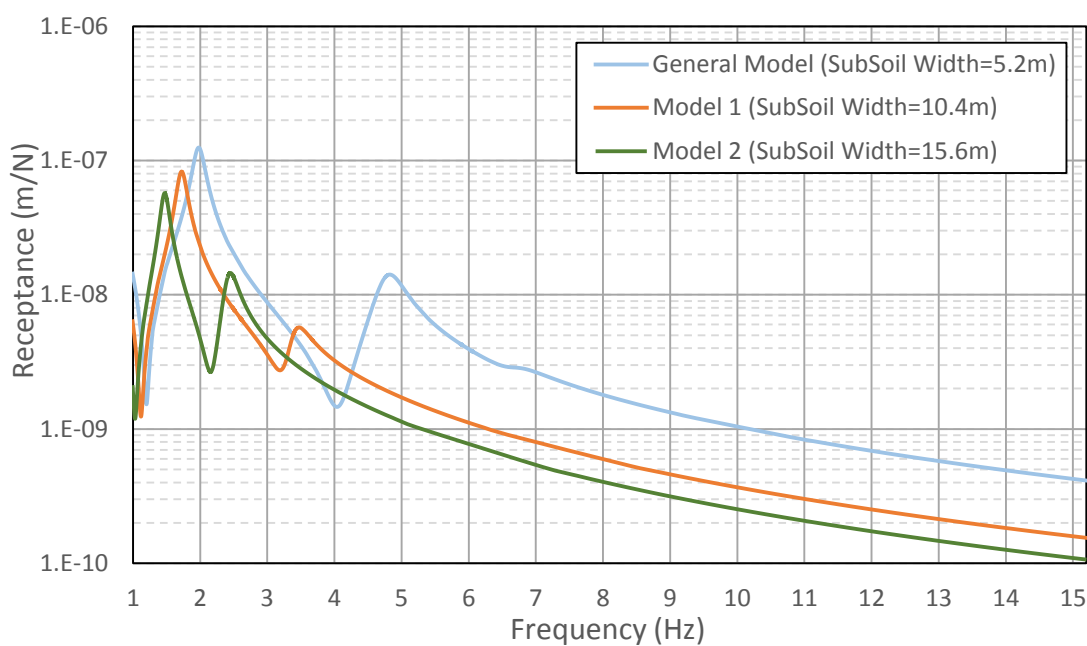
در شکل ۴-۱۴ منحنی تابع رسپتانس، برای سه ضخامت متفاوت بستر خاکی ترسیم شده است. در مواردی که بستر خط آهن به کمک خاکریزی شکل می گیرد اثر این ضخامت را باید در مطالعات و مدل سازی های دینامیکی خط بررسی نمود. از تحلیل منحنی های شکل ۴-۱۴ در می یابیم افزایش ضخامت لایه بستر منجر به کاهش پاسخ خط و کاهش فرکانس های طبیعی سازه می شود. لایه بستر دارای سختی به مراتب کمتر در برابر سایر لایه های خط است. افزایش ضخامت این لایه منجر شده لایه ای که کمترین سختی را داشته حجم زیادی از مدل را به خود اختصاص داده و با مقایسه حالت قبل سختی معادل خط کاهش پیدا کند. این کاهش سختی منجر به انتقال نمودار به سمت چپ شده است. لازم به ذکر است در این مدل سازی، به دلیل اثرگذاری شرایط مرزی بی نهایت جانبی که تنها بر روی بستر خاکی تعریف می شود، پاسخ های بدست آمده غیر منطقی هستند.



شکل ۴-۱۴: رسپتانس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات ضخامت بستر خاکی

#### ۴-۳-۱۰ اثر عرض بستر خاکی

منحنی های رسپتانس برای سه مدل متفاوت عرض بستر در شکل ۴-۱۵ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد عرض بستر خاکی بر رفتار دینامیکی قائم خط اثر گذار بوده و با افزایش عرض لایه، منحنی رسپتانس به سمت چپ جمع شدگی دارد. همچنین در مدل دوم با عرض ۱۵/۶ متر فاصله بین دو فرکانس تشدید بسیار کم شده و در محدوده فرکانس ۱ تا ۳ هرتز، دو تشدید رخ می دهد.



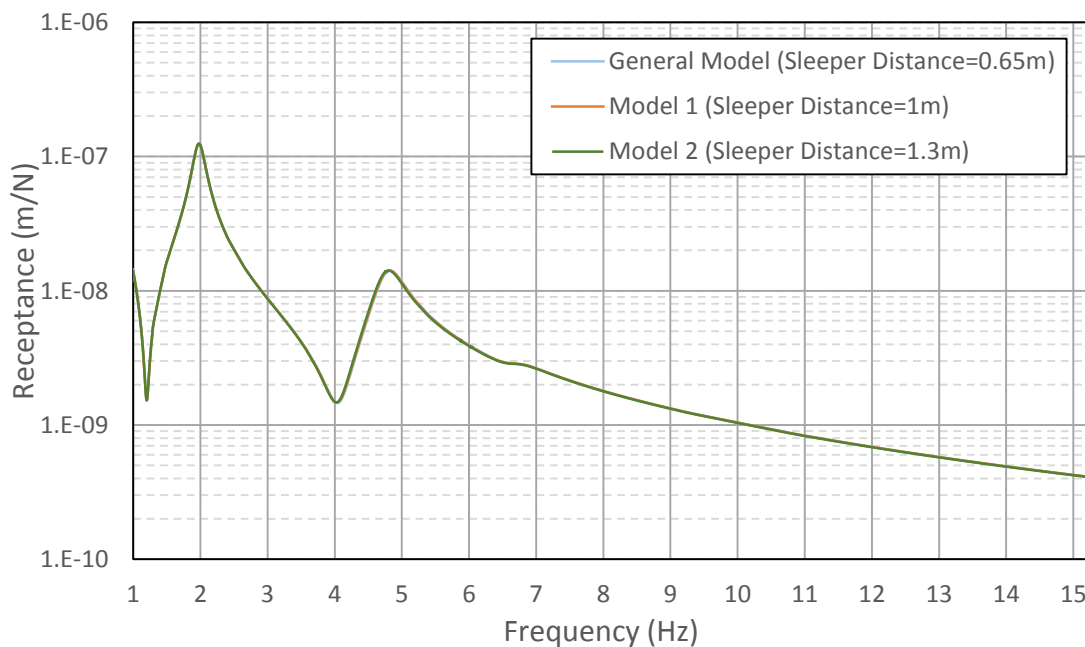
شکل ۴-۱۵: رسپتانس خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ با تغییرات عرض بستر خاکی

در این بررسی از مقایسه شکل های ۴-۱۴ و ۴-۱۵ در می یابیم تغییرات نتایج افزایش ضخامت اندکی بیشتر از نتایج افزایش عرض است و می توان گفت منحنی ها تقریباً با یکدیگر مشابه هستند. نتایج بدست آمده در این بخش نیز به دلیل وجود شرایط مرزی بی نهایت جانبی روی این لایه غیر منطقی بوده و قابل استناد نمی باشند.



#### ۴-۳-۱۱ اثر فاصله تراورس ها

تراورس یکی از اجزای تشکیل دهنده خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ برای حفظ و نگهداری ریل در مسیر خط است. در این نوع خط، تراورس ها به صورت بلوک های پیش ساخته بوده که در فواصل مشخص و ثابت در محل نصب و بهره برداری می شوند. در این بخش به بررسی اثر فاصله‌ی تراورس ها بر روی پاسخ دینامیکی قائم خط پرداخته شده است. شکل ۴-۱۶ منحنی های رسپتانس خط برای فاصله تراورس از ۰/۶۵ تا ۱/۳ متر نشان می دهد.



شکل ۴-۱۶: رسپتانس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با تغییرات فاصله تراورس ها

همانطور که در شکل فوق دیده می شود، افزایش فاصله‌ی بین تراورس ها تاثیری در پاسخ دینامیکی خط در راستای قائم ندارد. با بررسی دقیق نقاط بیشینه منحنی های فوق، تغییرات نقاط تشدید در حدود ۰/۰۵ درصد است.

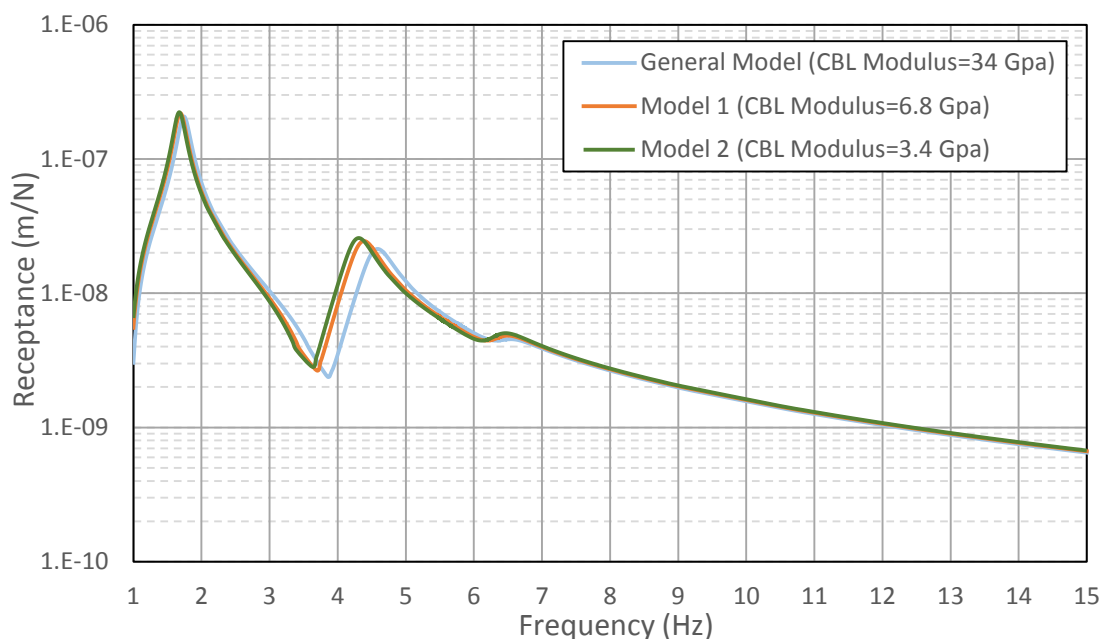
#### ۴-۳-۲ خط بتنی شینکانسن

در این بخش به بررسی اثرات تغییر ابعاد و خواص مکانیکی اجزای تشکیل دهنده خط بتنی شینکانسن در رفتار دینامیکی آن داریم. در مدلسازی هندسه و خواص مصالح این خط از جدول ۳-۲ در بخش ۳-۴-۲ استفاده گردیده است. به منظور مطالعه اثرات دینامیکی اجزا، ۱۹ مدل در این بخش بررسی گردید که عبارتند از: یک مدل عمومی خط، چهار مدل برای لایه بتنی، چهار مدل برای لایه آسفالتی، چهار مدل برای لایه هیدرولیکی، و شش مدل برای لایه بستر. در مدلسازی ریل از تئوری تیر اولر-برنولی و المان تیر استفاده شده است. لایه های خط بتنی نیز با پارتیشن بندی کل خط و تخصیص مصالح متفاوت شکل گرفته اند. در مرزهای بی نهایت، جابجایی در جهت عمود بر سطح (نرمال) محدود شده است. در لایه ها با حرکت از پایین به سمت بالا، کیفیت مش بندی افزایش می یابد.

در ادامه نتایج مدلسازی ها به تفکیک هر جزء خط بررسی می شود.

#### ۴-۳-۱ اثر مدول لایه بتنی

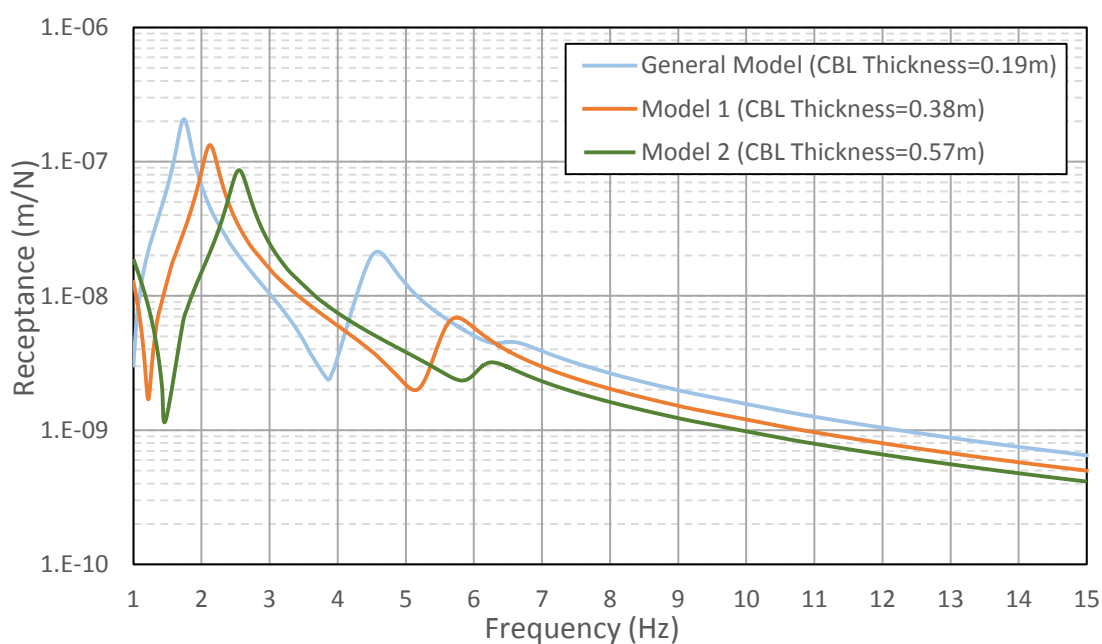
همانند خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰، لایه بتنی بالاترین خط در سیستم شینکانسن است. این لایه اولین عضو خط در مواجهه با ارتعاشات دینامیکی است لذا از این جهت بررسی رفتار آن اهمیت بالایی دارد. مطابق شکل ۴-۱۷، کاهش مدول لایه بتنی در این سیستم تاثیر چندانی بر رفتار دینامیکی قائم خط ندارد. همانطور که مشاهده می شود در مورد فرکانس تشدید اول تغییرات بسیار کم است و تقریباً در اکثر نواحی بازه فرکانسی ۱ تا ۳ هرتز دو منحنی با یکدیگر همپوشانی دارند. در بازه فرکانسی ۳ تا ۶ هرتز، منحنی رسپتانس به سمت چپ منتقل شده و این انتقال همراه با افزایش دامنه پاسخ خط همراه بوده است. در ادامه در حدود فرکانس ۵/۶ هرتز مشخص است کاهش بیشتر مدول الاستیسیته لایه بتنی منجر به رخ دادن تشدید سوم شده و همانطور که مشخص است در این قسمت پاسخ دینامیکی قائم خط افزایش داشته است.



شکل ۴-۱۷: رسپتانس خط بتنی شینکانسن با تغییرات مدول لایه بتنی

#### ۲-۲-۳-۴ اثر ضخامت لایه بتنی

در شکل ۴-۱۸، رسپتانس خط با سه ضخامت مختلف لایه بتنی نشان داده شده است.

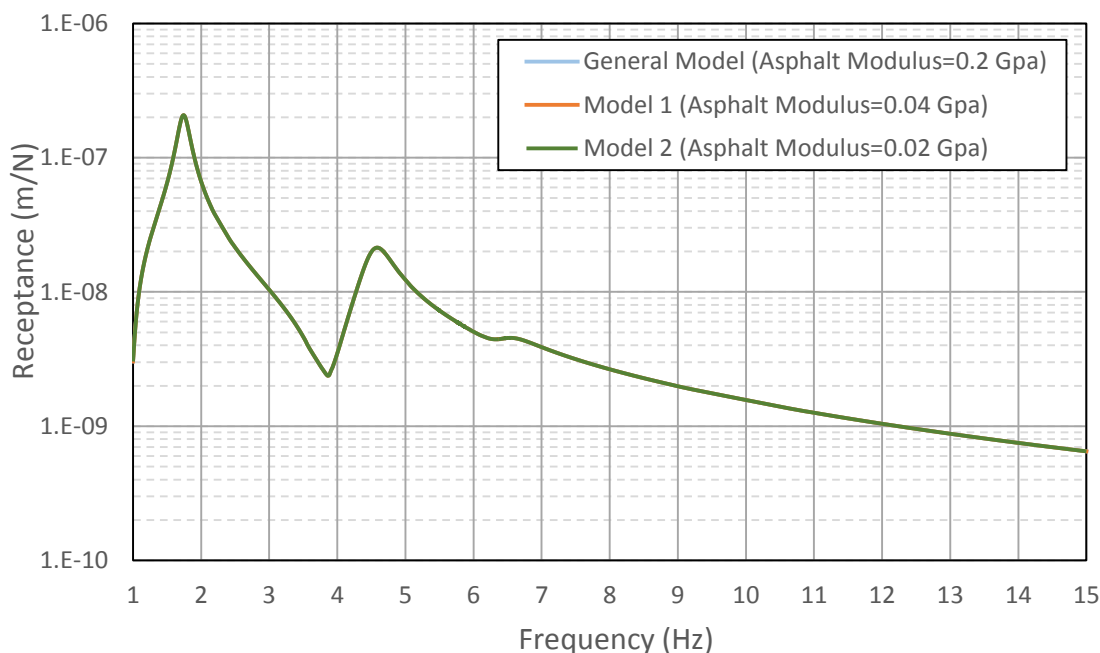


شکل ۴-۱۸: رسپتانس خط بتنی شینکانسن با تغییرات ضخامت لایه بتنی

همانطور که مشاهده می شود، ضخامت لایه در پاسخ فرکانسی خط بسیار اثر گذار است. با افزایش ضخامت لایه بتنی، سختی لایه افزایش پیدا کرده که در نهایت منجر به افزایش سختی کل خط شده است. این افزایش سختی باعث می شود منحنی های پاسخ فرکانسی به سمت راست جابجا شوند. افزایش سختی همچنین موجب کاهش دامنه پاسخ خط می گردد و به همین علت پاسخ تشدید اول و به خصوص تشدید دوم کاهش محسوسی داشته است. همانطور که از شکل پیداست افزایش ضخامت این لایه باعث مستهلک شدن پاسخ در تشدید دوم شود لذا می توان چنین گفت با افزایش بیشتر ضخامت لایه بتنی شاهد استهلاک کامل تشدید دوم بود.

#### ۴-۳-۲-۳ اثر مدول لایه آسفالت

یکی از راهکارهای کاهش ارتعاش به وجود آمده ناشی از عبور قطار در خط آهن استفاده از آسفالت است. آسفالت با توجه به خاصیت ارتجاعی بالایی که دارد به شدت باعث استهلاک ضربه و اثرات آن می شود. در شکل ۴-۱۹، اثر تغییرات مدول لایه آسفالتی در پاسخ خط نشان داده شده است.

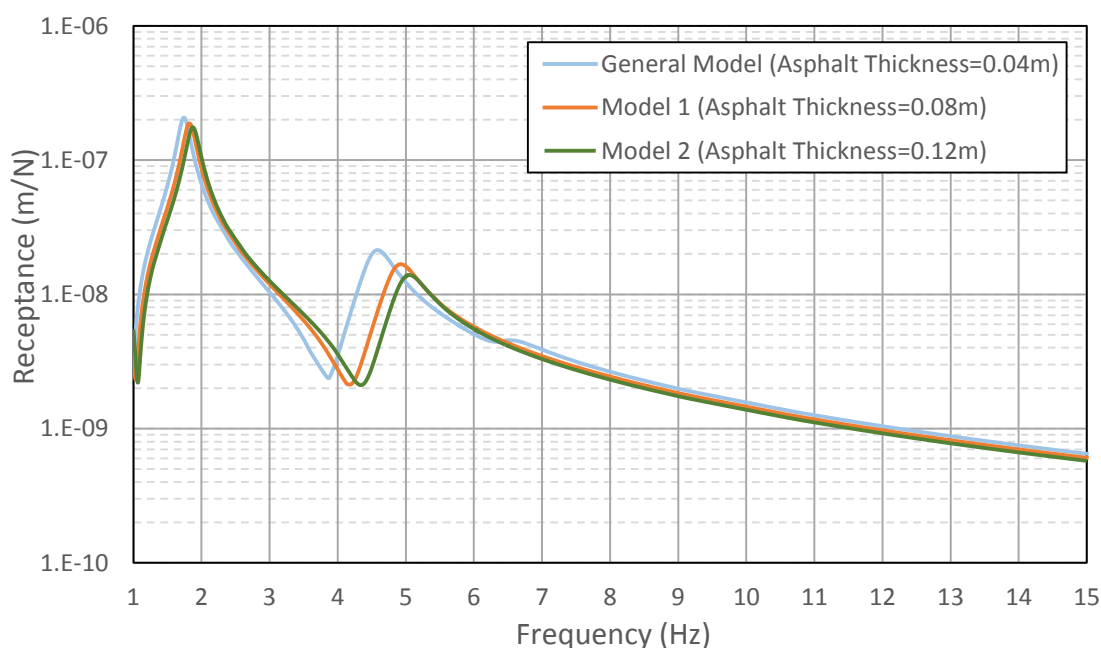


شکل ۴-۱۹: رسپتانس خط بتنی شینکانسن با تغییرات مدول لایه آسفالتی

در شکل ۴-۱۹، اثر تغییرات مدول لایه آسفالتی در پاسخ خط نشان داده شده است. همانطور که مشخص است این تغییرات تاثیری در رفتار دینامیکی قائم خط ندارد. دلیل این اتفاق ضخامت خیلی کم لایه آسفالتی است. در خط بتنی شینکانسن ضخامت معمول لایه آسفالتی در حدود ۴ سانتی متر است لذا تغییر در مدول این لایه نازک، تاثیری بر پاسخ دینامیکی قائم و فرکانس های طبیعی سازه نخواهد داشت. البته ذکر این نکته لازم است که تغییر در مدول لایه قطعا در پاسخ خط اثر گذار است اما این اثرات آنقدر ناچیز است که در منحنی های شکل ۴-۱۹ مشاهده نمی شوند.

#### ۴-۳-۲-۴ اثر ضخامت لایه آسفالت

در شکل ۴-۲۰ رسپتنس خط بتنی شینکانسن به ازای تغییر در ضخامت لایه آسفالت نشان داده شده است. در این بررسی ضخامت لایه آسفالت بین ۰/۰۴ متر تا ۰/۱۲ متر متغیر است. همانطور که مشخص است تغییر ضخامت لایه آسفالتی تاثیر کمی بر پاسخ خط در ناحیه فرکانس تشدید اول داشته است. در بازه فرکانسی ۴ تا ۶ هرتز این تغییرات محسوس تر است.

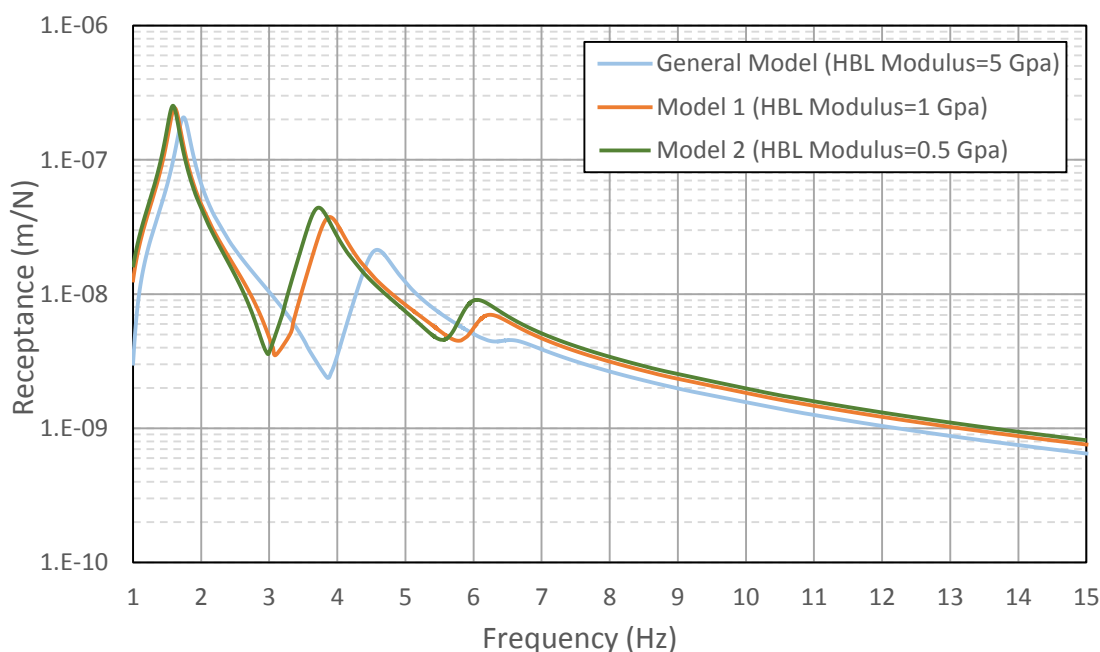


شکل ۴-۲۰: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات ضخامت لایه آسفالتی

مطابق شکل ۴-۲۰، افزایش ضخامت لایه آسفالتی منجر به افزایش فرکانس های طبیعی خط شده است. همچنین افزایش ضخامت موجب کاهش دامنه پاسخ خط شده و علاوه بر جابجا شدن نمودار به سمت راست ارتفاع منحنی کاهش یافته است.

#### ۴-۳-۲-۵ اثر مدول لایه هیدرولیکی

نتایج رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییر مدول لایه هیدرولیکی در سه حالت ۵، ۱ و ۰/۵ گیگا پاسکال در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است. تحلیل ها نشان می دهد مدول لایه هیدرولیکی در رفتار دینامیکی قائم خط به شدت اثر گذار بوده و این تغییرات فرکانس های تشدید و پاسخ متناظر آن موثر است. مطابق شکل کاهش مدول الاستیسیته منجر به جابجایی منحنی ها به سمت چپ شده و این جابجایی با افزایش دامنه پاسخ خط همراه است. همچنین تغییرات در بازه فرکانس ۳ تا ۷ هرتز بیشتر از محدوده ۱ تا ۲ هرتز است.

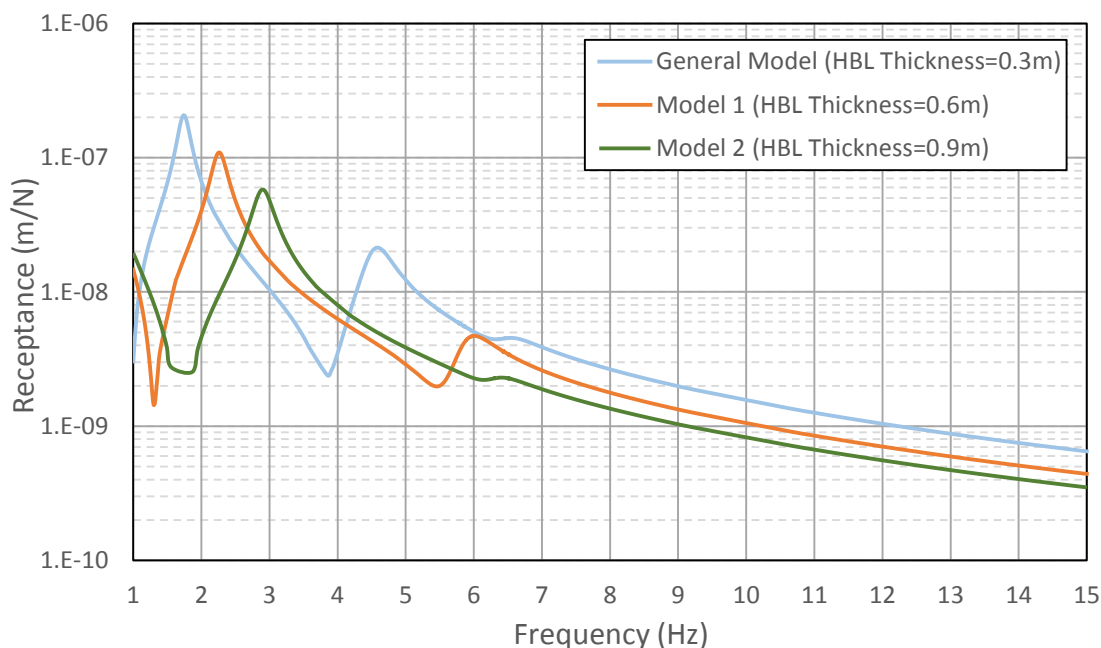


شکل ۴-۲۱: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات مدول لایه هیدرولیکی

نکته قابل توجه در بررسی منحنی ها، رخ دادن تشدید سوم در بازه ۶ تا ۷ هرتز است. همانطور که دیده می شود کاهش مدول لایه هیدرولیکی شدیداً روی رفتار خط اثر گذار بوده و کاهش فرکانس های طبیعی و افزایش دامنه پاسخ خط را به همراه دارد.

#### ۴-۳-۲-۶ اثر ضخامت لایه هیدرولیکی

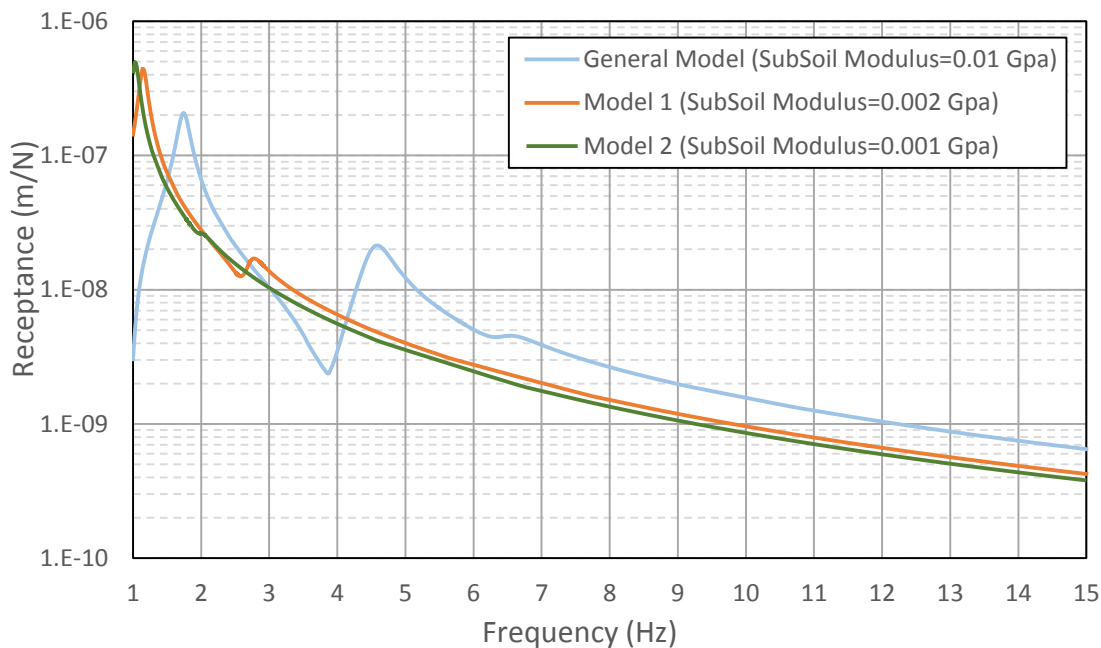
در شکل ۴-۲۲، پاسخ دینامیکی قائم خط به ازای تغییرات در ضخامت لایه هیدرولیکی نشان داده شده است. این تغییرات در بازه ۰/۳ متر تا ۰/۹ متر است. منحنی ها نشان می دهند تغییر ضخامت لایه هیدرولیکی به مراتب در رفتار دینامیکی قائم خط اثر گذار است. این تغییرات در مدل ۲ باعث افزایش فرکانس های تشدید در حدود ۱/۵ هرتز شده است. با افزایش ضخامت لایه هیدرولیکی، سختی این لایه افزایش پیدا کرده و متناسب با آن سختی خط هم افزایش یافته است. با افزایش سختی فرکانس های طبیعی بیشتر شده است و مطابق شکل منحنی ها به سمت راست جابجا شده اند. همچنین به دلیل زیاد شدن سختی خط پاسخ فرکانسی نیز کاهش یافته است.



شکل ۴-۲۲: رسپتانس خط بتنی شینکانسن با تغییرات ضخامت لایه هیدرولیکی

#### ۷-۲-۳-۴ اثر مدول بستر خاکی

نتایج رسپتنس برای سه حالت مختلف مدول الاستیسیته بستر در شکل ۲۳-۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، سه منحنی ترسیم شده با یکدیگر اختلاف زیادی دارند.



شکل ۲۳-۴: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات مدول بستر خاکی

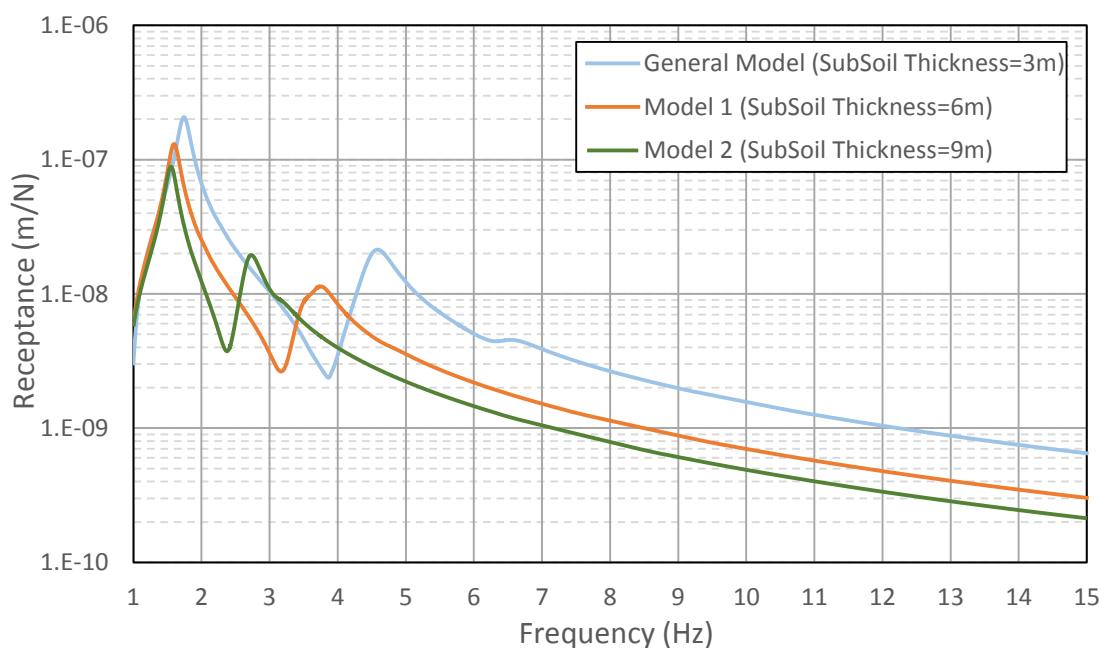
مطابق شکل ۲۳-۴، کاهش مدول الاستیسیته منجر به کاهش فرکانس های طبیعی خط شده است. این بررسی نشان می دهد کاهش فرکانس تشدید اول برای مدل های ۱ و ۲، کمتر از ۱ هرتز و برای فرکانس تشدید دوم در حدود ۱/۵ تا ۲ هرتز می باشد. همچنین اثر تشدید دوم در مدل دوم تقریباً در حال مستهلک شدن است. همچنین در مورد تشدید دوم می توان گفت تاثیر کاهش مدول بستر فقط بر کاهش فرکانس طبیعی خط بوده و پاسخ ها دست خوش تغییرات خیلی کم بوده اند.

در مدل سازی شرایط مرزی بی نهایت جانبی فقط بر روی این لایه اعمال می شود و به همین علت رفتار آن در برخورد با کاهش سختی متناقض است و لذا نتایج بدست آمده قابل استناد نیست



#### ۸-۲-۳-۴ اثر ضخامت بستر خاکی

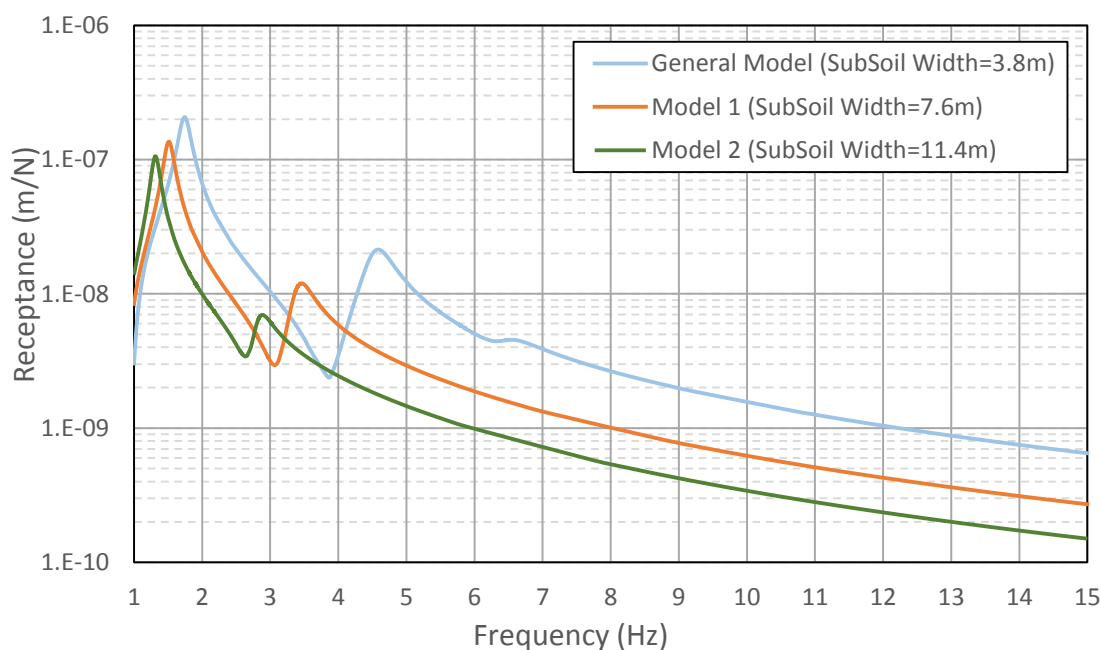
در مدلسازی خطوط راه آهن، بستر خاکی کمترین سختی و بیشترین ضخامت را دارد. حال چنانچه این ضخامت افزایش یابد اثر این سختی کم با کاهش سختی کل همراه است. شکل ۴-۲۴ رسپتانس خط بتنی شینکانسن با تغییرات ضخامت بستر خاکی را نشان می دهد. مطابق شکل، افزایش ضخامت لایه بستر از ۳ متر تا ۹ متر منجر به کاهش سختی خط شده و در ادامه فرکانس های طبیعی سازه کمتر شده است. همانطور که دیده می شود فرکانس تشدید اول در همان محدوده ۱ تا ۲ هرتز باقیمانده و تفاوت چندانی نداشته است ولی در تشدید دوم فرکانس طبیعی خط برای مدل ۱ و ۲ به ترتیب در حدود ۱/۵ تا ۲ هرتز کاهش داشته است. لازم به ذکر است در این مدلسازی، به دلیل اثرگذاری شرایط مرزی بی نهایت جانبی که تنها بر روی بستر خاکی تعریف می شود، پاسخ های بدست آمده غیر منطقی هستند.



شکل ۴-۲۴: رسپتانس خط بتنی شینکانسن با تغییرات ضخامت بستر خاکی

#### ۴-۳-۲-۹ اثر عرض بستر خاکی

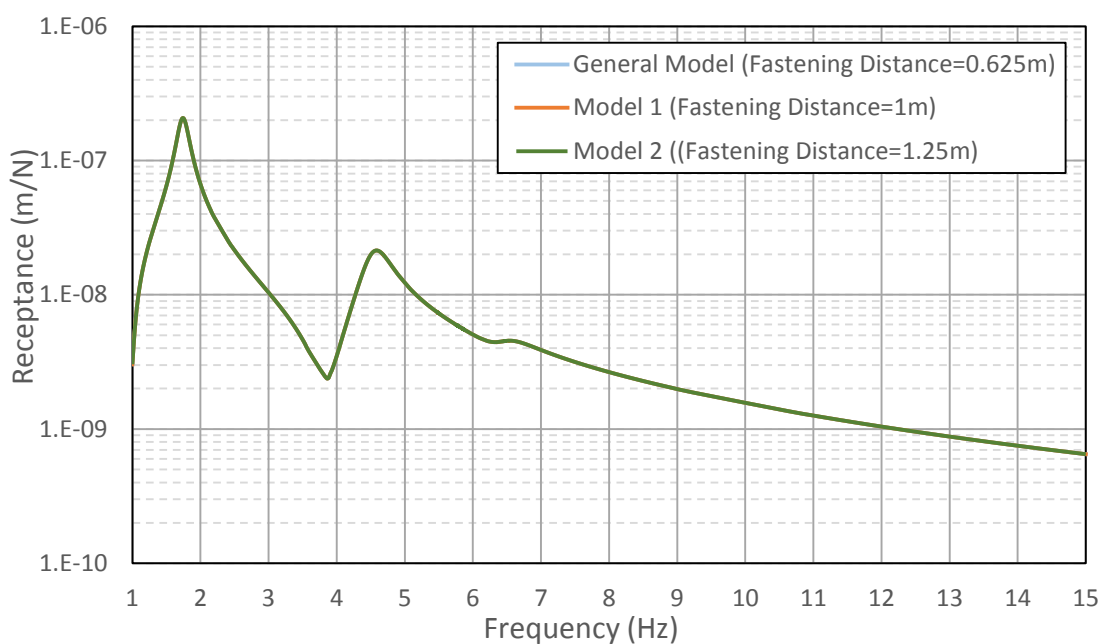
در شکل ۴-۲۵ منحنی های رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات عرض بستر خاکی نشان داده شده است. در این بررسی سه مقدار  $\frac{3}{8}$ ،  $\frac{7}{6}$  و  $\frac{11}{4}$  متر برای عرض بستر انتخاب شده است. منحنی ها نشان می دهد با افزایش عرض بستر خاکی فرکانس های طبیعی خط کاهش یافته است. این کاهش در فرکانس تشدید دوم و در بازه ۳ تا ۵ هرتز بیشتر از فرکانس تشدید اول است. همچنین پاسخ دینامیکی قائم خط با افزایش عرض بستر خاکی کاهش یافته است و این اثر به دلیل وجود شرایط مرزی جانبی بی نهایت بر روی این لایه است. نتایج بدست آمده در این بخش نیز به دلیل وجود شرایط مرزی بی نهایت جانبی روی این لایه غیر منطقی بوده و قابل استناد نمی باشند.



شکل ۴-۲۵: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات عرض بستر خاکی

#### ۴-۳-۱۰ اثر فاصله پابند ها

یکی از تفاوت های سیستم خط بتنی شینکانسن با خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ حذف تراورس ها به دلیل پیش ساخته بودن دال های بتنی خط است. در این سیستم برای محکم کردن ریل بر روی دال های بتنی از پابند استفاده می شود. شکل ۴-۲۶ رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات فاصله ی پابندها از ۰/۶۲۵ تا ۱/۲۵ متر نشان می دهد.



شکل ۴-۲۶: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با تغییرات فاصله پابند ها

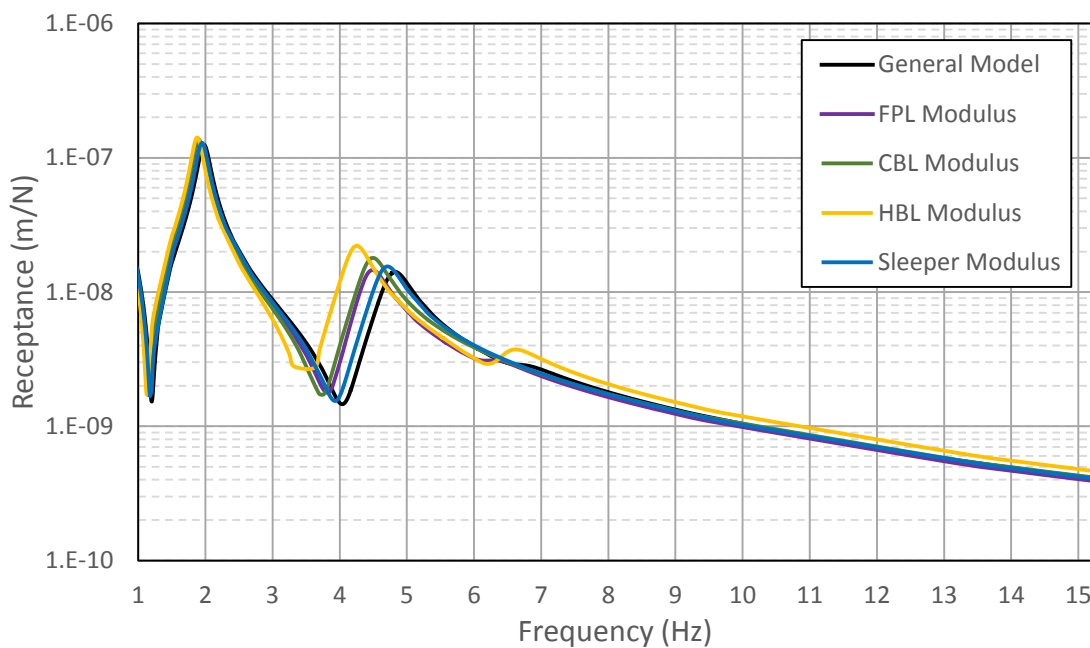
همانطور که در شکل فوق دیده می شود، افزایش فاصله پابندها در پاسخ دینامیکی قائم خط شینکانسن تاثیری ندارد. همچنین بررسی نقاط تشدید در این منحنی ها نشان می دهد تاثیرات بسیار ناچیز و در حدود ۰/۰۸ درصد است و لذا با قطعیت می توان گفت فاصله ی بین تراورس ها تاثیری در رفتار دینامیکی قائم خط نخواهد داشت.

#### ۴-۳-۳ مقایسه مدل های مختلف

در این بخش با ترکیب منحنی های بدست آمده از نتایج بخش های ۴-۳-۱ و ۴-۳-۲ به مقایسه میزان اثرگذاری لایه ها و اجزای تشکیل دهنده خط به تفکیک هر کدام از خطوط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن پرداخته می شود. در دو بخش قبلی تغییرات بر روی یک لایه و المان خاص اعمال شد و شدت اثرگذاری بر رفتار دینامیکی قائم با بررسی منحنی های رسپتنس همان لایه در خط تحلیل گردید. اکنون برای اینکه بتوان تشخیص داد کدام لایه در ساختار خط بیشترین اثر را بر رفتار دینامیکی قائم آن دارد مقایسه ای بین تغییرات ایجاد شده در منحنی های رسپتنس خط انجام می شود.

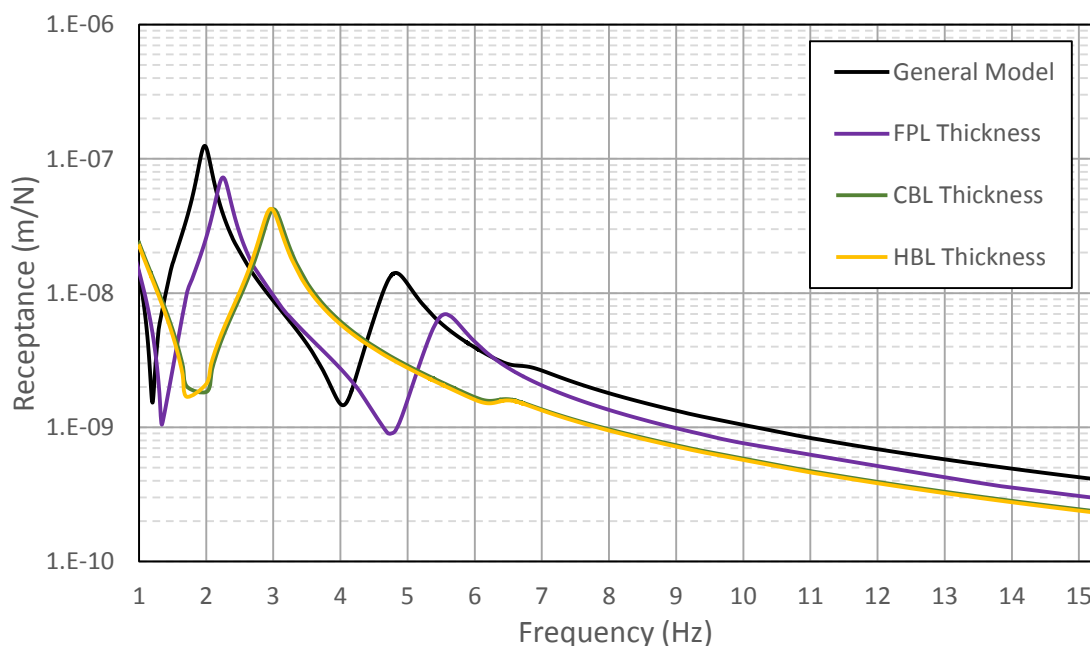
در این بخش با یکدهم برابر شدن مدول الاستیسیته لایه ها به صورت جداگانه (مدل ۲ در مدلسازی ها) تابع رسپتنس خطوط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن به تفکیک ترسیم شده و با قراردادن منحنی های بدست آمده در یک گراف، مقایسه صورت پذیرفته است. با سه برابر کردن ضخامت لایه ها (مدل ۲ در مدلسازی ها)، عملیات قبل نیز در این حالت انجام شده است.

رسپتانس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با اعمال تغییر ثابت در تمام لایه‌ها و اجزا در شکل ۴-۲۷ نشان داده شده است. در این بررسی مدول الاستیسیته همه اجزای مورد بررسی، یکدهم برابر شده و پس از تحلیل دینامیکی، منحنی‌های رسپتانس بدست آمده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده، تغییر مدول الاستیسیته لایه‌ها در فرکانس تشدید اول تاثیر چندانی ایجاد نکرده اند ولی در محدوده فرکانسی ۳/۵ تا ۷ هرتز تغییرات مشهود است. با کاهش مدول الاستیسیته اجزا، سختی خط به طور کل کاهش یافته و به ترتیب مدول لایه هیدرولیکی، مدول لایه بتنی، مدول لایه محافظ یخ زدگی و مدول تراورس‌ها بیشترین تاثیر را در رفتار دینامیکی قائم خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ دارند.



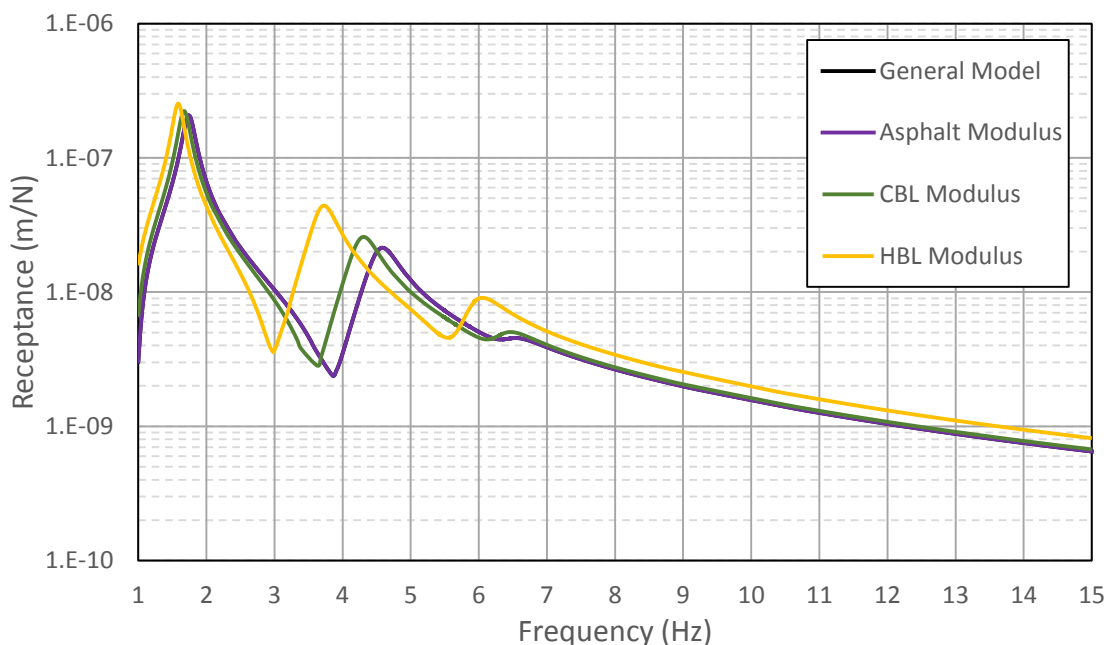
شکل ۴-۲۷: رسپتانس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با یکدهم برابر کردن مدول اجزای تشکیل دهنده خط

در شکل ۴-۲۸ رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با اعمال تغییر ثابت در ضخامت همه لایه‌های خط بتنی نشان داده شده است. در بخش ۴-۳-۱ میزان اثرگذاری ضخامت لایه‌های مختلف در رفتار دینامیکی قائم خط ره‌دا ۲۰۰۰ بررسی گردید. در این قسمت با سه برابر کردن ضخامت لایه‌ها، پاسخ دینامیکی خط در لایه‌های مختلف بررسی می‌شود. از منحنی‌های شکل ۴-۲۸ می‌توان دریافت، افزایش ضخامت هر لایه منجر به افزایش سختی کل خط می‌شود. در تمام لایه‌ها، فرکانس تشدید اول بیشینه دامنه تغییرات ۱ هرتز را داشته است اما فرکانس تشدید دوم دچار تغییرات بیشتری شده است. تشدید دوم در منحنی مربوط به لایه محافظ یخ زدگی در حدود ۵/۵ هرتز و برای لایه‌های بتنی و هیدرولیکی تقریباً مستهلک شده است. لذا به ترتیب ضخامت لایه بتنی و هیدرولیکی و ضخامت لایه محافظ یخ زدگی بیشترین اثرگذاری را در رفتار دینامیکی قائم خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ دارند.



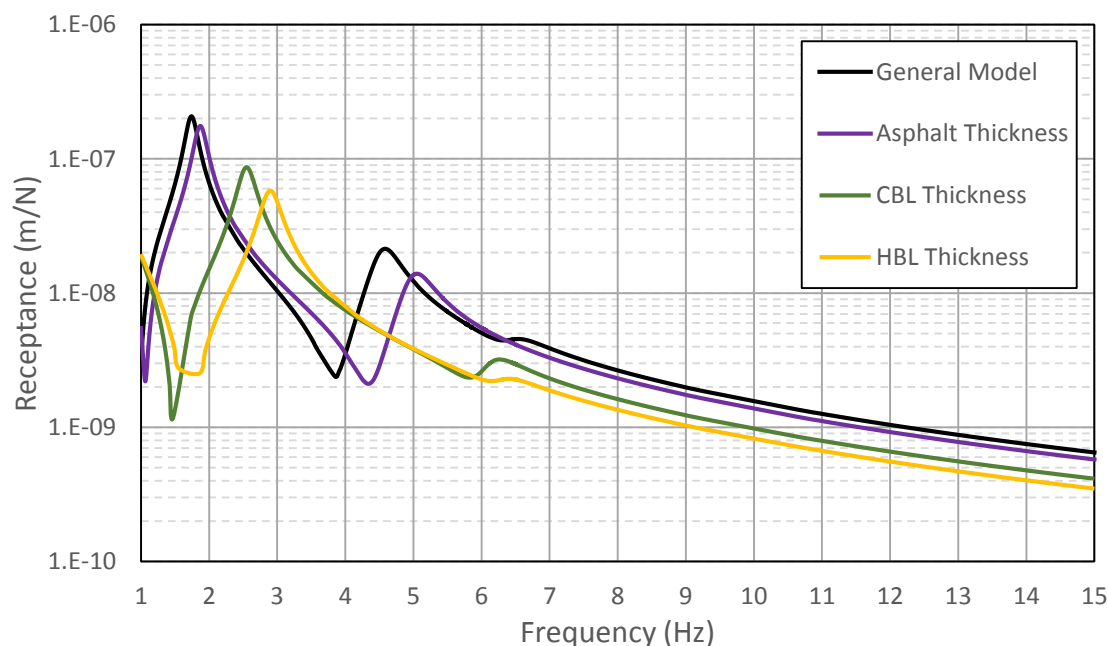
شکل ۴-۲۸: رسپتنس خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با سه برابر کردن ضخامت اجزای تشکیل دهنده خط

رسپتانس خط بتنی شینکانسن با اعمال تغییر یکسان در مدول الاستیسیته همه‌ی لایه‌ها در شکل ۴-۲۹ مشاهده می‌شود. در این شکل، با یکدهم برابر کردن مدول لایه‌ها، اثرگذاری هر کدام در رفتار دینامیکی قائم خط مقایسه شده است. با بررسی شکل می‌توان گفت تغییرات مدول الاستیسیته لایه‌ها در فرکانس تشدید اول تأثیری چندانی نداشته و این تشدید در حدود فرکانس ۱/۸ هرتز رخ داده است. در منحنی مربوط به لایه آسفالت و لایه بتنی تشدید سوم تقریباً در حال مستهلک شدن است. در این بررسی می‌توان به ترتیب تغییرات مدول لایه هیدرولیکی و مدول لایه بتنی را در رفتار دینامیکی قائم خط موثر دانست. در مورد لایه آسفالت همانطور که در بخش مربوطه گفته شد به دلیل اینکه تأثیر ناچیزی در رفتار دینامیکی قائم خط دارد، می‌توان از اثرات آن چشم‌پوشی کرد.



شکل ۴-۲۹: رسپتانس خط بتنی شینکانسن با یکدهم برابر کردن مدول اجزای تشکیل دهنده خط

در شکل ۴-۳۰ رسپتنس خط بتنی شینکانسن با اعمال تغییر یکسان در ضخامت لایه های تشکیل دهنده خط نشان داده شده است. در این شکل، با سه برابر کردن ضخامت لایه ها، تاثیر این تغییرات در پاسخ دینامیکی قائم خط بررسی می شود. مطابق شکل ۴-۳۰، افزایش ضخامت لایه ها منجر به افزایش سختی کل خط شده، فرکانس تشدید ها افزایش و پاسخ دینامیکی قائم خط کاهش یافته است. در این مدلسازی ها تغییرات ضخامت لایه آسفالت تاثیر چندانی روی تشدید اول نداشته است. تشدید اول در تمام منحنی ها در فرکانس کمتر از ۳ هرتز رخ داده و تشدید دوم در بازه فرکانسی ۴/۵ تا ۶/۵ هرتز اتفاق افتاده است. همچنین با مقایسه منحنی ها می توان دریافت به ترتیب ضخامت لایه هیدرولیکی، ضخامت لایه بتنی و ضخامت لایه آسفالتی بیشترین تاثیر را بر رفتار دینامیکی قائم خط دارند.



شکل ۴-۳۰: رسپتنس خط بتنی شینکانسن با سه برابر کردن ضخامت اجزای تشکیل دهنده خط



## **فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادات**

## ۵-۱ مقدمه

بررسی رفتار دینامیکی سیستم های حمل و نقل سریع السیر ریلی با توجه به ماهیت دینامیکی که این نوع حمل و نقل دارد بسیار حائز اهمیت است. یکی از مشکلات اصلی در طراحی خطوط بتنی، عدم شناخت مناسب رفتارهای خط در شرایط دینامیکی عبور قطار بوده که به دلیل طراحی های نادرست ممکن است هزینه های هنگفتی پس از اجرا، صرف تعمیر و نگهداری خطوط گردد. در نتیجه داشتن درکی کامل از رفتار و مکانیزم عملکرد دینامیکی خطوط لازم است.

در این پژوهش، رفتار دینامیکی قائم اجزای تشکیل دهنده دو خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن به روش المان محدود و با مدلسازی سه بعدی خط در آباکوس مطالعه گردید. برای این منظور ریل با استفاده از تئوری تیر اولر-برنولی و سایر اجزا با استفاده از المان سه بعدی هشت گره ای مدلسازی شده و رفتار همه ی اجزا الاستیک فرض شده است. برای درک رفتار دینامیکی اجزای تشکیل دهنده هر دو خط، با تغییر در مدول الاستیسیته و ضخامت لایه ها، تحلیل فرکانسی و تحلیل دینامیکی حالت پایدار انجام شده است. مقایسه منحنی های رسپتنس برای هر المان، تاثیر دینامیکی آن جزء را در رفتار دینامیکی خط نشان می دهد. در ادامه با هدف تشخیص اینکه کدام لایه اثر بیشتری بر دینامیک خط دارد، مقایسه ای بین پاسخ های فرکانسی خط ناشی از اعمال تغییر در لایه های مختلف انجام شد.

## ۵-۲ جمع بندی و نتیجه گیری

عمده نتایج بدست آمده از این پژوهش را می توان در موارد زیر خلاصه نمود:

### • نتایج بررسی اثرات لایه ها، فاصله تراورس ها و پابندها روی رفتار دینامیکی خطوط

نتایج نشان می دهد در هر دو سیستم خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ و شینکانسن، کاهش مدول الاستیسیته اجزای تشکیل دهنده خط منجر به کاهش سختی کل شده و کاهش فرکانس های تشدید و افزایش پاسخ فرکانسی قائم خط را به همراه خواهد داشت. همچنین افزایش ضخامت لایه منجر به افزایش سختی خمشی کل خط می شود که در نهایت فرکانس های تشدید افزایش و پاسخ های

فرکانسی کاهش می یابد.

با افزایش فاصله تراورس ها در سیستم خط بتنی رهدا ۲۰۰۰، بیشترین میزان اثرگذاری در رفتار دینامیکی قائم خط در محل تشدید ها تنها در حدود ۰/۰۵ درصد خواهد بود که عملاً می توان از اثرات اندک آن چشم پوشی کرد.

با افزایش فاصله پابندها در سیستم خط بتنی شینکانسن، بیشترین میزان اثرگذاری در رفتار دینامیکی قائم خط در محل تشدید ها تنها در حدود ۰/۰۸ درصد بوده است. بنابراین می توان اثرات اندک آن را نادیده گرفت.

#### • نتایج مربوط به مقایسه اثرات تمام لایه ها روی رفتار دینامیکی خطوط

با کاهش مدول الاستیسیته لایه های تشکیل دهنده خط بتنی رهدا ۲۰۰۰، سختی کل خط کاهش یافته و به ترتیب لایه هیدرولیکی، لایه بتنی، لایه محافظ یخ زدگی و تراورس ها بیشترین تاثیر را در رفتار دینامیکی قائم این خط دارند.

با افزایش ضخامت لایه های تشکیل دهنده خط بتنی رهدا ۲۰۰۰، سختی کل خط افزایش یافته و به ترتیب لایه بتنی و هیدرولیکی و لایه محافظ یخ زدگی بیشترین اثرگذاری را در رفتار دینامیکی قائم این خط دارند.

با کاهش مدول الاستیسیته لایه های تشکیل دهنده خط بتنی شینکانسن، سختی کل خط کاهش یافته و به ترتیب لایه هیدرولیکی و لایه بتنی بیشترین اثرگذاری را در رفتار دینامیکی قائم این خط دارند.

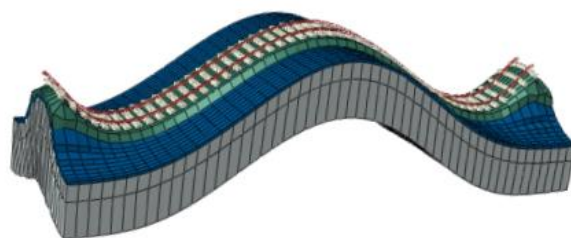
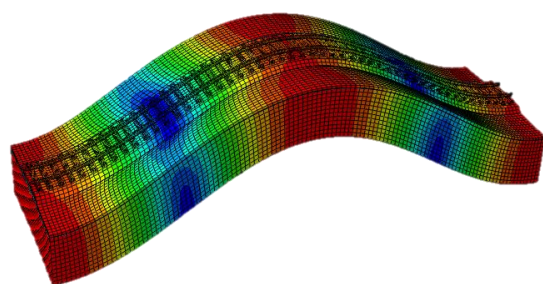
با افزایش ضخامت لایه های تشکیل دهنده خط بتنی شینکانسن، سختی کل خط افزایش یافته و به ترتیب لایه هیدرولیکی، لایه بتنی و لایه آسفالتی بیشترین تاثیر را بر رفتار دینامیکی قائم خط دارند.

## ۳-۵ پیشنهادات

۱. بررسی دقیق تر رفتار دینامیکی بستر خاکی با توجه به میزان اثرگذاری زیاد آن بر دینامیکی خط آهن و ارائه‌ی راهکارهایی برای کاهش اثرات مخرب آن.
۲. مطالعه‌ی تفاوت های بین مدلسازی ریل به صورت المان تیر و المان سه بعدی هشت گره ای و اثرات آن بر رفتار دینامیکی خط آهن.
۳. بررسی اثرات لایه ها در رفتار دینامیکی جانبی خطوط حمل و نقل سریع.
۴. مطالعه‌ی رفتار غیر خطی لایه ها.

## پیوست الف

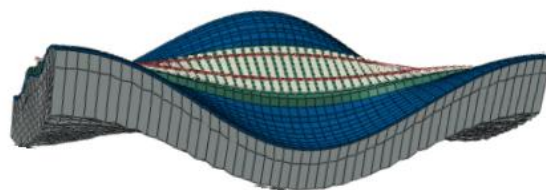
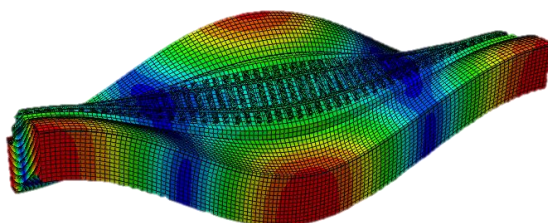
شکل مدهای ارتعاشی و فرکانس های طبیعی خط بالاستی مدلسازی شده در آباکوس، هماهنگ با شرایط مدلسازی مطالعه هوآن فنگ (۲۰۱۱) در زیر آورده شده است. لازم به ذکر است فرکانس های طبیعی بدست آمده در این مدلسازی با تقریب مناسب به فرکانس های طبیعی مطالعه هوآن فنگ نزدیک است (درصد خطا در زیر شکل محاسبه شده است).



مقدار خطا : ۲/۰۴ %

$$f = 1.8459 \text{ Hz}$$

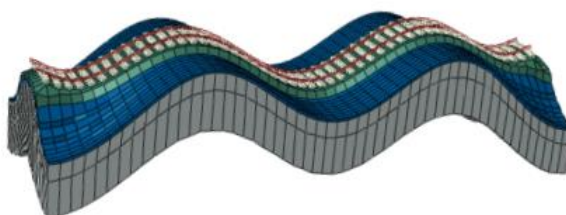
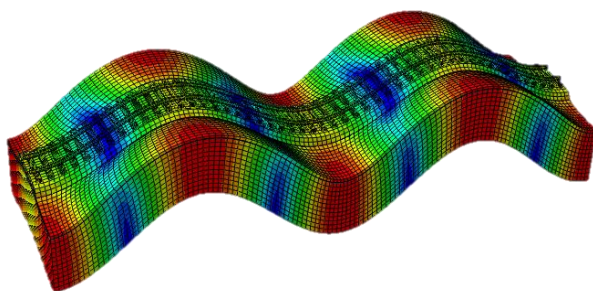
$$f = 1.8844 \text{ Hz}$$



مقدار خطا : ۵/۶۰ %

$$f = 2.4915 \text{ Hz}$$

$$f = 2.3574 \text{ Hz}$$



مقدار خطا : ۲/۴۵ %

$$f = 3.0064 \text{ Hz}$$

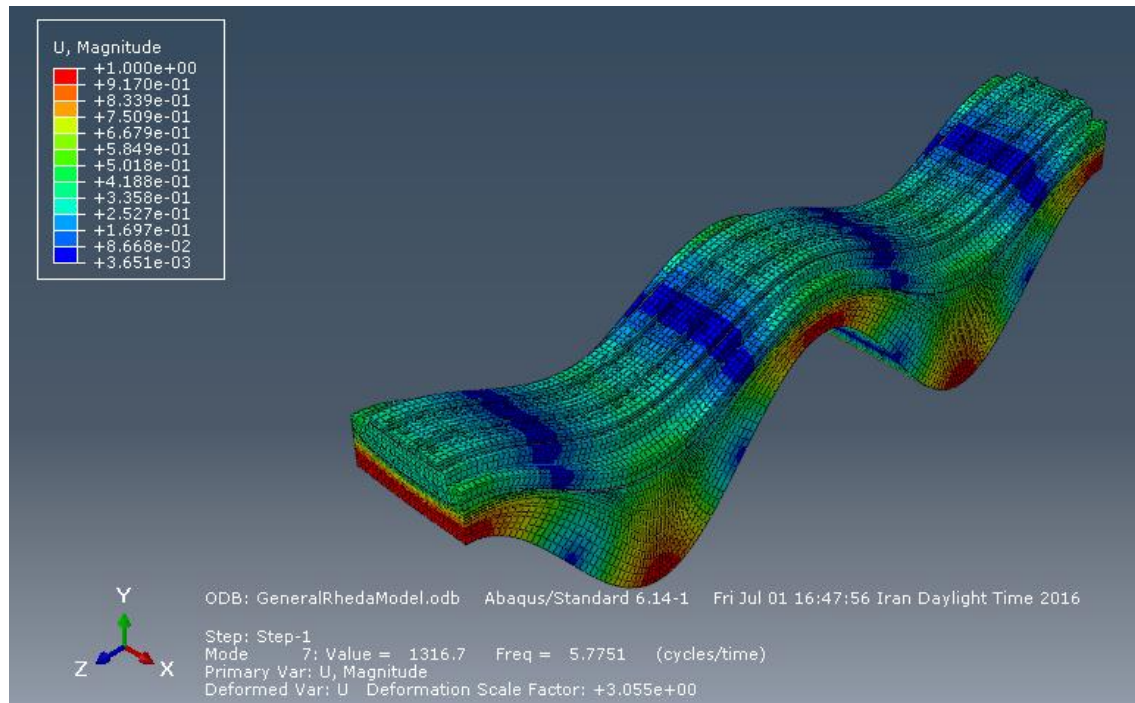
$$f = 3.0821 \text{ Hz}$$

(ب)

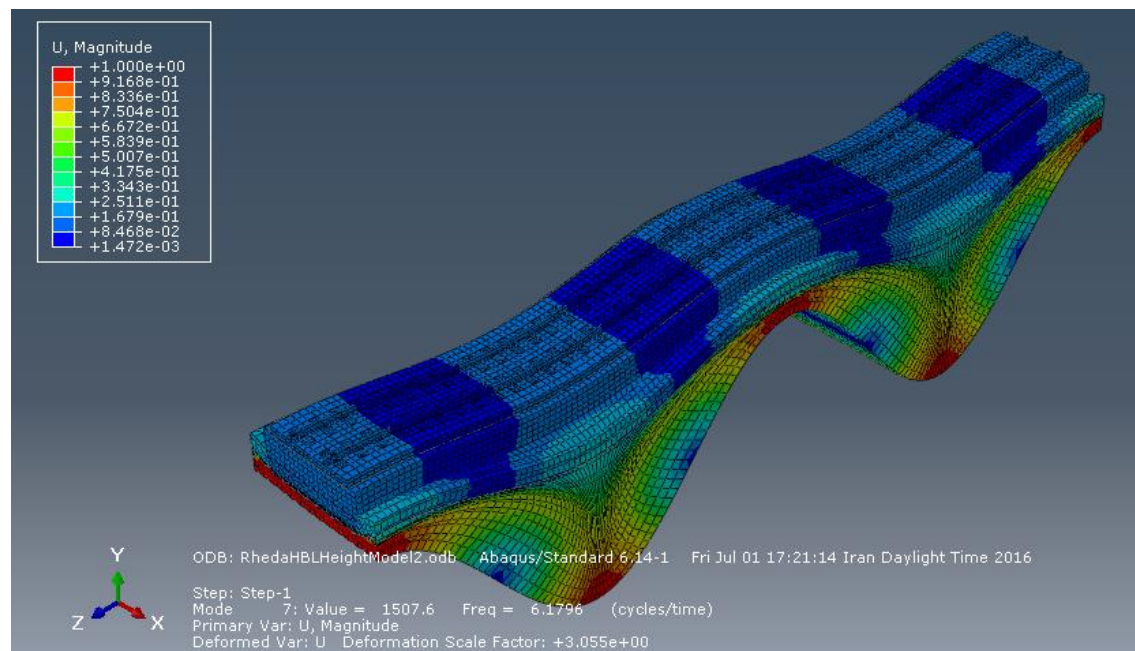
(الف)

شکل پ- ۱ : شکل مدهای ارتعاشی الف) خط بالاستی مطالعه هوآن فنگ، (۲۰۱۱) ب) مدل خط بالاستی

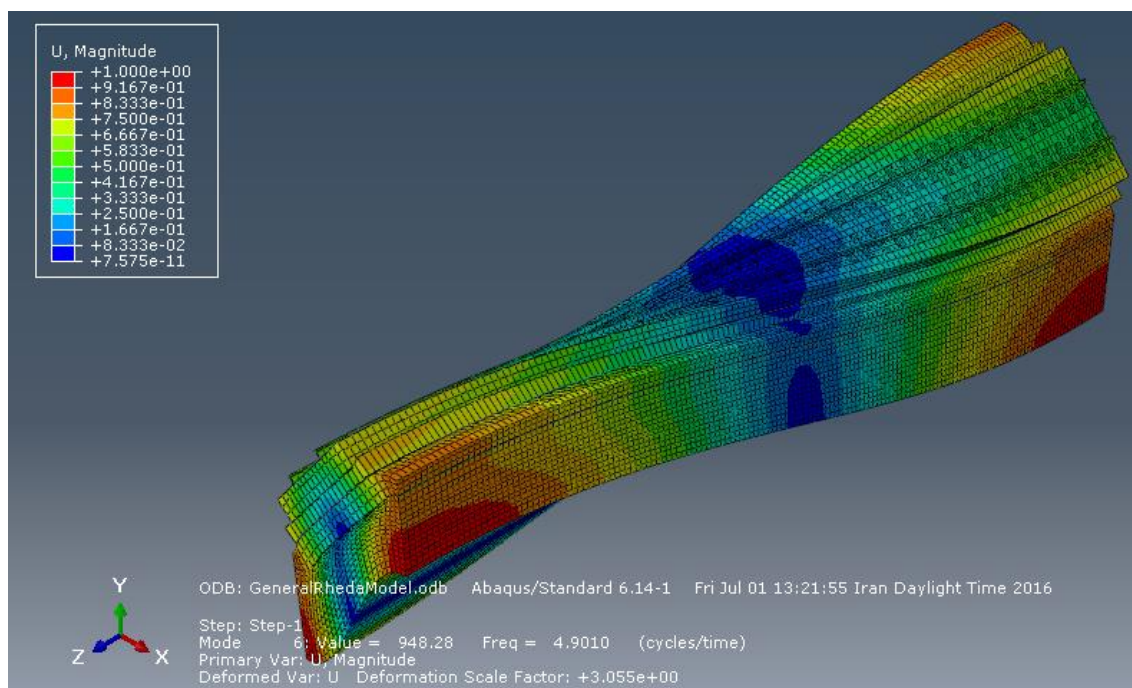
در شکل های زیر، تعدادی از شکل مدهای ارتعاشی خطوط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ و شینکانسن بدست آمده از مدلسازی آباکوس مشاهده می شود.



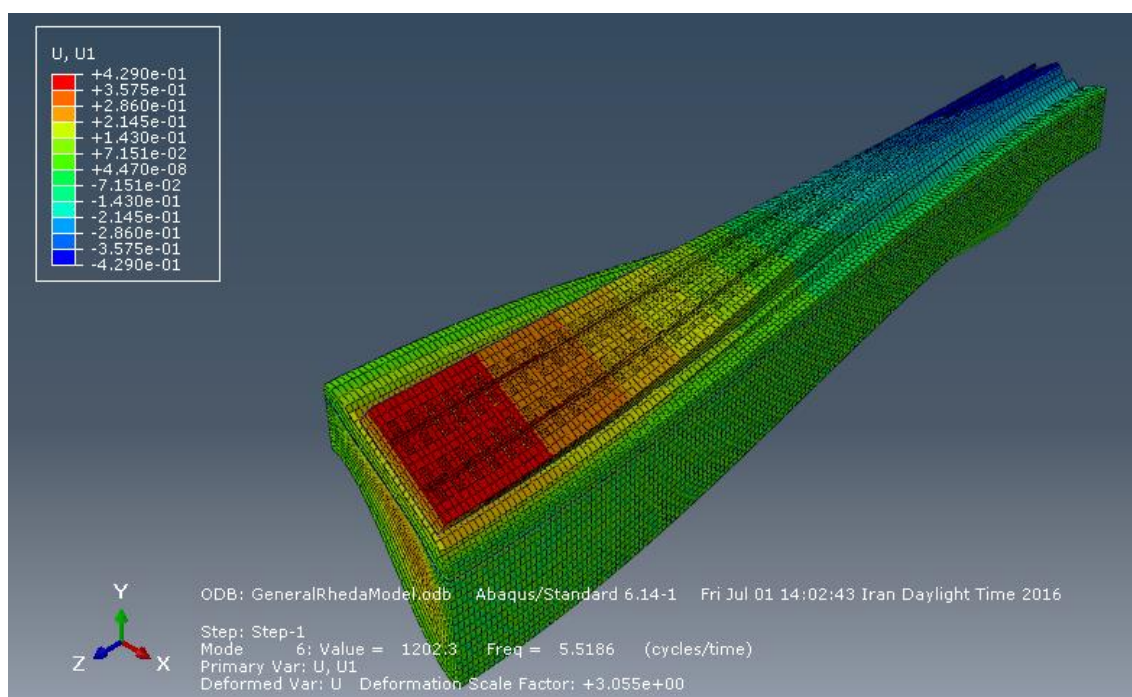
شکل پ- ۲: شکل مد ارتعاشی خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با دو برابر کردن ضخامت لایه هیدرولیکی



شکل پ- ۳: شکل مد ارتعاشی خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با سه برابر کردن ضخامت لایه هیدرولیکی

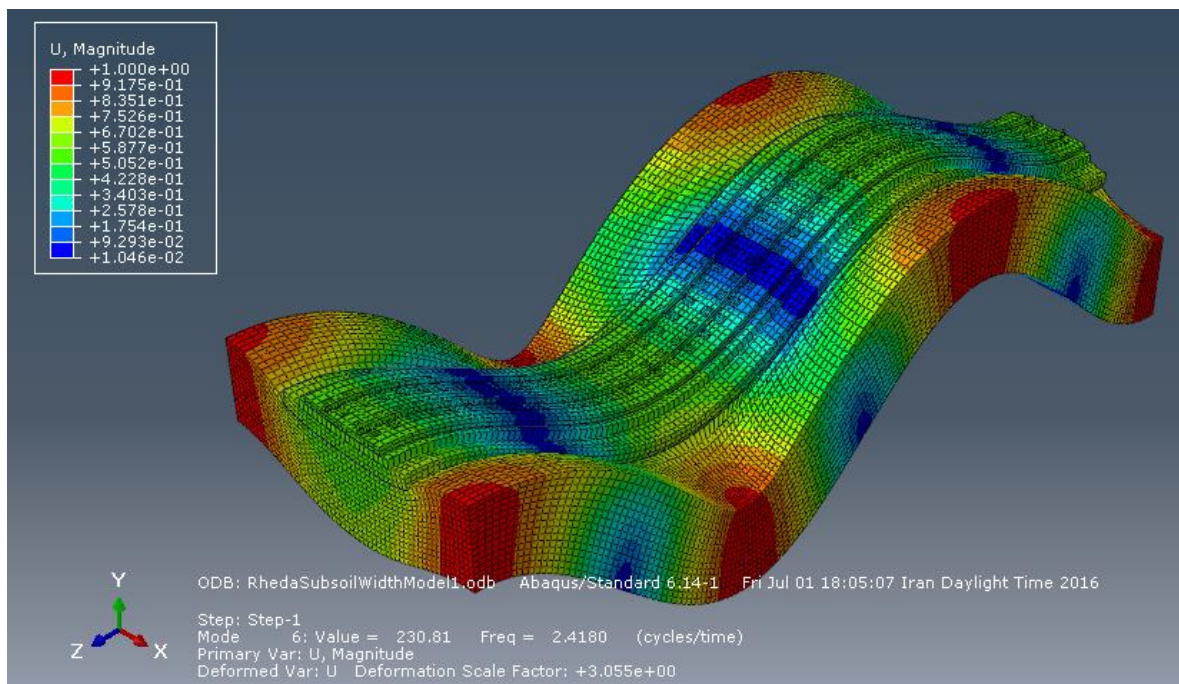


شکل پ-۴ : شکل مد ارتعاشی خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ با دو برابر کردن ضخامت لایه بتنی

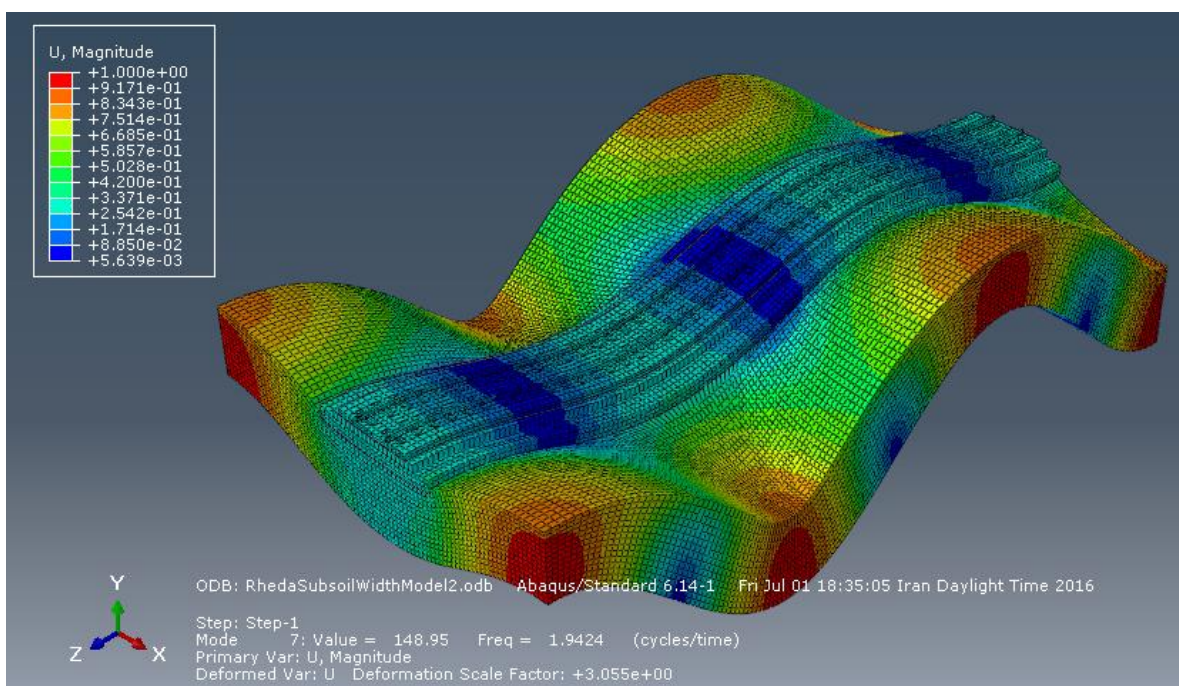


شکل پ-۵ : شکل مد ارتعاشی خط بتنی رهدا ۲۰۰۰ با سه برابر کردن ضخامت لایه بتنی

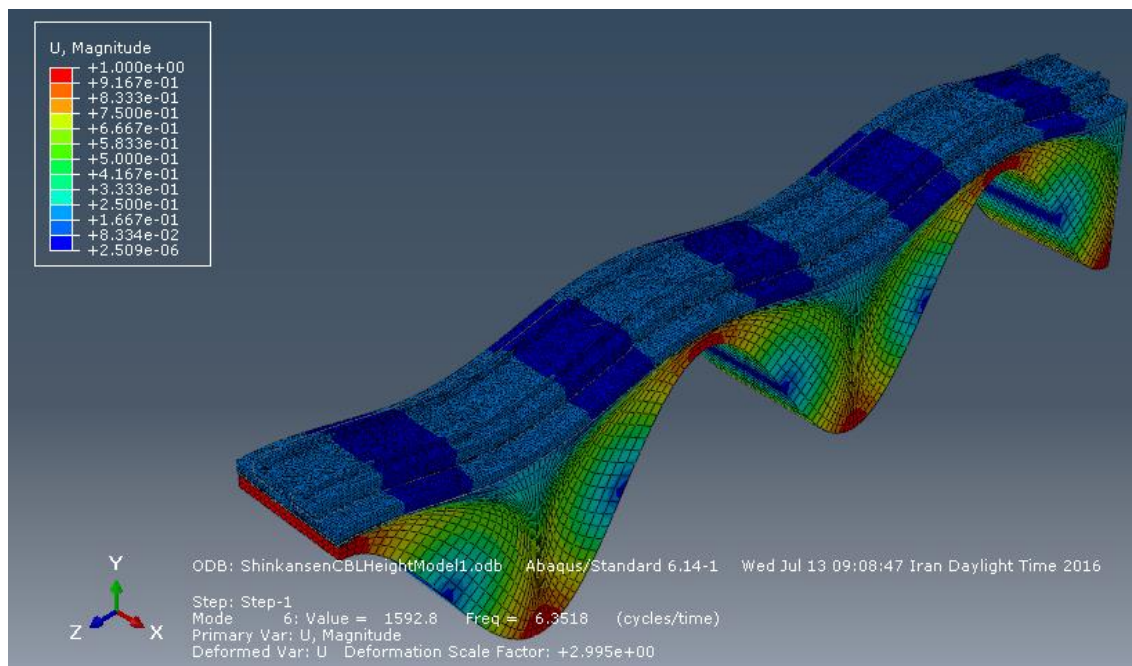




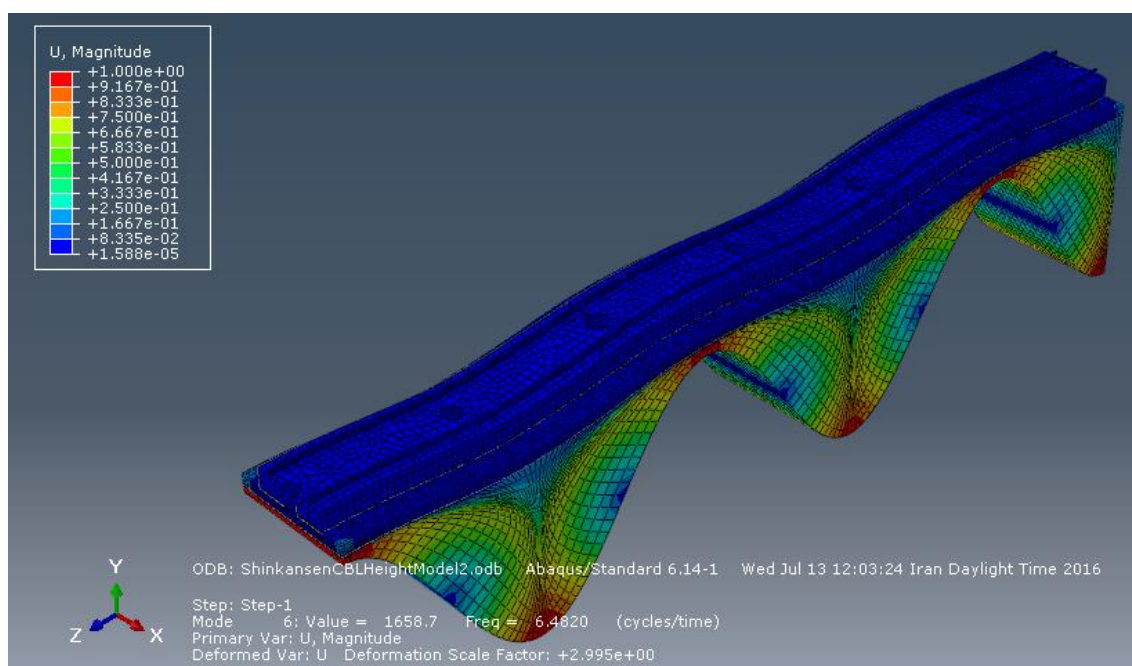
شکل پ-۶: شکل مد ارتعاشی خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با دو برابر کردن عرض بستر خاکی



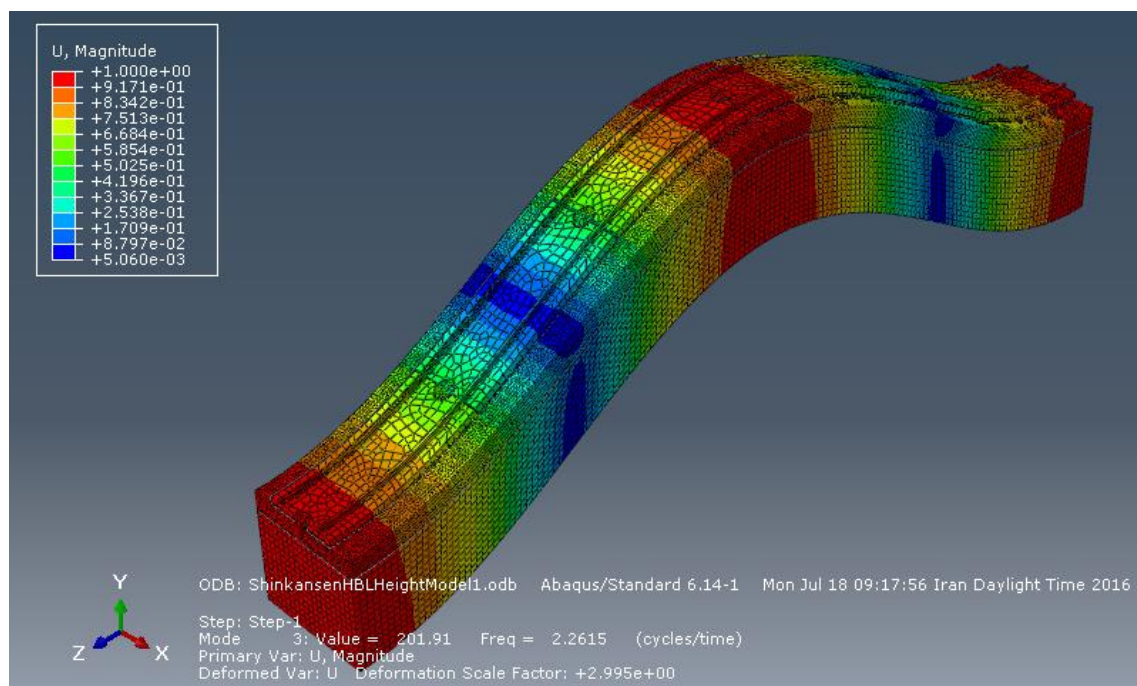
شکل پ-۷: شکل مد ارتعاشی خط بتنی ره‌دا ۲۰۰۰ با سه برابر کردن عرض بستر خاکی



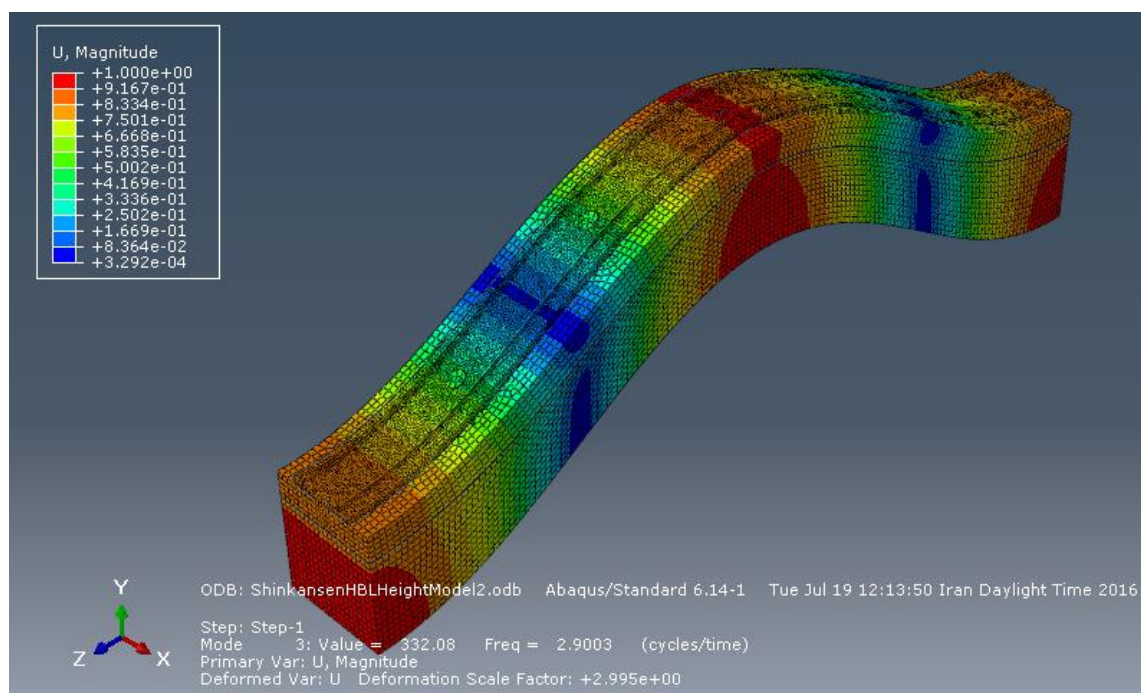
شکل پ- ۸ : شکل مد ارتعاشی خط بتنی شینکانسن با دو برابر کردن ضخامت لایه بتنی



شکل پ- ۹ : شکل مد ارتعاشی خط بتنی شینکانسن با سه برابر کردن ضخامت لایه بتنی



شکل پ- ۱۰ : شکل مد ارتعاشی خط بتنی شینکانسن با دو برابر کردن ضخامت لایه هیدرولیکی



شکل پ- ۱۱ : شکل مد ارتعاشی خط بتنی شینکانسن با سه برابر کردن ضخامت لایه هیدرولیکی



## منابع



برخورداری م.ع. و فلاحی ف، (۱۳۹۲) "انواع روسازی بدون بالاستی خطوط راه آهن و مزایا و معایب هر کدام و ارائه یک سیستم مناسب روسازی بدون بالاست در ایران"، اولین کنفرانس ملی زیر ساختهای حمل و نقل، تهران، پژوهشکده حمل و نقل، دانشگاه علم و صنعت ایران.

دستور العمل طراحی و نظارت بر روسازی راه آهن سریع السیر، (نشریه شماره ۳۹۴)، (۱۳۸۶)، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطر پذیری ناشی از زلزله، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری.

ذاکری ج.ع. و ممقانی ع.ن، (۱۳۸۸) "آنالیز دینامیکی سازه خط راه آهن در سرعت های بالا با استفاده از روش المان محدود"، دومین کنفرانس بین المللی پیشرفتهای اخیر در مهندسی راه آهن، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

مشخصات فنی و عمومی روسازی راه آهن، (نشریه شماره ۳۰۱)، (۱۳۸۴)، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطر پذیری ناشی از زلزله، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.

ABAQUS Online Documentation: Version 6.14.1 (2014)  
<http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/index.html>

Andersson, A. and Malm, R., (2004). "Measurement evaluation and FEM simulation of bridge dynamics".

Blanco-Lorenzo, J., Santamaria, J., Vadillo, E.G. and Oyarzabal, O., (2011). "Dynamic comparison of different types of slab track and ballasted track using a flexible track model. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers", Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 225(6), pp.574-592.

Budisa, M. "Advanced Track Design", USA.

Cai, Z. and Raymond, G.P., (1994). "Modelling the dynamic response of railway track to wheel/rail impact loading". Structural Engineering and Mechanics, 2(1), pp.95-112.

Chebli, H., Clouteau, D. and Schmitt, L., (2008). "Dynamic response of high-speed ballasted railway tracks: 3D periodic model and in situ measurements". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28(2), pp.118-131.

Craig, R.R. and Kurdila, A.J., (2006). “Fundamentals of structural dynamics”. John Wiley & Sons.

Dahlberg, T., (2003). “Railway track dynamics-a survey”. Linköping University.

Darr, E., (2000). “Ballastless track: design, types, track stability, maintenance and system comparison”. Railway Technical Review, pp.36-45.

De Man, A.P., (2002). “DYNATRACK: A survey of dynamic railway track properties and their quality”. TU Delft, Delft University of Technology.

Duffy, D.G., (1990). “The response of an infinite railroad track to a moving, vibrating mass”. Journal of Applied Mechanics, 57(1), pp.66-73.

Esveld, C. and De Man, A., (2003), “Use of railway track vibration behavior for design and maintenance”. International Association for Bridge and Structural Engineering, Symposium Report Vol. 87, No. 5, pp. 39-45

Esveld, C., (2001). “Modern railway track”. Second Edition. Delft University of Technology.

Esveld, C., (2003). “Recent developments in slab track”. European railway review, 9(2), pp.81-85.

Feng, H., (2011). “3D-models of railway track for dynamic analysis”. Royal Institute of Technology.

Gao, Y., (2013). “A 3D Dynamic train-track interaction model to study track performance under trains running at critical speed”. (Doctoral dissertation, Penn State University).

Grassie, S.L., Gregory, R.W. and Johnson, K.L., (1982). “The dynamic response of railway track to high frequency longitudinal excitation”. Journal of Mechanical Engineering Science, 24(2), pp.97-102.

International Union of Railways UIC. (2010). “High Speed around the World Maps”. UIC Lecture, Paris.

Irvine, T. (2000). “An introduction to frequency response functions”. Rapport, College of Engineering and Computer Science.

Irvine, T. (2000). "The Steady-state Response of a Single-degree-of-freedom System Subjected to a Harmonic Force". Revision A, Vibrationdata.

Irvine, T. (2013). "Calculating Transfer Functions from Normal Modes". Revision E, Vibrationdata.

Kalker, J.J., (1996). "Discretely supported rails subjected to transient loads". *Vehicle System Dynamics*, 25(1), pp.71-88.

Lei, X. and Zhang, B., (2010). "Analysis of dynamic behavior for slab track of high-speed railway based on vehicle and track elements". *Journal of Transportation Engineering*, 137(4), pp.227-240.

Lichtberger, B., (2005). "Track compendium: formation, permanent way, maintenance, and economics". Eurailpress.

Lou, P., Zhong, X.G., Tang, J.F. and Zeng, Q.Y., (2006). "Finite-element analysis of discretely supported rail subjected to multiple moving concentrated forces". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 220(3), pp.305-315.

Madshus, C., Kaynia, A.M., Harvik, L. and Holme, J.K., (1998). "A numerical ground model for railway-induced vibration". Skipp B O. *Ground Dynamics and Man-Made Processes: Prediction, Design and Management*. London: Thomas Telford, pp.45-55.

Meirovitch, L., (1967). "Analytical methods in vibration" (Vol. 16). Macmillan, New York.

Michas, G., (2012). "Slab track systems for high-speed railways".

Nguyen G, K., Goicolea R, J.M., and Gabaldón Castillo, F. (2011). "Dynamic Analysis of high Speed Railway Traffic Loads on Ballasted Track.", *Fifth International Symposium on Environmental Vibration*, Chengdu, China, October 20-22.

Oscarsson, J., (2001). "Dynamic train-track interaction: linear and non-linear track models with property scatter". Chalmers University of Technology.

Oyarzabal, O., Correa, N., Vadillo, E.G., Santamaría, J., (2011). "Modelling rail corrugation with specific-track parameters focusing on ballasted track and slab track". *Vehicle System Dynamics*, 49(11), pp.1733-1748.



Popp, K., Kruse, H. and Kaiser, I., (1999). "Vehicle-track dynamics in the mid-frequency range". *Vehicle system dynamics*, 31(5-6), pp.423-464.

Quante, F. (2001). "Innovative Track Systems Technical Construction." Project funded by the European Community, Directorate General Energy and Transport Under the 'Competitive and Sustainable Growth' Program, Karlsruhe.

Rail One, Rheda 2000 Ballastless Track System. <http://www.railone.com>.

Real, J., Zamorano, C.L.A.R.A., Asensio, T. and Montalbán, L., (2014). "Comparison of the effect of different sleeper typologies and track layout on railway vibrations". *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11(12), pp.2241-2254.

Real, T., Zamorano, C., Hernández, C., García, J.A. and Real, J.I., (2016). "Static and dynamic behavior of transitions between different railway track typologies". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(4), pp.1356-1364.

Shi, L., Cai, Y., Wang, P. and Sun, H., (2016). "A theoretical investigation on influences of slab tracks on vertical dynamic responses of railway viaducts". *Journal of Sound and Vibration*, 374, pp.138-154.

Skoglund, K. A. (2002), "A study of some factors in mechanistic railway track design". Norwegian University of Science and Technology.

Steenbergen, M.J.M.M., Metrikine, A.V. and Esveld, C., (2007). "Assessment of design parameters of a slab track railway system from a dynamic viewpoint". *Journal of Sound and Vibration*, 306(1), pp.361-371.

UIC Infrastructure Commission, (1999). "Feasibility Study Ballastless Track". Civil Engineering Support Group.

Zhu, S., Yang, J., Yan, H., Zhang, L. and Cai, C., (2015). "Low-frequency vibration control of floating slab tracks using dynamic vibration absorbers". *Vehicle System Dynamics*, 53(9), pp.1296-1314.





**Abstract:** In recent decades, the use of railway transport infrastructures has increased because of high safety, efficiency and little effects on the environment. This has led human to think about ways to speed up, increasing the capacity of cargos and better use of the trains. Due to the extreme limitations of ballasted tracks (e.g., speed and capacity limitations, etc.) and the high cost of repairing these tracks, using of slab tracks was replaced. Increased usage of slab tracks brought new challenges in railway track dynamics that requires a better understanding of it.

The aim of this thesis is to study the effects of dimensional and mechanical parameters of the track components (including the thickness of layers, elasticity modulus of layers, the distance of sleepers and fastenings and width of the subsoil layer) on vertical dynamic response of a three-dimensional model using the finite element method (FEM) with ABAQUS/CAE. Because of existence of varieties of slab tracks, two of the most widely used tracks in the world (Rheda 2000 and Shinkansen) has been studied. The finite element analysis was done based into two categories: eigenvalue analysis and steady-state dynamic analysis. The natural frequencies and corresponding vibration modes were extracted by using eigenvalue analysis and then by using steady-state dynamic analysis, frequency response functions of the track extracted. Track components have been studied separately, and a comparison between the effects of the layers on the dynamic behavior of track was investigated.

The results of this thesis shows that by decreasing the elasticity modulus of the track components leads to decreased resonance frequencies and increased vertical frequency responses of the track. Besides, increasing the thickness of layers leads to increased resonance frequencies and decreased vertical frequency response of the track. Elasticity modulus of HBL in Rheda 2000 and Shinkansen, the thickness of CBL in Rheda 2000 and thickness of HBL in Shinkansen are parameters which have the most effects on the dynamic behavior of this slab tracks.

**Keywords:** slab track modelling, track vertical dynamic behavior, FEM, frequency response function, resonance



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of civil engineering**

**MSc Thesis in transportation engineering**

**3D Modelling of slab track to study track frequency response**

By: Majid Gholizadeh

Supervisor:  
Dr Iman Aghayan

September 2016