

بررسی رفتار ارتعاشی دال خط ریل مدفون به روش عددی

مرتضی اسماعیلی، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

جبارعلی ذاکری، دانشیار دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

شیلا مسلمی پور (مسئول مکاتبات)، کارشناس ارشد مهندسی خطوط، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: sh_moslemi@engineer.com

پذیرش ۹۲/۰۶/۱۳

دریافت: ۹۲/۰۲/۲۱

چکیده

هدف از ارایه مقاله حاضر بررسی رفتار ارتعاشی سیستم ریل مدفون در اثر اعمال بار هارمونیک است. رفتار ارتعاشی این سیستم به طور عمده تابع الاستیسیته مصالح دورگیر ریل و هندسه شیار جاگذاری آن است. بررسی مطالعات انجام شده در زمینه این سیستم نشان می‌دهد که تاکنون تأثیر این پارامترها بر ارتعاشات منتشره محیطی مشخص نشده است. به این منظور در مطالعه حاضر مدل عددی اجزای محدود دال خط ریل مدفون با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS توسعه داده شده و نتایج آن در حالت استاتیکی با مدل ارایه شده توسط ایسولد و همکاران مقایسه و به این ترتیب مدل معتبر سازی شده است. سپس با توسعه مدل معتبر سازی شده در شرایط دینامیکی، بر روی پارامترهای هندسی شیار نشیمن ریل و مصالح الاستیک دورگیر آن به همراه دامنه بار هارمونیک و فرکانس آن، تحلیل حساسیت صورت گرفته و ارتعاشات محیطی بررسی شده است. نتایج تحلیلها نشان می‌دهد که مقدار مدول الاستیسیته ترکیب دورگیر، تأثیر بسزایی در میزان ارتعاشات داشته و با افزایش آن از ۱ به ۱۰ مگاپاسکال، به میزان این ارتعاشات به شدت افزوده شده است. همچنین با بررسی اثر هندسه شیار نشیمن ریل ملاحظه می‌شود که افزایش مساحت آن منجر به کاهش ارتعاشات منتشره در محیط اطراف می‌گردد. از سوی دیگر زمانی که دامنه بار هارمونیک اعمالی از ۱/۵ تن به ۹ تن افزایش یابد، دسی بل ارتعاشات محیطی بیشتر شده و با افزایش فرکانس آن، مقدار این ارتعاشات کاهش می‌یابد. بررسی نتایج ارتعاشی نشان می‌دهد که این پدیده، در فرکانس ۵ هرتز، بیشترین و در فرکانس ۵۰ هرتز کمترین مقادیر را به خود اختصاص داده است. در مجموع میزان ارتعاشات دال خط مذکور در فرکانس بار اعمالی بیشتر از ۶۰ هرتز قابل توجه نیست.

واژه‌های کلیدی: دال خط ریل مدفون، ارتعاشات محیطی، مدول الاستیسیته مصالح دورگیر ریل، هندسه شیار نشیمن، روش عددی اجزای محدود

۱. مقدمه

مربوط به کشور آلمان [DIN 4150, 1970]، استاندارد BS مربوط به کشور انگلیس [BS 5228-2, 2009]، استاندارد AS متعلق به کشور استرالیا [AS 2187.1-1998, 2006] و استاندارد GB/T مربوط به کشور چین [GB/T 50452, 2008] اشاره کرد. تمامی این آئین نامه ها و یا دستورالعملها مقادیر مجازی را برای سطوح ارتعاش و نویز زمینی پیشنهاد کرده اند. به طور نمونه بر اساس گزارش FTA (1995) برای سطوح ارتعاش زمینی، مقدار مجاز 72 V(dB) و برای سطوح نویز زمینی، مقدار مجاز 35(dB) بیان شده است. دو استاندارد حمل و نقل (1995) US-DOT-T-95-16 و (1998) US-DOT-293630-1 مدل‌های مختلفی را برای ارزیابی و پیش‌بینی صدا و ارتعاشات ناشی از ترافیک ریلی ارائه کرده‌اند. استاندارد بین‌المللی [ISO 2361-2-1989] ISO سطوح ارتعاش مجاز برای کنترل آزرده‌گی و بهبود بهره‌وری ساکنین فضاهای مسکونی را به طور دقیق مشخص نموده است.

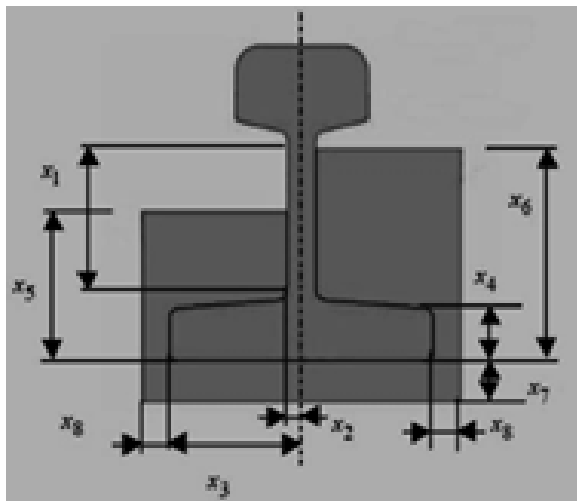
در سالهای اخیر، مطالعات مختلفی در مورد رفتار دال خط ریل مدفون صورت گرفته است. در سال 1998 Oostermei- jer رفتار دینامیکی آن را در خطوط پرسرعت [Esveld, 1998] و Siderius نیز در همان سال امکان استفاده از پلی استایرن منبسط شده به عنوان مصالح زیر اساس در ساختار ریل مدفون [De Man, A.P, 1998], [Esveld, et.al, 1998] را مورد بررسی قرار داده است. در ادامه و در همان سال پروژه ای تحت عنوان "ترافیک بی صدای قطار" انجام شد که طی آن یک دال خط ریل مدفون به همراه پروفیل ریل سازگار با آن برای کاهش شدت انتشار سر و صدا بکار گرفته شد [Suiker, A.S.J, 1997-part1], [Suiker, A.S.J, 1997-part 2]. در سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳ Esveld و همکاران مطالعه ای جهت طراحی بهینه سیستم ریل مدفون [Esveld, et.al, 1999-2003] و در سالهای ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵ مطالعاتی به منظور توسعه کاربرد سیستم ریل مدفون و بکارگیری آسفالت در این سیستم انجام داده‌اند

در طراحی خطوط ریلی، عواملی مانند هزینه چرخه عمر، زمان ساخت، در دسترس بودن و دوام پذیری نقش بسیار مهمی را ایفا می کنند. در این رابطه سیستم خطوط بدون بالاست فرصتهای خوبی را برای سازندگان، بهره برداران و مالکان خطوط ریلی فراهم کرده است. مزیت دیگر خطوط بدون بالاست را می توان در امکان بهره برداری در بارهای محوری و سرعتهای بیشتر نیز جستجو کرد. دال خط ریل مدفون نیز یکی از انواع خطوط بدون بالاست به شمار می رود که تاکنون سه نوع متفاوت آن در دنیا بکار گرفته شده است. این سیستمها عبارتند از سیستم ریل مدفون^۱، طرح خط عرشه‌ای^۲، سیستم ریل مدفون بالفوربتی^۳. طرح ریل مدفون ERS دارای تکیه‌گاه پیوسته ریل است که از یک ماده مرکب مانند ترکیب چوب‌پنبه و پلی اورتان^۴ تشکیل شده است. ریلها توسط ماده مرکب الاستیک در تمام پروفیل بجز کلاهک ریل در جای خود محکم می‌شوند [Monteban, 2010]. طرح خط عرشه ای مدلی از خطوط ریل مدفون با مقاومت خمشی بسیار بالا است و خصوصاً برای خاکهای نرم طراحی شده و شامل تیرهای بتنی پیوسته درجا یا پیش ساخته است که درون زمین نصب می‌گردند [Bos, and Stuit, 1999]. سیستم ریل مدفون بالفوربتی نیز همانند ERS بوده، با این تفاوت که بخش جدیدی به نام کلاهک گیرداری^۵ نیز در این سیستم قرار داده شده که اساساً باعث بهینه سازی و صرفه جویی اقتصادی می شود و تغییراتی را در عملکرد سیستم به وجود آورده است. [Balfour Beatty, 2009], [INNTRACK, 2008] با توجه به اهمیت زیست محیطی موضوع ارتعاشات خطوط ریلی، استانداردها و ضوابط آیین نامه ای متعددی توسط مراکز مختلف ارائه شده است که از آن میان می توان به آیین نامه FTA استاندارد TCRP [FTA, 1995] [US-DOT-T-95-16] و گزارش نهایی Jeffrey, et.al, 2010]، [Cal-] مربوط به کشور آمریکا، [Jeffrey, et.al, 2010]، [tran Vibration Manual(2004) مورد استفاده در ایالات کالیفرنیا] [Jones and Stokes, 2004]، استاندارد DIN

در این قسمت ابتدا دال خط ریل مدفون در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS در شرایط دو بعدی و کرنش مسطح شبیه سازی شده و نتایج آن تحت بار گذاری استاتیکی با کار ایسولد و همکاران [Esveld, et.al , 1999-2003] مقایسه شده است.

۱-۲ مشخصات اجزاء روسازی

در تحقیق مذکور از ریل UIC54 [UIC Code ,1986] احاطه شده درون یک ترکیب الاستیک، استفاده شده است. مشخصات هندسی ریل و شیارنشیمین و ابعاد مصالح دورگیر در جدول (۱) آمده است. جرم واحد طول این ریل $54/77 \text{ Kg/m}$ و ممان اینرسی آن $2337/9 \text{ cm}^4$ است. مدول الاستیسیته ریل $2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ و ضریب پواسون آن نیز $0/3$ در نظر گرفته شده است. مقدار ضریب پواسون و مدول الاستیسیته ترکیب دورگیر به ترتیب $0/46$ و $5/6 \text{ N/mm}^2$ است. شکل زیر هندسه ریل و ترکیب الاستیک را در نرم افزار ABAQUS نشان می دهد.



شکل ۱. ابعاد شماتیک ریل UIC54 و ماده الاستیک دور گیر در

سیستم ریل مدفون در فضای ABAQUS

[Markine, 2006]. Ludvigh در سال ۲۰۰۱ رفتار ارتعاشی دال خط ریل مدفون را از طریق انجام آزمایش هایی مورد بررسی قرار داده است [Ludvigh, 2001]. با توجه به تحقیقات انجام شده ملاحظه می شود که مطالعات اندکی در خصوص بحث ارتعاشات محیطی این سیستم روسازی بدون بالاست صورت گرفته و به طور ویژه مطالعه ای که در آن تأثیر مشخصات هندسی شیار نشیمین ریل و مشخصات الاستیک ماده دور گیر ریل بر این موضوع مورد بررسی قرار داده شده باشد ملاحظه نمی شود و بنابراین، مطالعه حاضر به بررسی این موضوع اختصاص داده شده است. برای این منظور در این مقاله دال خط ریل مدفون در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS به صورت دو بعدی مدل سازی شده و در حالت استاتیکی با کار انجام شده توسط ایسولد و همکاران مقایسه و معتبر سازی شده است [Esveld, et.al , 1999-2003]. سپس با توسعه مدل در شرایط دینامیکی و با در نظر گرفتن اجزای زیر سازی و محیط اطراف در سیستم ریل مدفون و در شرایط اعمال بار هارمونیک ناشی از عبور قطار، رفتار ارتعاشی دال خط و انتشار امواج به محیط اطراف نیز مورد بررسی قرار داده شده است. در این راستا بر روی پارامتر های مختلفی همچون پارامتر های هندسی شیارنشیمین ریل و مشخصات الاستیک ماده دورگیر ریل نیز مطالعه پارامتری انجام و تاثیر تغییر آنها بر دامنه ارتعاشات محیطی مورد بررسی قرار داده شده است. با توجه به کاربری عمدتاً درون شهری این سیستم روسازی، یکی از نکات حائز اهمیت کنترل صدا و ارتعاشات در آن خواهد بود. در این سیستم دال خط معمولاً با دید کاهش ارتعاشات، ماده الاستیکی در محل نشیمین ریل مدفون بکار گرفته می شود، اما در خصوص مشخصات بهینه آن در ادبیات فنی کمتر صحبت شده است.

۲. توسعه مدل عددی اجزای محدود جهت تحلیل رفتار استاتیکی سیستم ریل مدفون

جدول ۱. اندازه متغیرهای هندسی ریل و ترکیب الاستیک

متغیرهای طراحی	اندازه (mm)
X ₁	۸۰
X ₂	۸
X ₃	۱۵
X ₄	۲۵
X ₅	۷۹/۵
X ₆	۱۰۵
X ₇	۱۰
X ₈	۱۵

مکان جانبی ریل Ux و تنشهای بیشینه^۷ در ترکیب الاستیک باید کمتر از مقادیر مجاز آنها باشند. در اینجا مقدار مجاز تغییر مکان جانبی برابر ۰/۰۰۲ متر و حداکثر تنش کششی در هر نقطه ای از ترکیب الاستیک به مقدار تنش مجاز σ_{allow} محدود گردیده است. مقدار این تنش از روابط زیر به دست می آید. در حالت دوم کمانش قائم ریل بررسی شده است. در این سیستم روسازی کمانش ریل زمانی اتفاق می افتد که هیچگونه چسبندگی و اتصالی بین ریل و ترکیب الاستیک وجود نداشته باشد. برای کنترل این موضوع، باری قائم به اندازه 10kN به سمت بالا بر تاج ریل اعمال شده است [Esveld, et.al, 1999-2003].

$$\sigma_{tens,max} = 0.09E + 0.8 \quad [MPa] \quad (1)$$

$$\sigma_{allow} = 0.9\sigma_{tens,max} \quad (2)$$

در رابطه بالا $\sigma_{tens,max}$ حداکثر تنش کششی ترکیب و E مدول الاستیسیته ترکیب بوده و مقدار آن بین ۱ تا ۱۰ مگاپاسکال است.

۲-۴ مقایسه نتایج تحلیل های عددی

جدول ۲ مقادیر تغییر مکان جانبی و تنش بیشینه در ترکیب و نیروی کمانش ناشی از مدل تحقیق و مدل موجود در مرجع یاد شده را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود نتایج با اختلاف کمی به هم نزدیک اند. بر این اساس می توان ادعا کرد که مدل عددی حاضر را می توان در بخشهای آتی برای بررسی رفتار ارتعاشی سیستم روسازی ریل مدفون بکار گرفت.

۲-۲ شرایط مرزی

در سمت راست و چپ و زیر ترکیب الاستیک مدل توسعه داده شده، تکیه گاه هایی قرار داده شده که از حرکت در راستای محورهای افقی و قائم و چرخش حول محور Z جلوگیری شود.

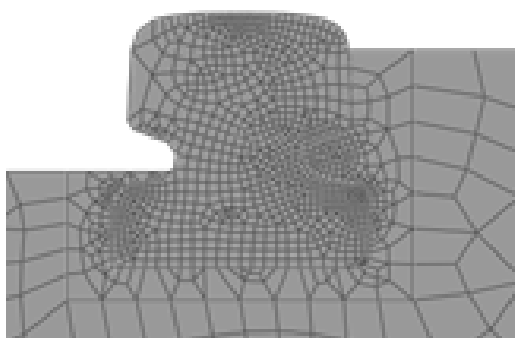
۲-۳ بارگذاری استاتیکی

با توجه به مرجع مورد استفاده دو نوع بارگذاری استاتیکی بر روی مدل صورت گرفته است. این بارگذاری ها برای به دست آوردن مقادیر پاسخ استاتیکی سازه جهت ارزیابی طراحی سیستم ریل مدفون است. در حالت اول یک بار افقی به اندازه 12/2kN و یک بار قائم به اندازه 30/4kN در تراز 0/5m ریل اعمال شده اند. به منظور طراحی بهینه تغییر

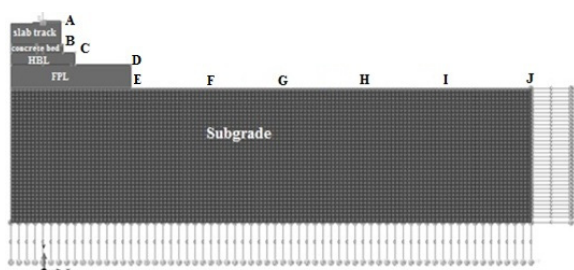
جدول ۲. مقایسه نتایج مدل تحقیق و مدل مقاله مذکور

پارامتر مورد بررسی	مدل عددی مرجع [Esveld, et.al, 1999-2003]	مدل تحقیق حاضر	مقدار خطا
Ux (mm)	۱/۸۳	۱/۸۶	٪۳
σ (Pa)	۱۰۷۱۴۷۰	۱۱۰۰۲۶۸	٪۲/۸۷
Pbckl (MN)	۱۲/۵	۱۳/۳۸	٪۰/۸۸

همان بستر طبیعی زمین بوده و با کمک ماشین آلات مکانیکی و راهسازی متراکم و کوبیده می شود تا به مدول الاستیسیته حدود 45 N/mm^2 برسد. مشخصات کلیه اجزای سیستم در جدول ۱ مشخص شده است. برای بیان اتصال ریل به مصالح دورگیر و همچنین مصالح دورگیر و همچنین مصالح دورگیر به نشیمن بتنی، از گزینه اتصال کامل^{۱۳} استفاده شده است. شکل‌های ۳ و ۴، شکل کلی سیستم را نشان می دهند. همچنین میراگرهایی برای استهلاک ارتعاشات در سمت راست و زیر لایه سابگرید قرار داده شده که در شکل ۴ نشان داده شده اند. [Eisenmann and Leykauf, 2000]



شکل ۲. ریل SA۴۲ و ترکیب الاستیک در فضای ABAQUS



شکل ۳. شکل کلی مدل سیستم ریل مدفون در فضای ABAQUS

۳. توسعه مدل جهت تحلیل ارتعاشی سیستم ریل مدفون

در این بخش، مدل ساخته شده در بخش قبل برای انجام تحلیل های دینامیکی توسعه داده می شود. برای این منظور ضمن منظور کردن لایه های زیرسازی دال خط ریل مدفون در تحلیل، محیط اطراف نیز مدلسازی شده و رفتار ارتعاشی سیستم روسازی تحت تأثیر بارگذاری هارمونیک مورد بررسی قرار داده می شود. از آنجا که هدف اصلی تحقیق، بررسی ارتعاشات محیطی است، نقاط کلیدی سیستم به همراه نقاط پیرامونی مدل مد نظر قرار داده شده و سرعت ارتعاش در آنها مورد بررسی قرار داده می شود. در این مدل، دال خط ریل مدفون SA42، ترکیب الاستیک^{۱۴}، دال بتنی، بستر بتنی^{۱۵}، لایه متصل هیدرولیکی^{۱۶} HBL، لایه محافظ در برابر یخبندان^{۱۷} FPL و لایه بستر طبیعی^{۱۸} در نظر گرفته شده و برای شرایط دو بعدی شرایط کرنش مسطح توسعه داده شده است.

۱-۳ هندسه و اجزاء مدل

در این مدل از هندسه ریل SA۴۲ مطابق آنچه که در شکل ۲ نشان داده شده استفاده شده است. در تمامی دال خط های ریل مدفون، قرار گرفتن یک نوار الاستیک و یا یک ترکیب لاستیکی در زیر ریل طرحی متداول است در این تحقیق اندازه عرض و ارتفاع این ترکیب الاستیک با استفاده از استاندارد تهیه شده توسط شرکت هلندی [Crow, 2001] مشخص شده است. دال خط بتنی در این سیستم روی یک بستر بتنی با مقاومت کافی قرار داده می شود که معمولاً دارای حداقل آرماتور تسلیح است. پس از این لایه بتنی، لایه متصل هیدرولیکی قرار دارد که آن نیز متشکل از مصالح بتنی بوده و دارای مقاومت فشاری و خمشی نسبتاً بالاست. لایه محافظ یخبندان بر روی بستر طبیعی زمین قرار گرفته و به کمک روشهای متفاوت ژئوتکنیکی، تقویت و تا بیش از ۹۸٪ متراکم می شود. در نهایت لایه سابگرید قرار داشته که این لایه تحتانی ترین لایه سیستم خط است و

جدول ۳. مشخصات روسازی سیستم ریل مدفون [Eisenmann and Leykauf, 2000]

اجزای خط	جرم مخصوص kg/m ^۳	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون	عرض (mm)	ضخامت (mm)
ریل SA۴۲	۷۸۵۰	۲×۱۰۵	۰/۳	۸۰	۸۰
ترکیب الاستیک	۱۰۰۰	۱-۱۰	۰/۴۶	۱۶۰-۲۲۰	۱۱۰-۲۰۰
دال بتنی	۲۴۰۰	۳×۱۰۴	۰/۲	۱۲۵۰	۶۰۰
بستر بتنی	۲۴۰۰	۳×۱۰۴	۰/۲	۱۳۰۰	۲۰۰
لایه متصل هیدرولیکی (HBL)	۲۳۰۰	۱۰۴	۰/۲	۱۶۰۰	۳۰۰
لایه محافظ یخبندان (FPL)	۱۸۰۰	۱۲۰	۰/۳۵	۳۰۰۰	۶۰۰
لایه بستر طبیعی (Subgrade)	۱۷۰۰	۴۵	۰/۴	۱۳۰۰۰	۳۴۰۰

۲-۳ المان بندی و شرایط مرزی

مدلسازی در شرایط کرنش صفحه ای، المان مسطح و به صورت دو بعدی صورت گرفته است. مش بندی کلیه اجزا نیز با ابعاد ۵۰ mm بوده و فقط لایه بستر طبیعی دارای مشهای ۱۰۰ میلیمتری است. به دلیل بارگذاری به صورت قائم و تقارن محوری، نصف سازه مدل شده و بار وارده نیز، بار چرخ است. در سمت چپ مدل تکیه گاه های غلتکی تعبیه شده که از جابجایی در راستای محور X و چرخش حول محورهای Y و Z جلوگیری شود. همچنین از حرکت و چرخش میراگرهایی که به منظور استهلاک ارتعاشات در اطراف سیستم تعبیه شده اند، در راستای هر سه محور و حول آنها ممانعت شده است. مقدار ضرایب میرایی نیز از رابطه زیر محاسبه شده است.

$$C = \rho \cdot V \cdot A \quad (۳)$$

در این رابطه ρ چگالی لایه، V سرعت موج طولی در هر لایه و A مساحت سطح بارگیر المان در مرز است.

۳-۳ مشخصات بارگذاری هارمونیک

یکی از تکنیکهای منظورکردن بار دینامیکی قطار، معادل کردن آن با بار هارمونیک است. عملاً در بررسی رفتار دینامیکی یک سیستم یا باید قطار را به صورت متحرک در نظر گرفت و یا باید به جای حرکت بار آنرا به صورت هارمونیک در سیستم اعمال کرد. در این مقاله، با هدف ساده سازی روند تحلیل از گزینه دوم برای در نظر گرفتن اثرات دینامیکی ناشی از حرکت قطار استفاده شده است. با توجه به بررسی های صورت گرفته مشخص شده که یکی از انواع قطارهای عبوری از سیستم ریل مدفون، قطار پر سرعت Thalys با سرعت سیر ۲۲۳ تا ۳۱۴ km/h است. این قطار متشکل از ۲ لوکوموتیو و ۸ واگن بوده طول کلی آن ۲۰۰/۱۸ متر است. لوکوموتیوها از طریق ۲ بوژی هدایت شده و چهار محوری هستند. واگنهای میانی دارای بوژی های مشترک بوده و به طور کلی این قطار دارای ۱۳ بوژی، در نتیجه تعداد محورهای آن ۲۶ است. همچنین بار چرخ این قطار بین ۱/۵ تا ۹ کیلونیوتن و فرکانس بار ۵ تا ۲۵۰ هرتز متغیر است [Degrande and Schillemans, 2001]. در این تحقیق، بارگذاری اعمالی بر مدل به صورت هارمونیک بوده و در

سوئد [1992] SS 460 48 61) مقادیر ۹-۱۰ متر بر ثانیه و ۶-۱۰ متر بر مجذور ثانیه به ترتیب برای سرعت و شتاب مرجع مورد استفاده قرار می گیرد. [Adam, and von Estorff, 2005] در اینجا مقدار X_0 ، ۸-۱۰ در نظر گرفته شده است .

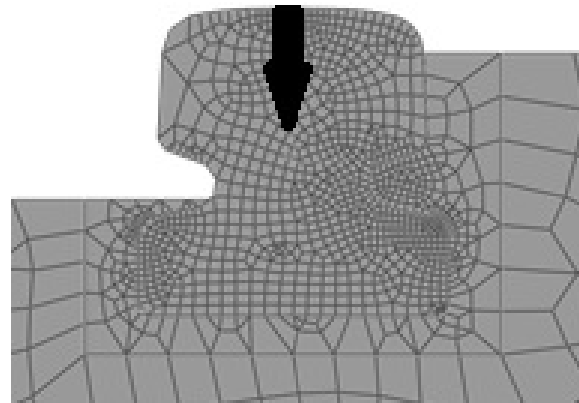
$$dB = 20 \cdot \log \left(\frac{X}{X_0} \right) \quad (4)$$

۵. مطالعه پارامتری و تفسیر نتایج عددی

با توجه به بررسیهای صورت گرفته در خصوص سیستم ریل مدفون، مشخص شده که مطالعه ای در زمینه ارتعاشات محیطی سیستم صورت نگرفته است. همچنین آنالیز حساسیت با تغییر ابعاد هندسی شیار ریل مدفون و خصوصیات الاستیک ترکیب الاستیک دورگیر ریل انجام نشده است. با توجه به اهمیت ترکیب الاستیک ریل و شیار سیستم در تولید ارتعاشات، این بخش از مقاله به آنالیز حساسیت بر روی تغییر دامنه بار و فرکانس برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته و ابعاد مختلف ترکیب الاستیک اختصاص یافته است . این آنالیزها برای دامنه بار ۱/۵ تا ۹ تن و فرکانس بار ۱۰ تا ۱۲۰ هرتز [Degrande and Schillemans, 2001] انجام شده و مقدار مدول الاستیسیته نیز بین ۱ تا ۱۰ مگاپاسکال متغیر [Esveld, et.al , 1999-2003] در نظر گرفته شده است . ابعاد ترکیب الاستیک که شامل عرض و ارتفاع آن است به ترتیب بین ۱۶۰ تا ۲۲۰ میلی متر و ۱۱۰ تا ۲۰۰ میلی متر [Crow, 2001] انتخاب شده است . آنالیز حساسیت ابتدا برای بارهای ۵ و ۹ تن در فرکانس ۱۰ هرتز مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۶) . نتایج این آنالیزها برای نقاط (A تا J) مطابق شکل ۳ ارائه شده است .

همان طور که ملاحظه می شود زمانی که فرکانس ثابت است، با افزایش بار دسی بل ارتعاش و سرعت افزایش پیدا می کند. نقطه اوج در هر دو حالت بارگذاری نقطه D بوده و این نقطه بر روی لایه FPL واقع شده است. این افزایش تا نقطه E که محل تماس لایه های FPL و سابگرید است،

وسط تاج ریل اعمال شده است (شکل ۵). بار چرخ برابر ۱/۵ ، ۵ و ۹ تن فرض شده است . همچنین فرکانسهای بار ۱۰ ، ۲۰ ، ۳۵ ، ۵۰ هرتز و بالاتر در نظر گرفته شده و برای بارگذاری های مذکور آنالیز حساسیت انجام شده است. زمان لازم برای بارهای اعمالی و فرکانسهای بار مذکور ۲ ثانیه در نظر گرفته شده است .



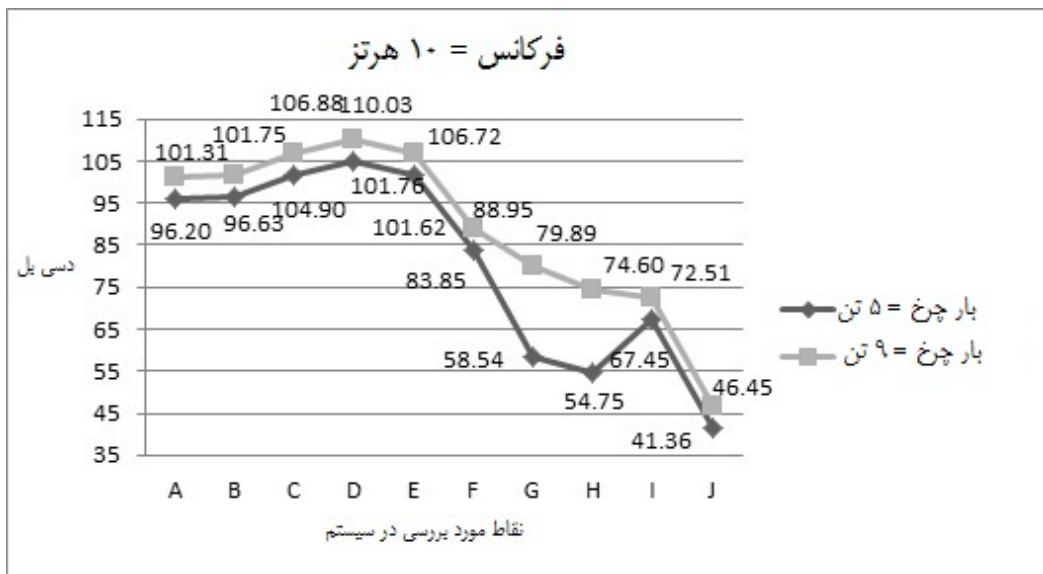
شکل ۵. بارگذاری قائم در فضای ABAQUS

۴. کمیتهای موجود برای محاسبه ارتعاش

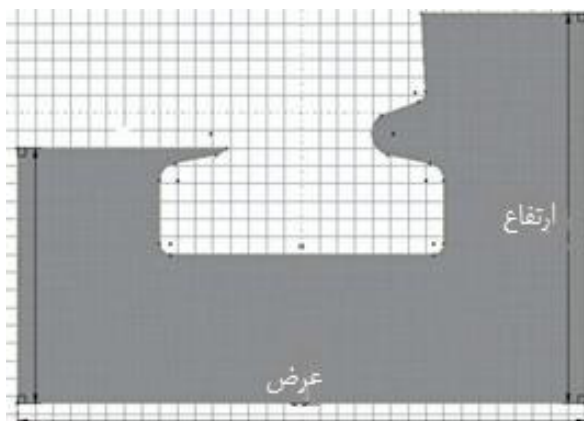
ارتعاش به صورت تغییر مکان، سرعت، یا شتاب قابل بیان است. گاهی جهت توصیف ارتعاش از واحد دسی بل نیز استفاده می شود. بنابر نوع کاربرد معمولاً از واحد دسی بل یا سرعت ذره (متر بر ثانیه) استفاده می گردد. [Adam and von Estorff, 2005]

۴-۱ دسی بل

کمیت دسی بل مطابق با رابطه زیر تعریف می گردد که در آن، X_0 ، کمیت مرجع است که بسته به نوع کشور و استاندارد مورد نظر، سرعت یا شتاب ذره انتخاب می شود. در آمریکا مقدار ۶-۱۰ متر بر ثانیه به عنوان مقدار مرجع برای سرعت ذره در نظر گرفته می شود و در کشورهای اروپایی سرعت مرجع دارای مقادیر متفاوتی از جمله ۹-۱۰ ، ۸-۱۰×۵ ، ۸-۱۰ متر بر ثانیه است. برای مثال در استاندارد



شکل ۶. بررسی نتایج آنالیز حساسیت در نقاط A تا J مشخص شده در شکل ۳



شکل ۷. ترکیب الاستیک در نرم افزار ABAQUS

جدول ۵. مشخصات هندسی ترکیب های الاستیک

مدل	عرض (میلیمتر)	ارتفاع (میلیمتر)	حجم (میلیمتر مکعب)
۱	۱۹۰	۱۵۵	۲۲۴۱۶۹۰۰
۲	۲۲۰	۲۰۰	۳۶۳۹۶۹۰۰
۳	۱۶۰	۲۰۰	۲۵۵۳۶۹۰۰
۴	۱۶۰	۱۱۰	۱۱۱۳۶۹۰۰
۵	۲۲۰	۱۱۰	۱۶۵۹۶۹۰۰

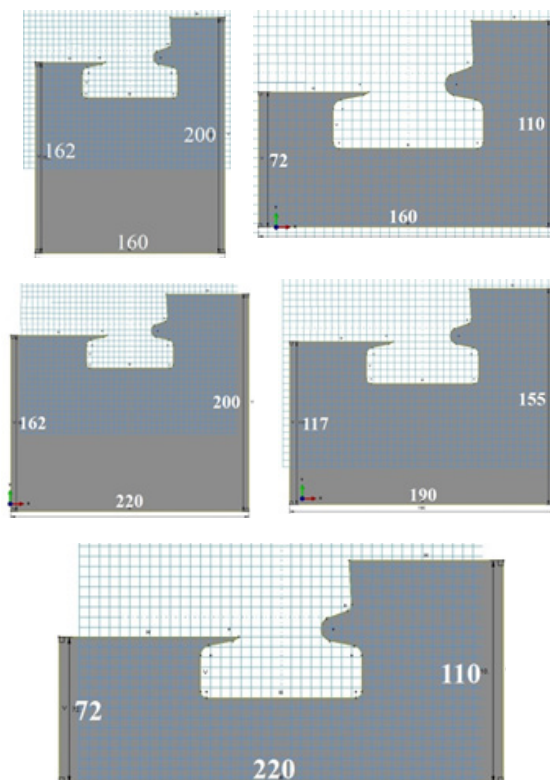
ادامه یافته و سپس کاهش پیدا می کند. بنابراین بیشترین ارتعاشات ابتدا در نقطه D و سپس در نقطه E که به ترتیب در لایه محافظ یخبندان و محل تماس این لایه با لایه سابگرید قرار گرفته اند، به وجود آمده است. پس این دو نقطه به عنوان نقاط بحرانی سیستم در نظر گرفته شده و در ادامه نتایج تحلیل ارتعاشی در این نقاط ارایه خواهد شد.

۱-۵ بررسی تاثیر ابعاد شیار نشیمن ریل بر ارتعاشات نقاط بحرانی مدل های مختلف شیار نشیمن ریل با تغییر ابعاد عرض و ارتفاع آن در نرم افزار ABAQUS ساخته شده است. مقدار مدول الاستیسیته مصالح دور گیر ریل نیز برابر ۱ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. ۵ مدل مختلف همانگونه که در جدول ۵ ملاحظه می شود، برای ترکیب الاستیک در نظر گرفته شده و تاثیر هندسه این ترکیب بر ارتعاش وارده به محیط اطراف بررسی شده است. بدین منظور حجم ترکیب الاستیک دور گیر ریل برای هر کدام از مدل ها در جدول نشان داده شده است. شکل ۶ مدل های مختلف این ترکیب را نشان می دهد.

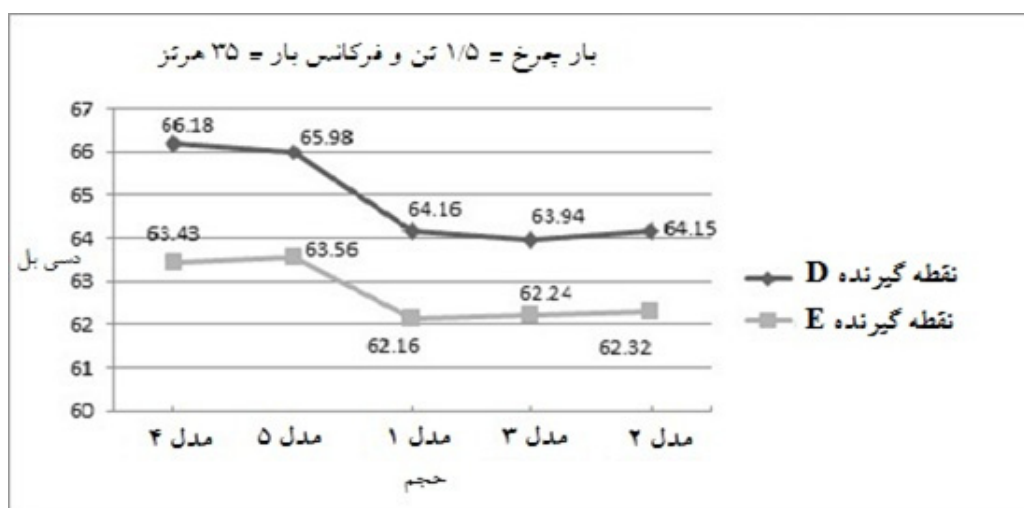
در شکل ۸ ترکیب های الاستیکی که مشخصات آنها در جدول ۵ آمده است، نشان داده شده اند .

آنالیز حساسیت روی مدل های ساخته شده با در نظر گرفتن بار $1/5$ تنی برای چرخ و فرکانس 35 هرتز انجام شده و نتایج برای دو نقطه D و E در قالب نمودار آورده شده است . شکل ۹ نتیجه آنالیز حساسیت را نشان می دهد .

همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود تقریباً می توان گفت که با افزایش حجم ترکیب الاستیک، دسی بل ارتعاشات کاهش پیدا کرده است. البته اثر افزایش حجم چندان چشمگیر نبوده، اما روند ارتعاشات به طور کلی رو به کاهش است. در نقطه D وقتی حجم ترکیب از مدل ۴ به مدل ۳/۲۷ برابر شده، مقدار دسی بل ارتعاشات به اندازه $2/03$ دسی بل کاهش پیدا کرده است. بنابراین افزایش حجم منجر به کاهش ارتعاشات در سیستم می شود. البته توجه به این نکته ضروری است که مقدار ارتعاشات از مدل ۳ به مدل ۲، به اندازه $0/21$ دسی بل افزایش یافته است. مشابه همین اتفاق نیز در نقطه E رخ داده است. با این تفاوت که با افزایش حجم از مدل ۴ به مدل ۵، ارتعاش افزایش یافته و با رسیدن به مدل ۱ کاهش می یابد. در قسمت اول نمودار ارتفاع در هر دو مدل 110 mm بوده، اما عرض از 160 به 220 افزایش یافته است.



شکل ۸. ترکیب الاستیک در ابعاد مختلف



شکل ۹. اثر افزایش مدول الاستیسیته بر ارتعاشات محیطی

باشد، با در نظر گرفتن بیشترین مقدار مجاز برای عرض، مقدار ارتعاشات افزایش پیدا خواهد کرد.

۵-۱-۲ بررسی اثر ارتفاع شیار نشیمن بر ارتعاشات

با توجه به جدول ۴، عرض مدل‌های ۲ و ۵ با هم یکی بوده و دارای بیشترین مقدار مجاز هستند. اما مقدار ارتفاع در مدل ۵ کمتر از مدل ۲ بوده و مشاهده می‌شود که دسی بل ارتعاشات در مدل ۵ از مدل ۲ بیشتر است. بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که زمانی که مقدار عرض ثابت یا دارای بیشترین مقدار ممکن باشد، افزایش ارتفاع نیز منجر به کاهش ارتعاشات می‌شود.

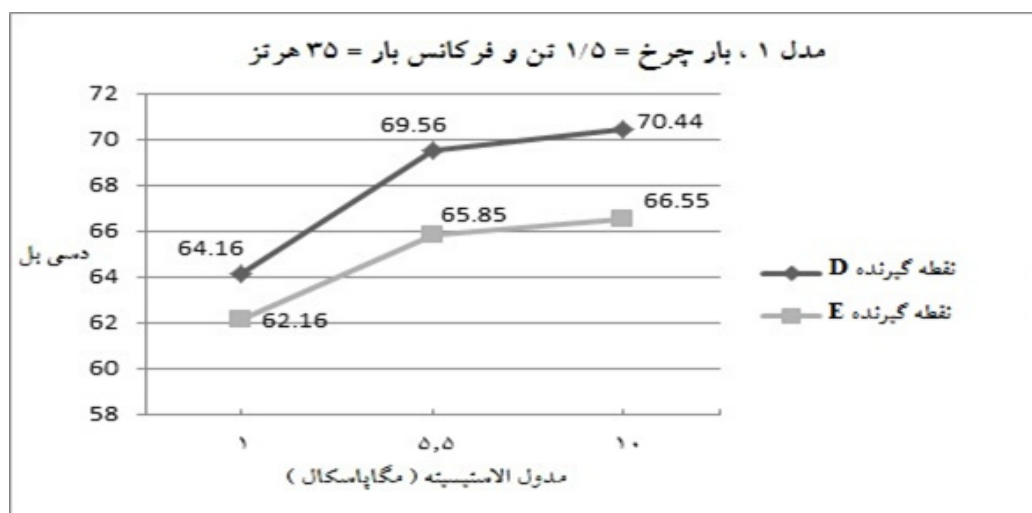
۵-۲ بررسی تاثیر مشخصات مصالح ترکیب الاستیک شیار نشیمن بر ارتعاشات

در این حالت با تغییر مدول الاستیسیته، ترکیب الاستیک آنالیز حساسیت انجام شده است. مقدار مدول الاستیسیته ۱، ۵/۵ و ۱۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده و نتایج مدل اول ارایه شده در جدول ۴ در شکل ۱۰ آورده شده است.

اما علت این افزایش ارتعاش با توجه به برابر بودن شرایط مذکور برای نقطه D و E، تفاوت مدول الاستیسیته لایه های محافظ یخبندان و سابگرید بوده و به دلیل نرم تر شدن خاک در لایه بستر طبیعی (کاهش مدول الاستیسیته از ۱۲۰ به ۴۵ مگاپاسکال) روند افزایش یا کاهش ارتعاش با کمی تفاوت نسبت به نقطه D اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال، افزایش حجم از مدل ۱ به ۳ نیز با افزایش ارتعاش همراه است. به طور کلی در نمودار بالا ارتعاشات در نقاط D و E به ترتیب ۲/۰۳ و ۱/۱۱ دسی بل کاهش یافته است.

۵-۱-۱ بررسی اثر عرض شیار نشیمن بر ارتعاشات

با توجه به جدول ۴ ملاحظه می‌شود که ارتفاع مدل‌های ۲ و ۳ برابر ۲۰۰ mm بوده و دارای بیشترین مقدار مجاز برای ارتفاع ترکیب هستند. اما عرض در مدل ۲ برابر ۲۲۰ mm و در مدل ۳، ۱۶۰ mm است. همچنین مقدار ارتعاشات در مدل ۲ بیشتر از مدل ۳ بوده، بنابراین مشخص می‌شود که زمانی که ارتفاع بیشترین مقدار ممکن را داشته



شکل ۱۰. اثر افزایش مدول الاستیسیته بر ارتعاشات محیطی

با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می شود که با افزایش مدول الاستیسیته، ارتعاشات در نقطه D افزایش پیدا می کند. زمانی که مدول الاستیسیته برابر با ۱ مگاپاسکال است، مقدار ارتعاشات ۶۴/۱۶ دسی بل بوده و وقتی مقدار آن به ۱۰ مگاپاسکال می رسد، ارتعاشات نیز به ۷۰/۴۴ دسی بل افزایش می یابد. همچنین ملاحظه می شود که شیب قسمت اول نمودار (حد فاصل ۱ تا ۵/۵) بسیار زیاد بوده و از مدول ۱ مگاپاسکال تا ۵/۵ مگاپاسکال افزایش چشمگیری در مقدار ارتعاشات وجود دارد، به گونه ای که دسی بل ارتعاشات از

۶۴/۱۶ به ۶۹/۵۶ رسیده است. در نقطه E نیز همانند آنچه که در نقطه D بیان شد، اتفاق افتاده است. به طور کلی در نقاط D و E به ترتیب ۶/۲۸ و ۴/۴۴ دسی بل افزایش ارتعاش وجود دارد.

۱-۲-۵ اثر افزایش حجم افزایش مدول الاستیسیته ترکیب الاستیک شیار نشیمن بر ارتعاشات

اگر مقدار مدول الاستیسیته ۱۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شود، آنگاه حجم افزایش داده شود. نتایج متفاوتی با بخش قبل به دست می آید که در شکل ۱۰ قابل ملاحظه است.



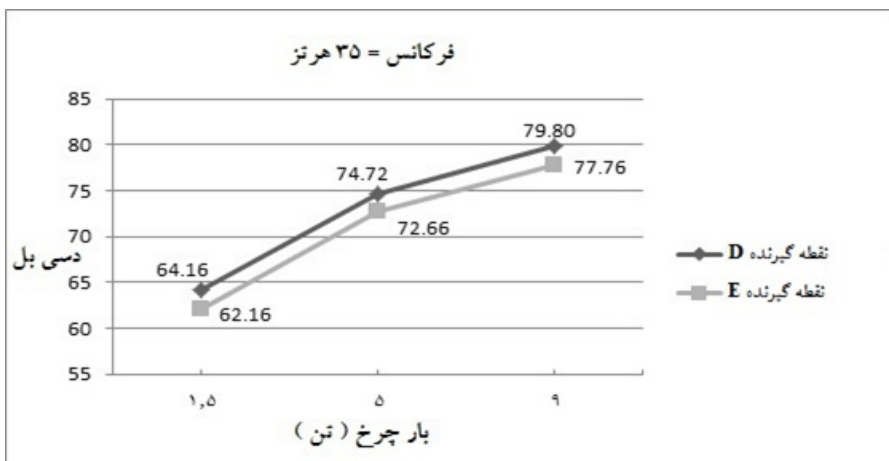
شکل ۱۱. اثر افزایش حجم در مدولهای الاستیسیته متفاوت

افزایش بار مورد بررسی قرار گرفته است. طبق جدول ۱ مقدار مدول الاستیسیته برابر ۱ مگاپاسکال است. بار چرخ ۱/۵، ۵ و ۹ تن و فرکانس بار ۳۵ هرتز در نظر گرفته شده است. آنالیز حساسیت برای هر سه حالت بارگذاری انجام شده و نتایج آنالیزها برای هر دو نقطه D و E در شکل ۱۲ مشخص شده است.

طبق شکل ۱۱ مشاهده می شود که زمانی که مقدار مدول الاستیسیته ۱ مگاپاسکال بوده، با افزایش حجم، مقدار ارتعاشات نیز کاهش پیدا کرده است، به گونه ای که ارتعاشات به طور متوسط ۲/۰۳ دسی بل کاهش داشته است. اما وقتی مقدار این مدول برابر ۱۰ مگاپاسکال بوده، با افزایش حجم ۸/۵ دسی بل افزایش ارتعاشی به طور متوسط در سیستم رخ داده است.

۳-۵ بررسی تأثیر دامنه بارگذاری بر ارتعاشات

در این قسمت برای مدل اول اشاره شده در جدول ۱، اثر

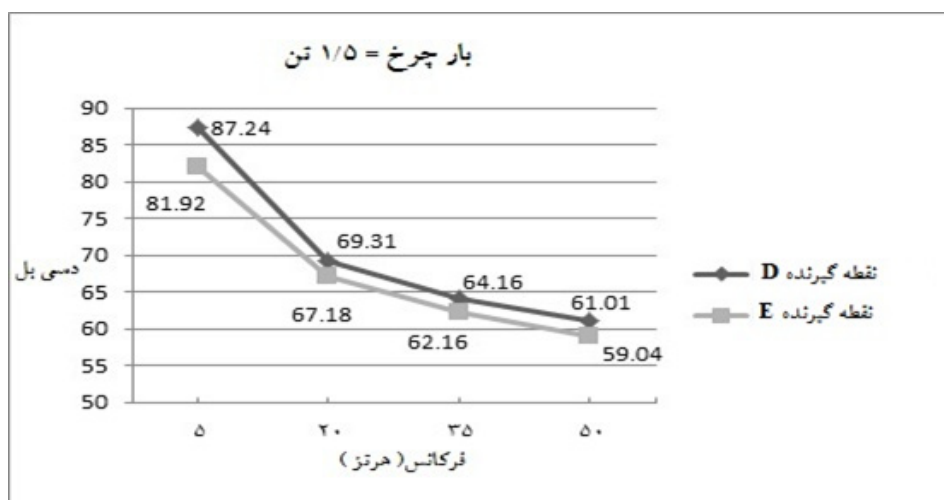


شکل ۱۲. اثر افزایش بار چرخ بر ارتعاشات محیطی

ملاحظه می شود .

۴-۵ بررسی تاثیر فرکانس بار اعمالی بر ارتعاشات در اینجا نیز آنالیز حساسیت در بار چرخ ۱/۵ تنی برای فرکانسهای ۵ ، ۲۰ ، ۳۵ و ۵۰ هرتزی انجام شده است. نتایج آنالیز برای مدل اول مورد اشاره در جدول ۱، در شکل ۱۳ آورده شده است. توجه به این نکته ضروری است که در این سیستم، آنالیز مودال انجام شده و مقادیر فرکانس طبیعی سیستم کمتر از فرکانس های مذکور بوده بنابراین پدیده تشدید اتفاق نمی افتد .

چنان که ملاحظه می شود، افزایش بار چرخ اعمالی منجر به افزایش دسی بل ارتعاشات شده است. در نقطه D هنگامی که بار چرخ ۱/۵ تن بوده، مقدار ارتعاشات ۶۴/۱۶ دسی بل و زمانی که بار چرخ به ۹ تن افزایش می یابد، ارتعاشات به ۷۹/۸ دسی بل می رسد. البته شیب قسمت اول نمودار، تندتر بوده و با افزایش بار از ۱/۵ به ۵ تن ارتعاشات از ۶۴/۱۶ به ۷۴/۷۲ دسی بل افزایش یافته ، در حالیکه با افزایش بار از ۵ تن به ۹ تن ارتعاشات افزایش کمتری داشته و از ۷۴/۷۲ به ۷۹/۸۰ رسیده است . مشابه همین موارد در نقطه E نیز

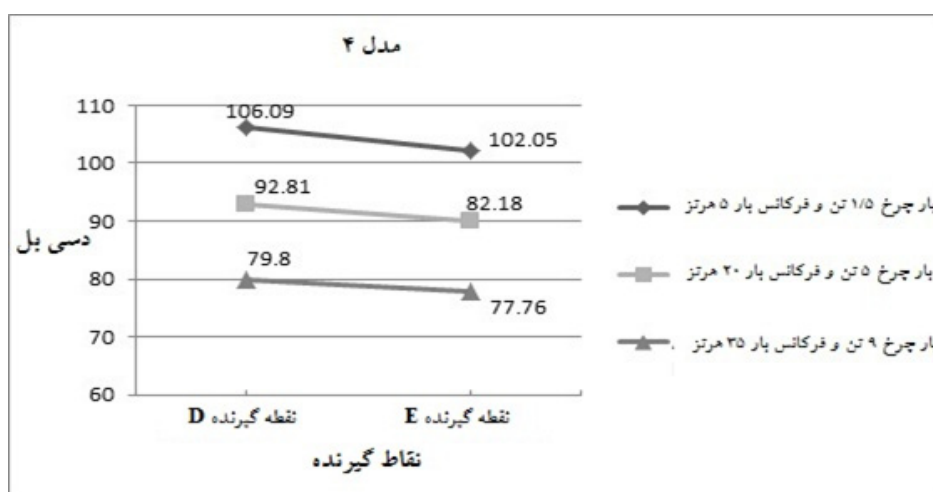


شکل ۱۳. اثر افزایش فرکانس بر ارتعاشات محیطی

به ۶۹/۳۱ و ۶۷/۱۸ کاهش یافته و از آن به بعد این کاهش ارتعاشی با روند کمتری همراه است .

۵-۴-۱ بررسی اثر افزایش همزمان دامنه بار و فرکانس بار اعمالی در این بخش اثر افزایش همزمان بار و فرکانس بار اعمالی بررسی شده است. بار ۱/۵ تن و فرکانس آن ۵ هرتز، برای بار ۵ تن فرکانس بار ۲۰ هرتز و برای بار ۹ تنی فرکانس بار ۳۵ هرتز در نظر گرفته شده است. نتایج آن در شکل ۱۴ مشاهده می شود .

طبق شکل ۱۳ مشاهده می شود که با افزایش فرکانس مقدار ارتعاشات کاهش پیدا می کند. زمانی که فرکانس ۵ هرتز باشد، ارتعاشات در نقطه D، ۸۷/۲۵ دسی بل بوده و با افزایش فرکانس تا ۵۰ هرتز، ارتعاشات به ۶۱/۰۱ دسی بل کاهش می یابد . شیب قسمت اول هر دو نمودار تندتر بوده و اثر افزایش فرکانس بر ارتعاشات چشمگیرتر است، به گونه ای که با افزایش فرکانس از ۵ به ۲۰ هرتز ، دسی بل ارتعاشات در نقاط D و E به ترتیب از ۸۷/۲۵ و ۸۱/۹۲



شکل ۱۴. اثر همزمان افزایش بار چرخ و فرکانس بار اعمالی

Esveld مورد مقایسه قرار گرفته است. این مقایسه حاکی از آن است که اختلاف نتایج، کمتر از ۱۰ درصد بوده و بنابراین صحت مدل‌سازی مشخص شده است. سپس مدل عددی اجزاء محدود، جهت تحلیل ارتعاشی سیستم ریل مدفون تحت بارگذاری دینامیکی قائم قرار گرفته است. نتایج تحلیل ارتعاشی سیستم در چهارحالت اثر ابعاد شیار نشیمن ریل، مشخصات مصالح ترکیب الاستیک شیار نشیمن، دامنه بارگذاری و فرکانس بار اعمالی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر حاصل شده است:

• بررسی تغییر ابعاد هندسی شیار قرارگیری ریل مدفون نشان می دهد که افزایش حجم ترکیب الاستیک تقریباً باعث

همان‌طور که ملاحظه می شود با افزایش همزمان این دو، دسی بل ارتعاشات کاهش چشمگیری پیدا کرده است . به طور متوسط در نقطه D با افزایش بار و فرکانس بار اعمالی ۲۶/۲۹ دسی بل و در نقطه E ۲۴/۲۹ دسی بل کاهش ارتعاشات صورت گرفته است.

۶. جمع بندی و نتیجه گیری

در مقاله حاضر، مدل‌سازی سیستم ریل مدفون با استفاده از نرم افزار ABAQUS انجام شده و برای اعتبار سنجی نتایج، بارگذاری استاتیکی انجام شده و سپس با تحقیق

- 10. Hydraulically Bonded Layer
- 11. Frost Protection Layer (Base)
- 12. Subgrade
- 13. Tie

۷. مراجع

- Adam, M. and von Estorff, O. (2005) "Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches", Computers and Structures, 2005, 83, pp. 11-24.
- Australian Standard Institute (1998) "AS 2187.1-1998, explosives - storage, transport and use - storage", Australian Standard Institute.
- Beatty, B. (2008) "Design and manufacture of embedded rail slab track components", Project no. TIP5-CT-2006-031415 12/06/2008.
- Beatty, B. (2009) "The Balfour Beatty embedded rail track system: An example of technical evaluation", Report on the most appropriate tools for evaluation of the issues raised within InnoTrack where no proven method already exists and the Balfour Beatty Embedded Rail System; An example of Technical Evaluation, INNTRACK TIP5-CT-2006-031415O,.
- Bos, J. and Stuit, H. (1999) "Deck track: Foundation for the railways of the future," Proceedings of the International Conference on Innovations in the Design & Assessment of Railway Track, December 2-3, 1999, Delft University of Technology, The Netherlands.
- British Standards Institute (2009) "BS 5228-2:2009, Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites, Vibration.
- California Department of Transportation (2004) "Transportation- and construction induced vibration guidance manual", Sacramento: Jones & Stokes, USA.

کاهش ارتعاشات می‌شود. با افزایش حجم از $14/11dm^3$ به $4/36dm^3$, در نقطه D $2/03$ دسی بل و در نقطه E, $1/11$ دسی بل به طور متوسط کاهش ارتعاش رخ داده است.

• افزایش ارتفاع ترکیب الاستیک، زمانی که مقدار عرض کم باشد (بزرگ تر از 160 و کمتر از 220 میلی متر) باعث کاهش ارتعاشات می‌شود.

• وقتی عرض دارای بیشترین مقدار مجاز خود باشد (220 mm)، افزایش ارتفاع باعث کاهش ارتعاشات می‌شود.

• مدول الاستیسیته، پارامتر بسیار موثری در میزان ارتعاشات است، به گونه‌ای که افزایش آن باعث افزایش بسیار زیاد دسی بل ارتعاشات می‌شود.

• با افزایش بار چرخ اعمالی از $1/5$ تن به 9 تن، دسی بل ارتعاشات در هر دو نقطه به اندازه $15/64$ افزایش پیدا می‌کند.

• افزایش فرکانس بار باعث کاهش ارتعاشات شده به گونه‌ای که با افزایش آن از 5 هرتز به 50 هرتز مقدار ارتعاشات در نقطه D، $26/23$ دسی بل و در نقطه E، $22/8$ دسی بل کاهش پیدا می‌کند. همچنین بیشترین مقدار ارتعاش در فرکانس 5 هرتز اتفاق می‌افتد.

• با افزایش همزمان فرکانس بار و بار اعمالی ارتعاشات کاهش خواهد یافت.

۶. پی نوشتها

1. ERS
2. Deck Track
3. Balfour Beatty Embedded Track System
4. Cork and Polyurethane
5. Bearers
6. Clipped Lid
7. Von Misses Stresses
8. Elastic Compound
9. Continuous Concrete Layer

- German Standards Organization (1970) "Vibrations in building construction, DIN 4150", Germany, German Standards Organisation.
- International Organization for Standardization (1989), "ISO 2361-2-1989, Evaluation of human exposure to whole body vibration: Part 2 – Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 –80 Hz).
- International Union of Railways (1986) "Classification of Railway Lines" –, UIC Code 860 Standard Steel Rail (UIC54, UIC60).
- Jeffrey, A., Zapfe, Saurenman and Fidell, S. (2010) "Ground-borne noise and vibration in buildings caused by rail transit", Proceedings of the 10th International Workshop on Railway Noise, Nagahama, Japan, 18–22 October 2010, TCRP Report Document number 48, pp 25-32
- Ludvig, E. (2001) "Elastic behavior of continuously embedded rail systems", Ludvig Department of Highway and Railway Engineering, Budapest University of Technology and Economics, H-1521 Budapest, Hungary
- Suiker, A. S. J. (1997) "Fatigue behavior of granular materials, Part I: Constitutive modeling and description of experiments", Report 7-97-119-2, TUD/Rbk.
- Suiker, A.S.J. (1998) "Fatigue behavior of granular materials, Part 2: Numerical formulation of the constitutive relations", Report 7-98-119-3, TUD/Rbk, 1998.04
- U.S. Federal Transit Administration (1995) "Transit noise and vibration impact assessment", Report DOT-T-95-16.
- Crow (2001) "Recommendations and guidelines for embedded rail systems", Galvanistraat 1, The Netherlands.
- Degrande ,G. and Schillemans, L.(2001) " Free field vibrations during the passage of a thalys high speed train at variable speed" , Sound and Vibration, pp. 131-144.
- Delft University of Technology, Chair of Railway Engineering, Dept. Design and Construction, Section of Road and Railway Engineering (2006) " Annual report", edited by V. L. Markine, Netherlands: Delft University of Technology.
- De Man, A. P.(1998) "The free span length of embedded SA42 railway structures "(ICES report 3), Report 7-98-111-4, TUD/Rbk, 1998.05
- Edilon Sedra Company (2010) "The Edilon Sedra Urban Slab Track System" Stockholm, , Edilon Sedra Co.
- Eisenmann and Leykauf (2000) "Fixed railway tracks for railway lines", Cement Technology, 2000.
- Esveld, C., De Man, A. P. and Jovanovic, S. (2011) "Optimum design of embedded rail structure for high speed lines", Section of Road and Railway Engineering, Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology.
- Esveld, C.(1998) "Chair for railway engineering", Annual Report, Report period 1 September 1997 - 31 August 1998.
- Esveld, C., Tolboom, A. G. and De Man, A. P. "Theoretical investigation HSL-South (in Dutch) "Stability of embedded rail structures", Report 7-97-120-5, TUD/Rbk, 1998.03
- GB/T 50452 (2008) "Technical specifications for protection of historic buildings against man-made vibration".

