

مطالعه‌ی موردی بر روی تأثیر شکل گودال‌های باز و پر در کاهش ارتعاشات ناشی از عبور قطار

جبارعلی ذاکری* (دانشیار)

مرتضی اسماعیلی (دانشیار)

سیدعلی مسیبی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۳ (ص. ۸۱-۸۷، یادداشت شنی)
دربی ۲-۳، شماره ۱/۱، ص. ۸۱-۸۷، یادداشت شنی

به علت توسعه‌ی احداث خطوط مترو و راه‌آهن در مناطق شهری کشورهای جهان، بیشتر شهرها با مشکل نزدیکی خطوط راه‌آهن به برخی از مناطق حساس به ارتعاش مواجه‌اند. در این بین، از عمده‌ی روش‌های کاهش ارتعاش در منبع و مسیر می‌توان به گودال‌های باز و پر اشاره کرد. با عنایت به آنکه در خصوص تأثیر شکل گودال‌های کناری، پژوهش‌های مشخصی صورت نگرفته است؛ لذا در این پژوهش با تمرکز بر گودال‌های باز و پر به بررسی اثر سه شکل گودال مستطیلی، پلکانی و مثلثی پرداخته شده و برای این منظور از روش عددی اجزاء محدود/نامحدود (اجزاء میرگر و جاذب انرژی) استفاده شده است. نتایج حاصل از تحلیل عددی، نشان‌دهنده‌ی آن است که گودال مثلثی و پلکانی در هر دو حالت باز و پر نسبت به گودال مستطیلی با توجه به مساحت برابر و در نظر گرفتن بار متناوب قطار، کارایی بهتری دارند.

واژگان کلیدی: ارتعاشات محیطی، روش‌های کاهش ارتعاش، گودال‌های باز و پر، بار متناوب، روش اجزاء محدود و نامحدود.

۱. مقدمه

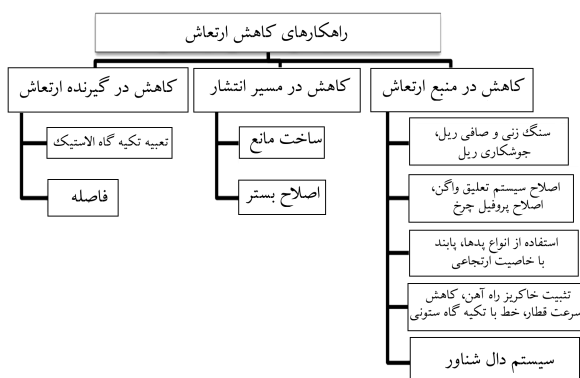
توسعه‌ی حمل و نقل ریلی با تکیه بر افزایش سرعت و بار محوری در سال‌های اخیر با پیشرفت قابل ملاحظه‌ی روبرو بوده است. چنانچه سر و صدا و ارتعاش زمینی ناشی از سیستم‌های حمل و نقل ریلی کنترل نشود، می‌تواند تأثیرات قابل توجهی در مناطق مسکونی و دیگر مکان‌های حساس به ارتعاش بگذارد. در سال‌های اخیر با توجه به اعمال ملاحظات زیست‌محیطی سخت‌گیرانه، ارتعاشات ناشی از قطار و تأثیر آن در آسایش انسان و عملکرد تجهیزات حساس از طرف مهندسان، پژوهشگران، و برنامه‌ریزان حمل و نقل شهری مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. ارتعاش زمینی ناشی از حرکت قطار، یک مسئله‌ی پیچیده‌ی دینامیکی است. انواع مختلف ارتعاشات می‌تواند با عبور قطارها و به دلیل ناهمواری‌های سطح چرخ و ریل و نوسان وسیله‌ی نقلیه روی تاورس‌ها، تولید شود. انتشار امواج می‌تواند از طریق سازه‌ی خط شامل: ریل، تاورس، بالاست، زیربلاست، بستر خاک انتقال یافته و پس از آن با رسیدن به ساختمان‌های واقع در نزدیکی خط، سبب ناراحتی و سلب آسایش ساکنین شود. انتقال ارتعاشات ناشی از حرکت قطار به زیرساخت‌ها و سازه‌های مجاور به صورت تولید ارتعاش سیستم خط تحت اثر تحریک ناشی از بار تکراری منظم چرخ بر روی ریل، انتشار ارتعاشات در محیط اطراف و انتقال به ساختمان‌های مجاور صورت می‌گیرد.^[۱] راهکارهای کاهش ارتعاش زمینی به صورت کاهش ارتعاش در

* نویسنده مسئول

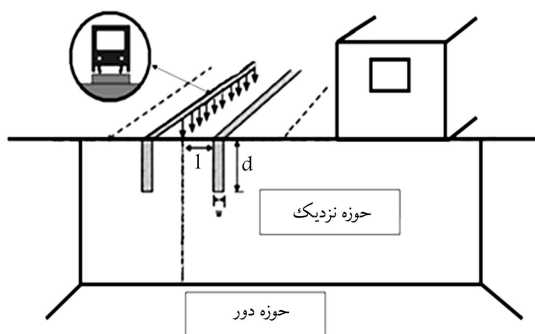
تاریخ: دریافت ۱۹/۰۹/۱۳۹۰، اصلاحیه ۲۷/۰۲/۱۳۹۱، پذیرش ۰۳/۰۴/۱۳۹۱.

zakeri@iust.ac.ir
m.esmaeili@iust.ac.ir
mosayebi@iust.ac.ir

منبع، کاهش در مسیر و نهایتاً کاهش در گیرنده صورت می‌گیرد.^[۲] استفاده از گودال‌ها از جمله موارد کاهش ارتعاش در مسیر است. استفاده از گودال‌های باز و پر شده از بتن، برای عایق‌بندی ارتعاش پی‌های ماشین‌آلات در طول چند سال گذشته متداول شده است. برای مثال، در پژوهشی با استفاده از روش جرم متمرکز، اثر گودال در کاهش حرکت موج برشی ناشی از یک بار هارمونیک اعمالی روی پی صلب قرار گرفته بر روی یک لایه خاک افقی بررسی شده است.^[۳] همچنین در پژوهش دیگری از اجزاء محدود همراه با مرزهای جاذب انرژی ویژه، برای بررسی اثر عایق‌بندی گودال‌های باز و پر شده از بتونیت - دوغاب در خاک‌های لایه‌پی استفاده شده است.^[۴] پژوهشگرانی نیز از اجزاء محدود / نامحدود دو بعدی و دو و نیم بعدی به طور پارامتری برای تجزیه و تحلیل اثر عایق‌بندی گودال‌های باز، گودال‌های پر و پی‌های کنسان استفاده کردند.^[۵] همچنین برخی دیگر از روش‌های تحلیلی برای بررسی شکست امواج در اطراف موانع به شکل کروی و سهمی‌وار استفاده کردند.^[۶] در تحقیق دیگری، میزان اثربخشی گودال‌های باز در کاهش ارتعاشات با استفاده از روش آزمایشگاهی صورت گرفت.^[۷] و سایر تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده است.^[۸-۱۱] لازم به ذکر است که در تمامی کارهای انجام‌شده‌ی ذکر شده، گودال‌ها به شکل مستطیلی در نظر گرفته شده‌اند. در این نوشتار، در ابتدا روش‌های کاهش ارتعاشات در خطوط ریلی از جمله روش‌های کاهش ارتعاش در منبع ارتعاش، در مسیر انتشار و در گیرنده‌ی ارتعاش تشریح شده و در ادامه، عوامل



شکل ۱. روش‌های کاهش ارتعاشات ناشی از قطار.



شکل ۲. ایجاد گودال مستطیلی در حریم خط آهن.

مؤثر در گودال‌ها به‌عنوان مهم‌ترین روش‌های کاهش ارتعاشات ناشی از قطار مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به آنکه در خصوص تأثیر شکل گودال‌های کناری در کاهش ارتعاشات تحقیق مشخصی صورت نگرفته است؛ لذا، در این پژوهش با تمرکز بر گودال‌های باز و پر شده از بتن به بررسی اثر سه شکل گودال مستطیلی، پلکانی، و مثلثی در کاهش ارتعاش پرداخته شده و برای این منظور از مدل‌سازی پدیده‌ی ارتعاش ناشی از حرکت قطار با روش عددی اجزاء محدود/نامحدود استفاده شده است. برای مقایسه‌ی اثر کارایی گودال‌ها از نسبت کاهش دامنه‌ی A_r استفاده شده است. [۱۹]

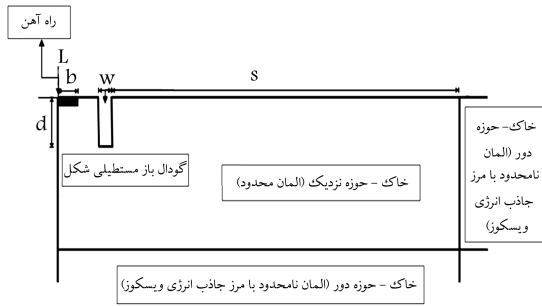
بعد از اعتبارسنجی نتایج تحقیق با کارهای انجام‌شده‌ی دیگر پژوهشگران، [۱۲] با در نظر گرفتن هر دو روش اعمال شرایط مرزی با استفاده از اجزاء نامحدود و اجزاء میراگر برای گودال مستطیلی‌شکل، اثر سه شکل گودال‌های مستطیلی، پلکانی، و مثلثی هم در حالت باز و هم در حالت پر در کاهش ارتعاشات قطار با توجه به مساحت برابر و در نظر گرفتن بار هارمونیک قطار مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

۲. راهکارهای کاهش ارتعاشات ناشی از قطار

راهکارهای کاهش ارتعاش زمینی به چندین گروه قابل تقسیم هستند که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. از جمله مهم‌ترین روش‌های کاهش ارتعاش ناشی از قطار در سازه‌های حساس، ساخت مانع در مسیر انتشار ارتعاش مثل گودال، گودال و یا دیوار است (شکل ۲). عمق بهینه‌ی گودال‌های پر شده در تحقیقات قبلی حدود ۱/۲ برابر طول موج رایله به دست آمده است. مهم‌ترین یافته‌های به دست آمده در خصوص تأثیر گودال‌های باز و پر و همچنین پی کشسان برای کنترل و کاهش ارتعاشات ناشی از حرکت قطار در سازه‌های اطراف به طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است. [۲۰]

جدول ۱. مهم‌ترین یافته‌های به دست آمده در خصوص گودال‌های باز و پر و همچنین پی کشسان. [۲۰]

روش‌های کاهش ارتعاشات	نکات و نتایج به دست آمده
گودال باز	<p>-- عمق گودال نرمال شده عامل غالب است؛ عرض نرمال شده به طور کلی، به جز برای گودال‌های کم عمق مهم نیست.</p> <p>-- گودال‌های باز تسایل به عایق‌بندی ارتعاش عمودی مؤثرتری از ارتعاش افقی دارند.</p> <p>-- تأثیر چگالی و نسبت میرایی و همچنین محل قرارگیری گودال‌ها، در عایق‌بندی ارتعاشات می‌تواند نادیده گرفته شود.</p> <p>-- به منظور دستیابی به یک اثر خوب عایق‌بندی، گودال‌های باز یا پر، باید ضریبی از طول موج رایله خاک باشند. در نتیجه، عایق‌بندی ارتعاشات زمینی توسط گودال‌ها فقط برای ارتعاشات بسامد متوسط تا بالا مؤثر است.</p>
گودال پر	<p>-- عمق و عرض گودال باید به ترتیب شرایط $\frac{d}{\lambda_R} > 1$ و $\frac{w}{\lambda_R} > 0.3$ را به منظور رسیدن به اثر مطلوب عایق‌بندی ارضا کند (λ_R طول موج رایله است).</p> <p>-- عملکرد گودال‌های پر با سختی بیشتر از خاک اطراف عملکرد بهترین نسبت به گودال‌های پر شده با مصالح نرم دارد.</p> <p>-- خاک‌ها با نسبت‌های پواسون بالا می‌توانند اثر عایق‌بندی گودال‌های پر را کاهش دهند، به این دلیل که نسبت‌های پواسون بزرگ به طور قابل ملاحظه‌ی به طول موج فشاری بزرگ‌تر منجر خواهد شد.</p> <p>-- گودال پر سخت‌تر (یا نرم‌تر) بسته به شرایط خاک اطراف، اثر عایق‌بندی بهتری دارند.</p>
پی کشسان	<p>-- برای امواج با بسامدهای بالاتر، به طور کلی گودال‌ها و پی کشسان در کاهش دامنه‌های ارتعاش مؤثر هستند، با این حال، برای امواج از بسامدهای پایین‌تر، پاسخ می‌تواند به طور معکوس با استفاده از گودال‌های باز و یا پی کشسان تشدید شود.</p> <p>-- در پی‌های کشسان، تشک ضخامت $5^\circ > E$ را باید داشته باشد، تا عایق‌بندی قابل قبول به دست آید.</p>



شکل ۴. استفاده از اجزاء محدود/نامحدود (اجزاء محدود/مرز جاذب انرژی) با وجود گودال باز مستطیلی شکل جهت مدل سازی.

اغلب در چنین تحلیل هایی برای جلوگیری از وابستگی نتایج تحلیل به بسامد تحریک، تمام پارامترهای هندسی مورد استفاده نسبت به طول موج رایله λ_R نرمال شده است. [۲۰]

با استفاده از مشخصات خاک، سرعت موج برشی $C_S = 10.11 \text{ m/s}$ ، سرعت موج رایله $C_R = 93.02 \text{ m/s}$ و طول موج رایله $\lambda_R = 3 \text{ m}$ انتخاب شده اند. [۲۰]

پارامترهای هندسی گودال باز که در این نوشتار بی بعد شده اند، عبارتند از: فاصله از خط مرکزی راه آهن $l = L \cdot \lambda_R$ ، عمق $d = D \cdot \lambda_R$ ، عرض $w = W \cdot \lambda_R$ و نیمی از عرض راه آهن $b = B \cdot \lambda_R$ و محدوده مورد بررسی $s = S \cdot \lambda_R$ در آن λ_R طول موج رایله و L ، D و W پارامترهایی بی بعد هستند. حل مسئله به صورت نرم افزاری و با استفاده از روش اجزاء محدود و اجزاء نامحدود صورت گرفته است. فاصله از خط یک متر، عمق گودال یک متر، عرض آن 0.33 متر و طول s حدود 9 متر فرض شده و بدین ترتیب مساحت گودال باز برابر با 3 مترمربع می شود. در تحلیل دینامیکی چنین سازه ای، برای شبیه سازی مرزها می توان دو نوع رویکرد در نظر گرفت. رویکرد اول، استفاده از اجزاء نامحدود است که بازگشت امواج برشی و حجمی به داخل شبکه ای اجزاء محدود را به کمترین میزان می رساند و رویکرد دوم، استفاده از مرز جاذب انرژی یا مرز گران روی است. رفتار محیط در فواصل دور از اجزاء محدود خطی و ایزوتروپیک فرض شده است که برای بخش نامحدود از اجزاء نامحدود خطی CINPE4 با ۴ گره استفاده شد، که برای تحلیل مسائل کرنش صفحه ای به کار می رود، و در رویکرد دوم، اجزاء میراگر در مرزها قرار داده شده است که ضریب این اجزاء میراگر به صورت $F_d = C_d \dot{u}$ در نظر گرفته می شود و این ضریب برای یک سطح به صورت $C_d = \rho v_s A$ فرض می شود. در این تحلیل، بار قطار به شکل بار متناوب سینوسی و سپس به صورت کسینوسی در نظر گرفته شده و در انتها نتایج با استفاده از اصل جمع آثار قوا از دو بار متناوب به دست آمده است. برای اعتبار بخشی محاسبات، نتایج به دست آمده با نتایج روش ارائه شده ی Ni و همکاران [۱۲] مقایسه شده است. تغییرات A_r برای این مطالعه با فرض دو حالت برای شرایط مرزی، تطابق مناسبی با حل ارائه شده ی Ni و همکاران [۱۲] دارد که این موضوع مؤید اعتبار روش حل عددی حاضر و قابلیت تعمیم آن به گودال ها با دیگر اشکال است. [۲۱ و ۲۲]

۴. مقایسه ی عددی گودال های پلکانی و شکل با گودال مستطیلی شکل

پس از اعتبار سنجی نتایج و همچنین بررسی رفتار ارتعاش ذرات در داخل محیط

۳. مدل سازی شکل گودال و بررسی عددی آن

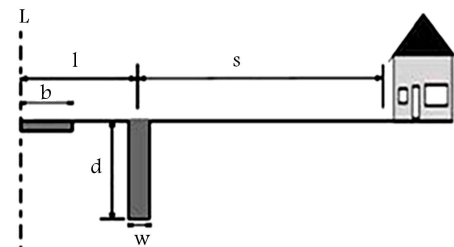
اغلب گودال ها جهت کاهش ارتعاشات ناشی از قطار به طور موازی با خط آهن در طرفین آن ساخته می شوند و این موضوع باعث شکل گیری تقارن در سازه ی بستر خط شده است، به طوری که فقط نیمی از سازه را می توان مدل سازی کرد. هندسه ی مسئله به صورت یک حوزة ی نزدیک (قسمت اول) و یک حوزة ی دور نامحدود (قسمت دوم) در نظر گرفته می شود. مانع موج، خط آهن، و خاک های اطراف در حوزة ی نزدیک قرار می گیرند و اغلب از لحاظ هندسی نامنظم و از لحاظ مصالح غیرهمگن هستند. این منطقه با روش اجزاء محدود مدل سازی می شود. حوزة ی دور، خاک بستر خط آهن با مرزهای نامحدود است که گاهی همگن و گاهی به صورت خاک های لایه لایه، با یا بدون سنگ بستر است. سازه ی مدل شده ی این حوزة شرایط کرنش صفحه ای برای مشخصات دو بعدی از نیم فضا را خواهد داشت. از طرفی، بار قطار به صورت بارهای متناوب بوده و در بخش میانی خط آهن اعمال می شود. در خصوص خاک بستر، میرایی هیستریزیس^۱ فرض شده است و محیط آن به عنوان یک محیط ویسکو کشسان ایزوتروپیک مدل خواهد شد (شکل های ۳ و ۴). مدل سازی این نوشتار به صورت نیمی از محیط نیم فضا بوده و تحت اثر بار ناشی از حرکت قطار قرار داده شده است. موانع موج با استفاده از نسبت کاهش دامنه ی (A_r) تعریف شده و مورد ارزیابی قرار می گیرد: [۱۹]

$$A_r = \frac{\text{مقدار جابجایی سطح زمین با مانع}}{\text{مقدار جابجایی سطح زمین بدون مانع}} \quad (1)$$

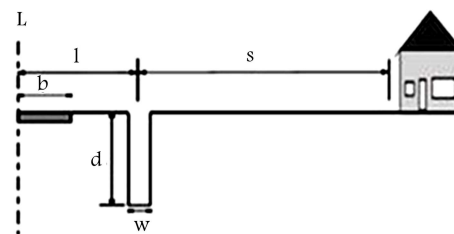
در صورتی که لزوم محاسبه ی پاسخ خاک فراتر از محدوده ی s از مانع باشد، لازم است نسبت کاهش متوسط دامنه (\bar{A}_r) به صورت رابطه ی ۲ محاسبه شود.

$$\bar{A}_r = \frac{1}{s} \int A_r(x) dx \quad (2)$$

که در آن s محدوده ی بین گودال و گیرنده ی ارتعاش است. لازم به توضیح است که عملکرد مناسب تر مانع کاهش انتشار امواج مربوط به مقادیر کوچک تر \bar{A}_r است.

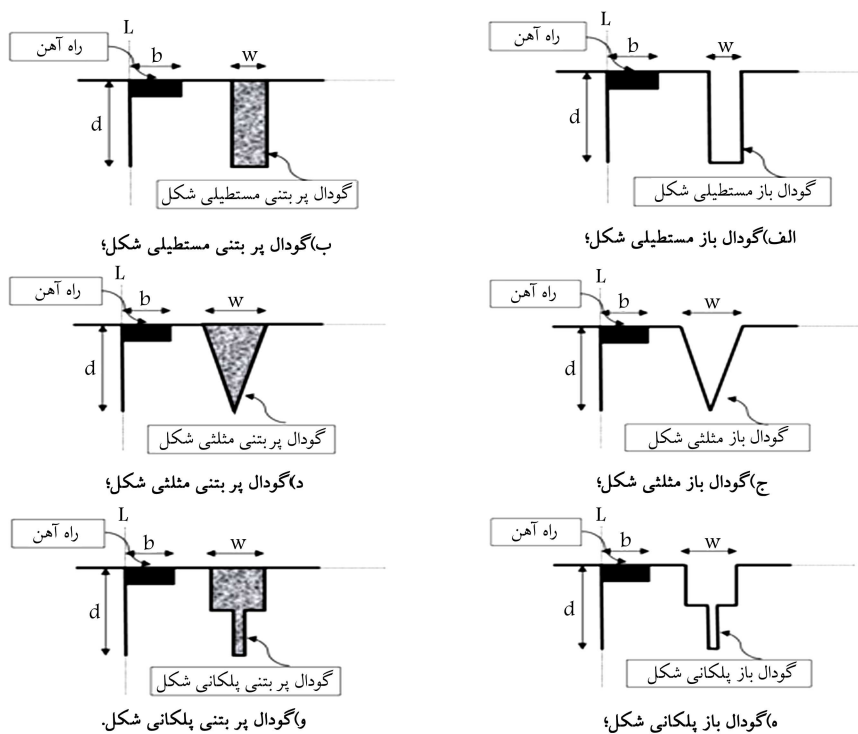


(الف) گودال پر شده از بتن؟



(ب) گودال باز.

شکل ۳. طرح شماتیک انتقال ارتعاش در گودال باز و پر.



شکل ۵. مدل‌سازی انواع مختلف گودال‌های باز و پر مستطیلی، مثلثی و پلکانی شکل.

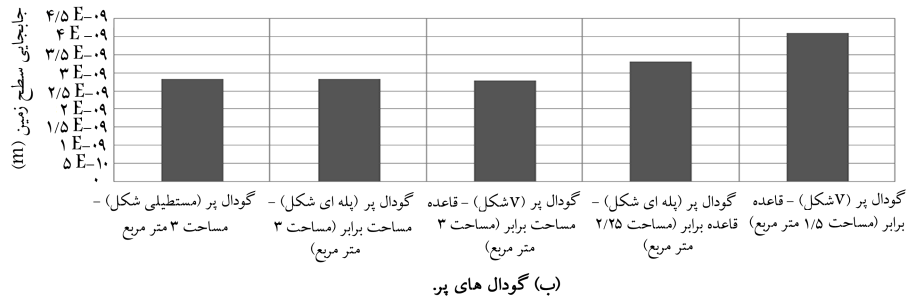
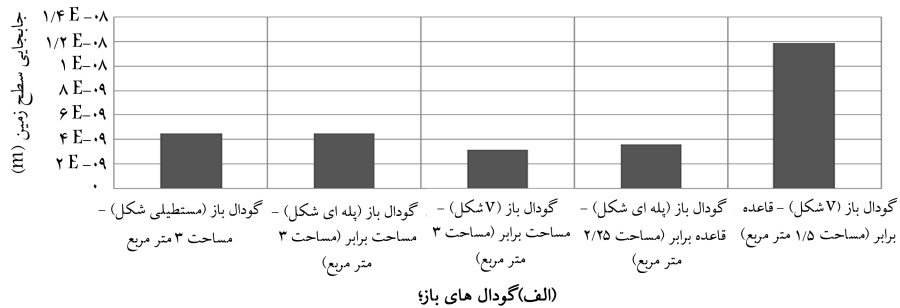
جدول ۲. مقایسه‌ی انواع مختلف گودال‌های باز و پر تحت بار متناوب قطار.

نسبت کاهش دامنه	جابجایی سطح زمین بدون گودال (متر)			جابجایی سطح زمین با گودال (متر)			انواع گودال
	تحت بار سینیوسی و کسینوسی	تحت بار سینیوسی	تحت بار کسینوسی	تحت بار سینیوسی و کسینوسی	تحت بار سینیوسی	تحت بار کسینوسی	
A_p							
(Max)							
۲٫۲۸	$۱٫۹۹E-۰۹$	$-۸٫۱۶E-۱۱$	$۱٫۹۹E-۰۹$	$۴٫۵۳E-۰۹$	$۲٫۰۹E-۰۹$	$۴٫۰۳E-۰۹$	گودال باز (مستطیلی شکل)
۱٫۸۰	$۲٫۴۹E-۰۹$	$۲٫۰۱E-۰۹$	$۱٫۴۹E-۰۹$	$۴٫۵۱E-۰۹$	$۴٫۱۴E-۰۹$	$۱٫۸۰E-۰۹$	گودال باز (پلکانی شکل) - مساحت برابر
۱٫۶۱	$۱٫۹۶E-۰۹$	$۱٫۲۴E-۰۹$	$۱٫۵۳E-۰۹$	$۳٫۱۸E-۰۹$	$۱٫۸۷E-۰۹$	$۲٫۵۸E-۰۹$	گودال باز (شکل ۷) - مساحت برابر
۱٫۸۲	$۱٫۹۹E-۰۹$	$-۸٫۱۶E-۱۱$	$۱٫۹۹E-۰۹$	$۳٫۶۳E-۰۹$	$۹٫۳۰E-۱۰$	$۳٫۵۲E-۰۹$	گودال باز (پلکانی شکل) - قاعده‌ی برابر (مساحت کمتر)
۲٫۴۸	$۴٫۷۷E-۰۹$	$۳٫۶۵E-۰۹$	$۳٫۰۷E-۰۹$	$۱٫۱۸E-۰۸$	$۱٫۱۸E-۰۸$	$۱٫۴۳E-۰۹$	گودال باز (شکل ۷) - قاعده‌ی برابر (مساحت کمتر)
۱٫۲۰	$۲٫۳۲E-۰۹$	$۴٫۸۸E-۱۰$	$۲٫۲۸E-۰۹$	$۲٫۸۱E-۰۹$	$-۴٫۳۹E-۱۰$	$۲٫۷۸E-۰۹$	گودال پر (مستطیلی شکل)
۰٫۸۹	$۳٫۱۶E-۰۹$	$۱٫۹۵E-۰۹$	$۲٫۴۹E-۰۹$	$۲٫۸۲E-۰۹$	$۱٫۱۷E-۰۹$	$۲٫۵۷E-۰۹$	گودال پر (پلکانی شکل) - مساحت برابر
۰٫۹۷	$۲٫۸۵E-۰۹$	$۲٫۵۱E-۰۹$	$۱٫۳۶E-۰۹$	$۲٫۷۷E-۰۹$	$۸٫۵۲E-۱۰$	$۲٫۶۵E-۰۹$	گودال پر (شکل ۷) - مساحت برابر
۰٫۸۵	$۳٫۸۵E-۰۹$	$-۱٫۴۱E-۱۰$	$۳٫۸۵E-۰۹$	$۳٫۳۰E-۰۹$	$-۲٫۱۰E-۱۰$	$۳٫۳۰E-۰۹$	گودال پر (پلکانی شکل) - قاعده‌ی برابر (مساحت کمتر)
۱٫۷۳	$۲٫۳۴E-۰۹$	$۲٫۵۴E-۱۰$	$۲٫۳۳E-۰۹$	$۴٫۰۸E-۰۹$	$۷٫۶۸E-۱۰$	$۴٫۰۱E-۰۹$	گودال پر (شکل ۷) - قاعده‌ی برابر (مساحت کمتر)

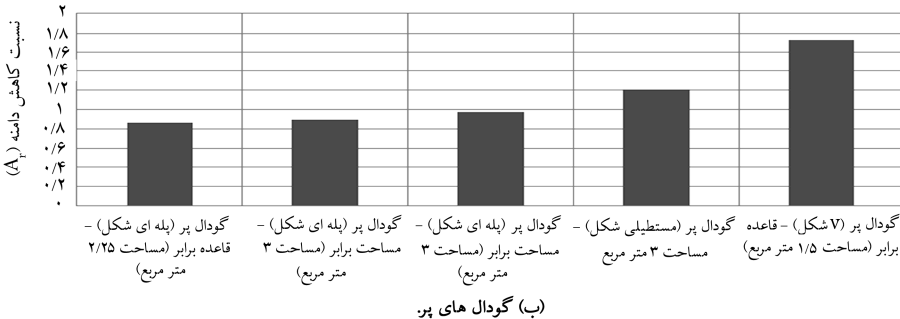
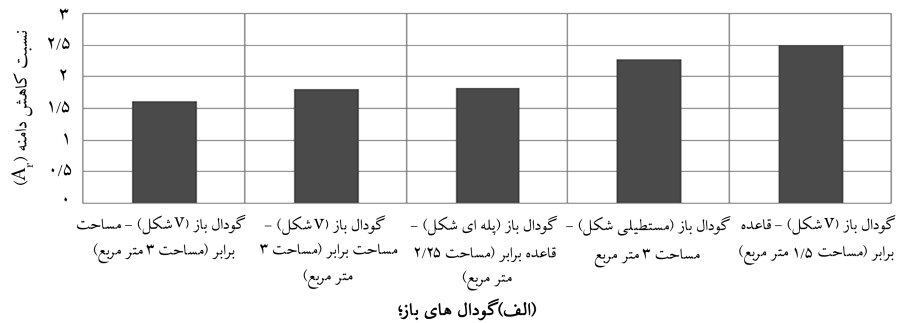
استفاده از جمع آثار قوا به صورت حاصل جمع دو بار متناوب به دست آمده است. همچنین اثر ۳ شکل مختلف گودال با توجه به نسبت A_p و همچنین جابجایی سطح زمین با وجود گودال به صورت نمودار ستونی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

همان‌طور که در جدول ۲ و شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی مقدار

خاک، اثر شکل گودال‌های باز و پر مختلف از جمله گودال مستطیلی، مثلثی، و پلکانی همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است، که نتایج حاصل از آن در جدول ۲ و شکل‌های ۶ و ۷ برای جابجایی سطح زمین با وجود گودال ارائه شده است. در این تحلیل، بار قطار ابتدا به صورت بار متناوب سینیوسی و بعد به صورت کسینوسی در نظر گرفته شده و سپس نتایج با



شکل ۶. مقایسه‌ی جابجایی سطح زمین در انواع مختلف گودال های باز و پر (m).



شکل ۷. مقایسه‌ی نسبت کاهش دامنه (A₇) در انواع مختلف گودال های باز و پر (بی بعد).

کمتر از گودال پر مستطیلی شکل شده است. همچنین بیشینه مقدار A_7 برای گودال پر پلکانی شکل با قاعده‌ی برابر و مساحت کمتر از گودال مستطیلی شکل حدود ۲۹٪ کمتر از گودال پر مستطیلی شکل شده است. مقایسه‌ی حاصل از بررسی انواع مختلف گودال های باز و پر پلکانی و مثالی شکل در مقایسه با گودال مستطیلی شکل در جدول های ۳ و ۴ آمده است، همان طور که ملاحظه می شود در بین انواع مختلف گودال های باز، گودال باز مثالی شکل با مساحت برابر با مساحت مستطیلی شکل (مساحت ۳ متر مربع) دارای بیشترین درصد کاهش ارتعاش است و در بین انواع مختلف گودال های پر، گودال پر پلکانی شکل دارای بیشترین درصد کاهش ارتعاش است.

برای گودال باز پلکانی شکل با مساحت برابر با گودال مستطیلی شکل حدود ۲۰٫۷٪ کمتر از گودال باز مستطیلی شکل شده است. همچنین بیشینه مقدار A_7 برای گودال باز مثالی شکل با مساحت برابر با گودال مستطیلی شکل حدود ۲۸٫۹٪ کمتر از گودال باز مستطیلی شکل، و نیز بیشینه مقدار A_7 برای گودال باز پلکانی شکل با قاعده‌ی برابر و مساحت کمتر از گودال مستطیلی شکل حدود ۱۹٫۸٪ کمتر از گودال باز مستطیلی شکل شده است. همچنین با مشاهده‌ی نتایج گودال های پر می توان نتیجه گرفت که بیشینه مقدار A_7 برای گودال پر پلکانی شکل با مساحت برابر با گودال مستطیلی شکل حدود ۲۶٫۱٪ کمتر از گودال پر مستطیلی شکل و نیز بیشینه مقدار A_7 برای گودال پر مثالی شکل با مساحت برابر با گودال مستطیلی شکل حدود ۱۹٫۴٪

جدول ۳. درصد ارتعاش انواع گودال‌های باز نسبت به گودال باز مستطیلی شکل.

میزان ارتعاش نسبت به گودال باز مستطیلی شکل (%)	انواع گودال
۲۰/۷۳-	گودال باز (پلکانی شکل) - مساحت برابر (مساحت $3m^2$)
۲۸/۹۸-	گودال باز (شکل v) - مساحت برابر (مساحت $3m^2$)
۱۹/۸۹-	گودال باز (پلکانی شکل) - قاعده‌ی برابر (مساحت $2,25m^2$)
۹/۱۷	گودال باز (شکل v) - قاعده‌ی برابر (مساحت $1,5m^2$)

جدول ۴. درصد ارتعاش انواع گودال‌های پر نسبت به گودال پر مستطیلی شکل.

میزان ارتعاش نسبت به گودال پر مستطیلی شکل (%)	انواع گودال
۲۶/۱۵-	گودال پر (پلکانی شکل) - مساحت برابر (مساحت $3m^2$)
۱۹/۴۵-	گودال پر (شکل v) - مساحت برابر (مساحت $3m^2$)
۲۹/۰۵-	گودال پر (پلکانی شکل) - قاعده‌ی برابر (مساحت $2,25m^2$)
۴۳/۷۱	گودال پر (شکل v) - قاعده‌ی برابر (مساحت $1,5m^2$)

۵. نتیجه‌گیری

خطوط راه‌آهن و مترو باید تا آنجا که امکان دارد دور از سازه‌های حساس انتخاب شوند. اما این کار با توجه به ساختمان‌های مسکونی و مسئله‌ی هزینه‌های تملیک و همچنین نقاط اجباری مورد نظر برای ساخت ایستگاه‌ها و دسترسی‌ها این امکان را در خطوط راه‌آهن و مترو شدیداً محدود می‌کند. لذا باید سعی شود از روش‌هایی برای کاهش ارتعاش در مسیر انتقال آن به سازه‌های حساس استفاده کرد، که یکی از روش‌های مؤثر در کاهش ارتعاش ناشی از قطار در محیط اطراف استفاده از گودال‌های باز و پر در حريم جانبی خط است؛ و تحقیقات انجام‌شده مبنی بر آن است که به طور معمول از گودال‌های مستطیلی شکل برای این منظور استفاده شده است.

با توجه به آنکه تحقیق مشخصی درخصوص تأثیر شکل گودال‌های کناری در کاهش ارتعاشات صورت نگرفته‌است، لذا در این پژوهش، با تمرکز بر گودال‌های باز و پر شده از بتن به بررسی اثر سه شکل گودال‌های مستطیلی، پلکانی، و مثلثی در کاهش ارتعاش ناشی از قطار پرداخته شده و برای این منظور از مدل‌سازی پدیده‌ی ارتعاش ناشی از حرکت قطار به روش عددی اجزاء محدود/نامحدود (اجزاء میراگر) استفاده شده است. مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش می‌تواند به این صورت خلاصه شود:

۱. با تحلیل عددی صورت‌گرفته، نتایج نشان می‌دهند که مؤلفه‌ی w (حرکت ذرات خاک در جهت افقی) نسبت به w (حرکت ذرات خاک در جهت قائم) با نسبت شدیدتری مستهلک می‌شود و در نتیجه اگر از گودال‌های پلکانی و v شکل استفاده کنیم، ارتعاشات نسبت به گودال‌های مستطیلی شکل با مساحت برابر کمتر می‌شود.

۲. بیشینه‌ی مقدار A_r برای گودال باز پلکانی شکل با مساحت برابر با گودال مستطیلی شکل حدود $20/7\%$ کمتر از گودال باز مستطیلی شکل می‌شود. همچنین بیشینه‌ی مقدار A_r گودال v شکل با مساحت برابر با گودال مستطیلی شکل حدود $28/9\%$ کمتر از گودال باز مستطیلی شکل می‌شود.

۳. بیشینه‌ی مقدار A_r برای گودال باز پلکانی شکل با قاعده‌ی برابر و مساحت کمتر از گودال مستطیلی شکل حدود $19/8\%$ کمتر از گودال باز مستطیلی شکل می‌شود.

۴. با مشاهده‌ی نتایج گودال‌های پر می‌توان نتیجه گرفت که بیشینه‌ی مقدار A_r برای گودال پر پلکانی شکل با مساحت برابر با گودال مستطیلی شکل حدود $26/1\%$ کمتر از گودال پر مستطیلی شکل می‌شود.

۵. بیشینه‌ی مقدار A_r برای گودال پر v شکل با مساحت برابر با گودال مستطیلی شکل حدود $19/4\%$ کمتر از گودال پر مستطیلی شکل می‌شود.

۶. بیشینه‌ی مقدار A_r برای گودال پر پلکانی شکل با قاعده‌ی برابر و مساحت کمتر از گودال مستطیلی شکل حدود 29% کمتر از گودال پر مستطیلی شکل می‌شود.

پانوشته‌ها

1. Hysteretic damping
2. amplitude reduction ratio
3. average amplitude reduction ratio

منابع (References)

1. Zakeri, J.A. and Xia, H. "Application of 2D-infinite beam elements in dynamic analysis of railway track", *Journal of Mechanical Science and Technology*, **23**(5), pp. 1415-1421 (2009).
2. Esmaili, M. and Fesharaki, M. "The effect of railway embankment on vibration attenuation in railway track",

Journal of Transportation Engineering, 1(2), pp. 61 (in Persian) (2010).

3. Esmaili, M. and Fesharaki M. "An investigation into the effect of asphalt concrete on vibration reduction in railway tracks", *Sharif Journal Civil Engineering*, **27**(2), pp. 101-106 (in Persian) (2011).
4. Lysmer, J. and Waas, G. "Shear waves in plane infinite structures", *J. Eng. Mech. Div., ASCE*, **98**(EM1), pp. 85-105 (1972).
5. Segol, G., Lee, C.Y. and Abel, J.F. "Amplitude reduction of surface waves by trenches", *J. Eng. Mech. Div., ASCE*, **104**(3), pp. 621-641 (1978).
6. Yang, Y.B. and Hung, H.H. "A parametric study of wave barriers for reduction of train-induced vibrations", *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **40**(20), pp. 3729-3747 (1997).

7. Hung, H.H., Yang, Y.B. and Chang, D.W. "Wave barriers for reduction of train-induced vibrations in soils", *J. Geo. & Geoenvironmental Eng.*, **130**(12), pp. 1283-1291 (2004).
8. Pao, Y.H. and Mow, C.C. "Scattering of plane compressional waves by a spherical obstacle", *J. Appl. Phys.*, **34**, pp. 493-499 (1963).
9. Thau, S.A. and Pao, Y.H. "Diffractions of horizontal shear waves by a parabolic cylinder and dynamic stress concentrations", *J. Appl. Mech., ASME*, **33**(4), pp. 785-792 (1966).
10. Woods, R.D. "Screening of surface waves in soils", *J. Soil Mech. Found. Div.*, **94**(SM 4), pp. 951-979 (1968).
11. Ahmad, S., Al-Hussaini, T.M. and Fishman, K.L. "Investigation on active isolation of machine foundations by open trenches", *J. Geot. Eng., ASCE*, **122**(6), pp. 454-461 (1996).
12. Ni, S.H., Feng, Z.Y. and Tsai, P.S. "Analysis of the vibration response and screening effectiveness of strip foundations", *J. Chinese Inst. Civil and Hydraulic Eng.*, **6**(3), pp. 269-277 (1994).
13. Al-Hussaini, T.M. and Ahmad, S. "Active isolation of machine foundations by in-filled trench barriers", *J. Geot. Eng., ASCE*, **122**(4), pp. 288-294 (1996).
14. Andersen, L. and Nielsen, S.R.K. "Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**(7-10), pp. 701-716 (2005).
15. Yeh, C.S., Liao, W.I., Tsai, J.F. and Teng, T.J. "Train induced ground motion and its mitigation by trench and WIB", Report of NCREE-97-009 (in Chinese) (1997).
16. Guang Yun, G., Gang, S., ShiJin, F., and Chang, Q., "3D analysis of in-filled trench as passive barriers for ground vibration isolation", *Science in China Series. G: Physics, Mechanics and Astronomy*, **51**(10), pp. 1573-1585 (2008).
17. Müller, R., *Mitigation Measures for Open Lines Against Vibration and Ground-Borne Noise: A Swiss Overview*, SBB Rail Environmental Center, Hochschulstrasse 6, Bern 65, Switzerland (2008).
18. Kawamura, S., Ito, S., Yoshida, T., and Minamoto, H., "Isolation effect of a dynamic dashpot and a trench on ground vibration caused by a construction machine", *Appl Acoust*, **72**(4), pp. 151-156 (2011).
19. Beskos, D.E., Dasgupta, B. and Vardoulakis, I.G. "Vibration isolation using open or filled trenches, Part 1: 2-D Homogeneous Soil", *Comp. Mech.*, **1**(1), pp. 43-63 (1986).
20. Yang, Y.B. and Hung, H.H., *Wave Propagation for Train-Induced Vibrations: A Finite/Infinite Element Approach*, Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. (2008).
21. Esmaeili, M., Zakeri, J.A. and Mosayebi, S.A. "Effect of V-shaped trenches to reduce vibrations due to step load of bogie", *Journal of Transportation (Engineering)*, **3**(1), pp. 1-15 (in Persian) (2011).
22. Mosayebi, SA. "Reduction of train induced vibrations on the surrounding buildings by using trenches", Master's Thesis (Supervisors: Dr. Zakeri and Dr. (Esmaeili), Iran University of Science and Technology (in Persian) (2011).