

تحلیل عددی ستون‌های سنگی در بهسازی خاک بستر خطوط راه‌آهن

مقاله پژوهشی

غلام مرادی، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

حسین علی‌وند*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

میثم جهانگیری علی کمر، دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

علیرضا عباس نژاد، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی مرنده، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: haa9314@gmail.com

دریافت: ۹۹/۰۱/۰۸ - پذیرش: ۹۹/۰۶/۰۵

صفحه ۱۸۰-۱۶۵

چکیده

یکی از الگوهای اصلی توسعه یافتگی در هر منطقه‌ای توسعه سیستم‌های حمل و نقل و سهولت دسترسی به آنها در آن منطقه است. از بین سیستم‌های مختلف حمل و نقل، حمل و نقل ریلی با توجه به مزیت‌های منحصر به فردی که دارد مورد توجه سیاستگذاران کشور واقع شده و توسعه آن همواره مورد توجه می‌باشد. با توسعه راه‌آهن اجرای خطوط ریلی بر روی بسترهای ضعیف و زمین‌های مسئله‌دار یکی از مسائل اجتناب ناپذیر خواهد بود که باید برای رفع این نقیصه تدبیری اندیشیده شود. از میان روش‌های متنوع بهسازی خاک، استفاده از ستون‌های سنگی به دلیل سهولت در اجرا و مقرون به صرفه بودن از نظر اقتصادی بسیار مورد توجه است. استفاده از ستون‌های سنگی موجب افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست بستر تحت بارهای وارده می‌گردد و کیفیت بهره‌برداری را افزایش می‌دهد. در این تحقیق به بررسی عددی تاثیر حضور ستون‌های سنگی در کاهش پاسخ‌های دینامیکی بستر سست و غیرمترکم ماسه‌ای، تحت بارگذاری ناشی از عبور یکی از قطارهای متداول در کشور پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد در صورت استفاده از ستون‌های سنگی پارامترهای ارتعاشی خاک ماسه‌ای سست و غیرمترکم بستر، شامل تغییر مکان قائم، دامنه تغییرات سرعت قائم و شتاب قائم به ترتیب حداکثر ۱۹/۲۰ درصد، ۲۷/۸۵ درصد و ۱/۷۴ درصد کاهش می‌یابند.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای ارتعاشی، روش اجزاء محدود، ستون‌های سنگی، نرم‌افزار آباکوس

۱- مقدمه

ستون‌های سنگی اشاره کرد. استفاده از این روش به دلیل سازگاری با محیط زیست، سهولت در اجرا و از همه مهم‌تر جنبه اقتصادی آن، بسیار مورد توجه است. ستون‌های سنگی سبب افزایش سختی خاک، و در نتیجه کاهش نشست آن می‌شود. از این رو استفاده از ستون‌های سنگی در بهسازی خاک بستر خطوط راه‌آهن از هر نظر مناسب بوده و در مجموع سبب بهبود پارامترهای مقاومتی مجموعه‌ی زیرسازی می‌شود. ستون‌های سنگی به عنوان روشی مناسب برای بهسازی خاک، قابلیت خود را در اکثر خاک‌ها خصوصاً خاک‌های رسی نرم به اثبات رسانده است. این روش مبتنی بر تعویض ۱۵ الی ۳۵ درصد حجم خاک نامرغوب به وسیله‌ی حفر چاه‌هایی با عمق،

یکی از عوامل موثر در عملکرد مناسب هر نوع سازه‌ای کیفیت بستری است که سازه بر روی آن احداث می‌شود. در صورتی که این بستر کیفیت لازم را نداشته باشد، سازه مورد نظر در حین بهره‌برداری دچار مشکلات و آسیب‌های جدی خواهد شد. با توجه به ماهیت طولانی بودن مسیرهای راه و راه‌آهن و عبور آنها از مناطقی با شرایط ژئوتکنیکی متفاوت، قطعا مناطقی وجود خواهند داشت که خاک آنها از این نظر دچار ضعف و ناکارآمدی باشد. کما اینکه در کشورمان نیز به طور عمده در پروژه‌های راه‌آهن با مشکلاتی از این قبیل روبرو هستیم. در چنین شرایطی راهکارهای مختلفی برای بهسازی خاک وجود دارد، که از میان آنها می‌توان به استفاده از

در کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای ناشی از وقوع زلزله کمک می‌نمایند و با افزایش نسبت از این مقدار هر ستون به صورت جداگانه عمل می‌نماید (اسماعیلی و حکیم‌پور، ۱۳۹۳). بررسی کارایی مصالح مختلف شامل سنگ، شن، ماسه دریایی، ماسه رودخانه‌ای و نرمه معدنی نشان می‌دهد سنگ بیشترین تاثیر را در بهبود پارامترهای بار-تغییر مکان خاک رس دارد. اگرچه رفتار ماسه رودخانه‌ای در این مورد مشابه رفتار شن بوده و مناسب‌تر از رفتار ماسه دریایی است ولی در حالت کلی شن موثرتر از ماسه است. نرمه معدنی اگرچه محصول زائد بوده و تاثیر کمتری نسبت به مصالح دیگر دارد، اما به هر حال باعث بهبود پارامترهای بار-تغییر مکان خاک رس می‌شود. از این رو با توجه به ارزان بودن و دسترسی راحت، استفاده از آن در ساخت ستون‌های سنگی مقرون به صرفه است (Isaac and Girish, 2009). استفاده از ستون‌های سنگی با جایگزینی ارتعاشی، که یکی از روش‌های متداول بهسازی خاک در جهان است صرفه‌جویی اقتصادی بیشتری نسبت به سایر روش‌های بهسازی برای اعماق بیشتر از ۲ متر خاک حاصل می‌نماید (Brayan, James and Jonathan, 2007). بررسی رفتار ستون‌های سنگی در بهسازی خاک نرم بسترهای تحت بارگذاری متناوب ناشی از عبور وسائط نقلیه نشان می‌دهد که سرعت کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای در حضور ستون سنگی بستگی به فرکانس بارگذاری سیکلی دارد به طوری که فرکانس بارگذاری بزرگتر باعث افت سریع‌تر اضافه فشار آب حفره‌ای می‌گردد (Basack, Indraratna and Rujikiatkamjorn, 2016). حضور ستون‌های سنگی در زیرسازی راه آهن سریع السیر سبب کاهش ۳۳ تا ۵۱ درصدی تغییر مکان قائم سطح خاک زیرسازی می‌شود (Shahrli and Josef Witt, 2015).

۲- مدلسازی اجزاء محدود

مدلسازی‌های این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS 2017 انجام گرفته است. مدل ساخته شده از شش بخش اصلی تشکیل یافته است که شامل موارد زیر است:

- ۱- خاک بستر ۲- ستون‌ها ۳- خاکریز ۴- لایه بالاست
- ۵- تراورس‌ها ۶- ریل.

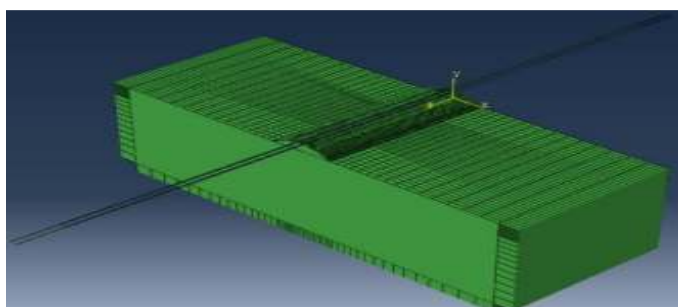
قطر و فاصله‌ی معین از یکدیگر و پر کردن چاه‌ها با ماسه، شن یا سنگریزه و تراکم کردن به صورت ستون‌های عمودی است. مواد دانه‌ای به صورت لایه لایه در چاه حفر شده ریخته و به‌وسیله دستگاه‌های مخصوص مرتعش و تراکم می‌شوند. ایده اصلی این روش مبتنی بر کاهش نیروی وارده بر خاک نرم بدون تغییر اساسی در ساختار آن است، که در نتیجه تراکم پذیری خاک کاهش یافته و ظرفیت باربری و مقاومت برشی آن افزایش می‌یابد. همچنین اجرای ستون‌های سنگی در خاک‌های رسی اشباع به عنوان شبکه زه‌کشی عمل کرده و باعث کاهش زمان تحکیم می‌شود و احتمال بروز پدیده روانگرایی در اثر وقوع زلزله را کاهش می‌دهد (Hughesh and Withers, 1974). مطالعات وسیعی توسط محققان مختلف در سرتاسر دنیا در مورد ستون‌های سنگی و کاربرد آن‌ها در موارد مختلف انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد. بررسی تاثیر پارامترهایی از قبیل فاصله، ارتفاع، قطر ستون‌های سنگی و نسبت ناحیه اصلاح شده بر روی ظرفیت باربری خاک رس نشان می‌دهد که افزایش فاصله ستون‌ها به کاهش محصور شدگی ناشی از حضور ستون‌های مجاور منجر شده و در نتیجه ظرفیت باربری کاهش یافته است. این کاهش ظرفیت باربری برای فواصل بیش از سه برابر قطر ستون ناچیز است. افزایش نسبت ناحیه اصلاح شده سبب کاهش فاصله ستون‌ها شده در نتیجه سختی خاک افزایش یافته و موجب افزایش ظرفیت باربری شده است.

با افزایش نسبت ارتفاع لایه رس به ارتفاع ستون، یعنی کاهش ارتفاع ستون، به علت کم شدن سختی خاک مسلح، ظرفیت باربری نیز کاهش می‌یابد. زمانی که این نسبت برابر یک باشد، یعنی خاک روی بستر سخت متکی بوده و بیشترین ظرفیت باربری را خواهد داشت. با افزایش قطر ستون‌ها به علت این که فاصله ستون‌ها ثابت است، همپوشانی و محصورشدگی ناشی از حضور ستون‌های مجاور سبب افزایش ظرفیت باربری می‌شود (مختاری و دهقانی، ۱۳۹۳). بررسی تاثیر ستون‌های سنگی در حالت تکی و گروهی بر روی کاهش خطر روانگرایی در توده ماسه اشباع در حین وقوع زلزله نشان می‌دهد که در هر عمقی در منطقه‌ای به قطر ۲ تا ۲/۵ برابر قطر ستون سنگی روانگرایی رخ نخواهد داد. همچنین در حالت گروهی به ازای نسبت فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها به قطر ستون برابر ۳ و کمتر از آن، ستون‌های اطراف به ستون مرکزی

طول خط امتداد یافته است. ضلع پایینی این ذوزنقه ۵/۱۱ متر و ضلع بالایی آن ۳/۴ متر است. تراورس نیز به صورت مکعب مستطیل مدلسازی شده است که ارتفاع مقطع آن ۲۲ سانتی متر بوده و طول آن نیز ۲/۶ متر است. خاکریز، لایه بالاست و تراورسها به صورت یکپارچه مدلسازی شده‌اند.

۲-۳-۲- ریل

ریل UIC60 به صورت یک مکعب مستطیل مدلسازی شده است. ابعاد مقطع این مکعب به نحوی انتخاب شده است که ممان اینرسی حول محور افقی گذرنده از مرکز سطح مقطع آن برابر با ممان اینرسی حول محور افقی گذرنده از مرکز سطح مقطع ریل UIC60 باشد. مقطع ریل دارای ۱۰/۸ سانتی متر عرض و ۱۵ سانتی متر ارتفاع است. شکل ۱ تصویری از مدل ساخته شده در نرم افزار را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مدل مش بندی شده با المان نامحدود

خصوصیات مصالح شامل: جرم مخصوص، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۱. خصوصیات مصالح

اجزاء مدل	جرم مخصوص کیلوگرم بر متر مکعب	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)
ریل	۷۸۵۰	۰/۳	۲۰۶۹۰۰
تراورس	۲۵۰۰	۰/۱۵	۲۹۰۰۰
بلاست	۱۹۰۰	۰/۳	۳۰۰
خاکریز	۱۶۵۹	۰/۴	۵۰
ستون سنگی	۱۹۳۷	۰/۳	۵۵
خاک بستر	۱۴۳۹	۰/۲۵	۱۵

۳- مشخصات مصالح

$2/4 \times 10^9$ نیوتن بر متر و میرایی ۲۴۸۰۰۰ نیوتن متر بر ثانیه مدلسازی شده است.

تماس بین ریل و تراورسها که در عمل توسط پابند و پد زیر ریل بوجود می‌آید به صورت یک فنر دو نقطه‌ای با سختی

بارگذاری

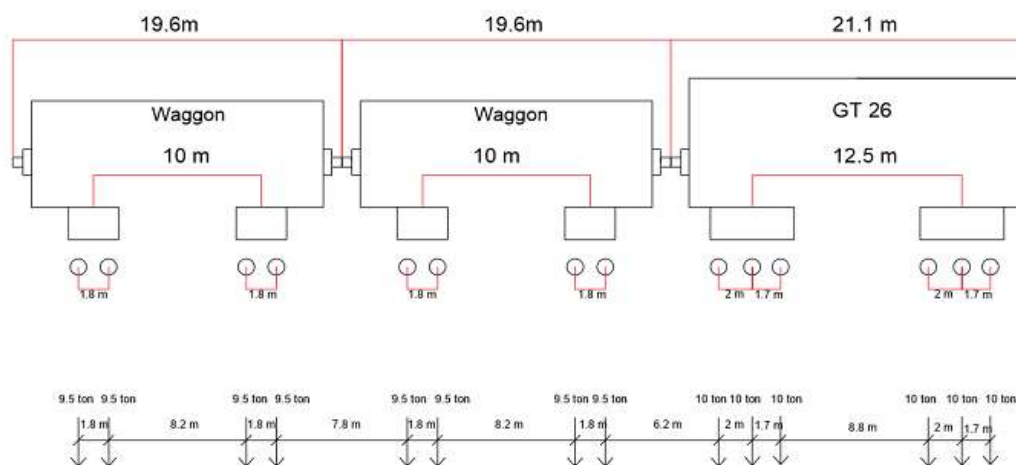
GT26 دارای دو بوژی ۳ محوره است و واگن‌ها نیز از دو بوژی ۲ محوره تشکیل شده‌اند. فاصله‌ی محورها و بوژی‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای بارگذاری از مشخصات لکوموتیو GT26 به همراه دو واگن باری استفاده شده است. بار محوری لکوموتیو GT26، ۲۰ تن بوده و بار محوری واگن‌ها ۱۹ تن می‌باشد. لکوموتیو به منظور بارگذاری مدل از بار متحرک استفاده شده است. همچنین این بارها دارای سرعت‌های ۱۵، ۸۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت جهت تحلیل حساسیت هستند.

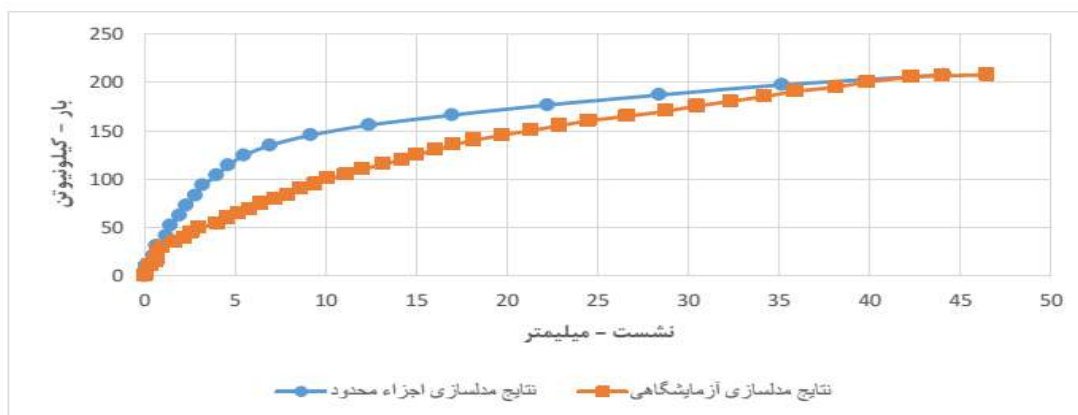
صحت‌سنجی

گرفت. ایشان در این تحقیق به ساخت مدل آزمایشگاهی از یک خاکریز احداث شده بر روی بستر ماسه‌ای سست مسلح شده با ستون‌های اختلاط عمیق^۲ DMC در مقیاس $\frac{1}{10}$ و بارگذاری مکانیکی آن تا لحظه‌ی گسیختگی پرداختند. در نمودار ۱ مقایسه مدلسازی عددی و آزمایشگاهی ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود انطباق مناسبی بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی وجود دارد.

به منظور به هنگام سازی و صحت سنجی نتایج تحلیل با نرم‌افزار، مدلسازی تحقیق آزمایشگاهی صورت گرفته توسط (Esmaili and Khajehi, 2016) در دستور کار قرار



شکل ۲. مقادیر بارهای نقطه‌ای و فاصله‌ی آن‌ها از یکدیگر



نمودار ۱. نمودار بار-نشست تسلیح با الگوی چیدمان مربعی

متغیرهای پژوهش

بر ساعت نسبت به سرعت ۱۵ کیلومتر بر ساعت به ترتیب ۷/۲، ۹/۲ و ۲۱/۷ درصد هستند.

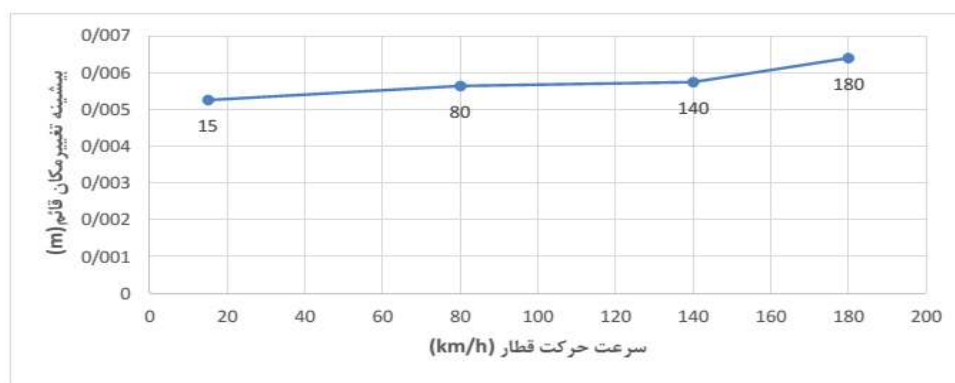
مطابق نمودار ۳ افزایش سرعت قائم ارتعاشی بسیار مشهودتر از افزایش تغییرمکان قائم است به طوری که بیشینه سرعت قائم ارتعاشی نقطه مرکزی بستر برای سرعت‌های ۸۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت نسبت به سرعت ۱۵ کیلومتر بر ساعت به ترتیب ۵/۲، ۱۰/۲ و ۱۹/۳ برابر شده است. مطابق نمودار ۴ نیز با افزایش سرعت حرکت قطار بیشینه شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر برای سرعت‌های ۸۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ نسبت به سرعت ۱۵ کیلومتر بر ساعت به ترتیب ۱۸/۵، ۶۱/۳ و ۱۵۸/۶ برابر شده است.

متغیرهای این پژوهش شامل: سرعت حرکت قطار (۱۵، ۸۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت)، قطر ستون‌ها (۷۵ و ۱۵۰ سانتی‌متر)، فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها (۳۰۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر) و چیدمان ستون‌ها (مثنی و مربعی) است. بنابراین، مجموع کل تحلیل‌های صورت گرفته توسط نرم‌افزار جهت تحلیل حساسیت، ۳۲ تحلیل است.

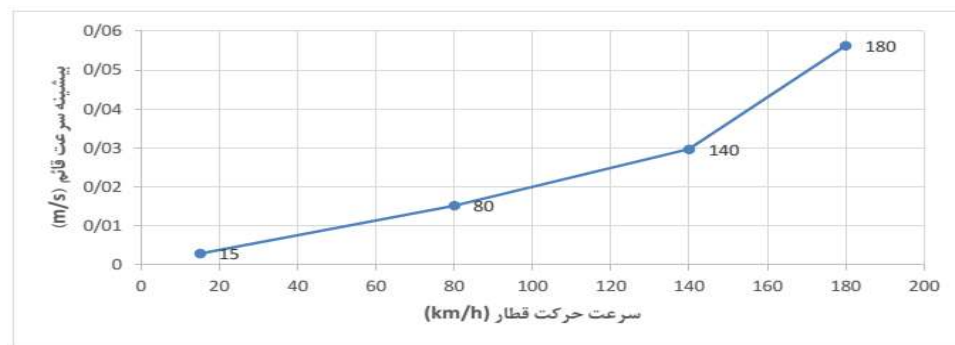
بررسی نتایج

بررسی تاثیر سرعت حرکت قطار بر پارمترهای ارتعاشی

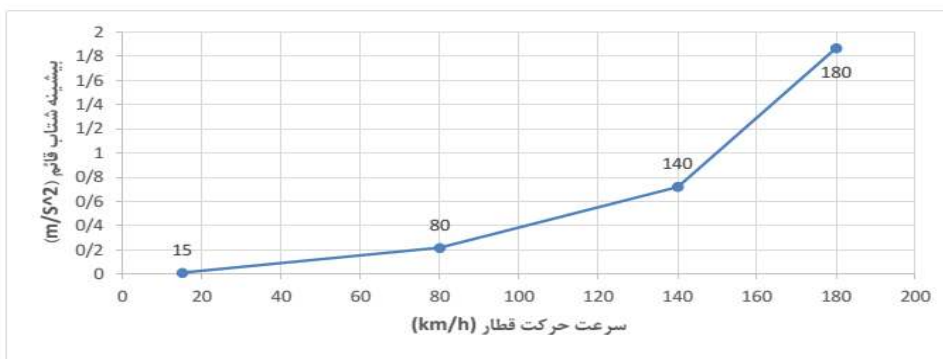
همانطور که در نمودار ۲ ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت از ۱۵ تا ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت میزان تغییرمکان قائم نیز افزایش می‌یابد. این افزایش برای سرعت‌های ۸۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ کیلومتر



نمودار ۲. بیشینه تغییرمکان قائم نقطه مرکزی بستر در حالت فاقد تسلیح بستر در برابر سرعت حرکت قطار



نمودار ۳. بیشینه سرعت قائم نقطه مرکزی بستر در حالت فاقد تسلیح بستر در برابر سرعت حرکت قطار

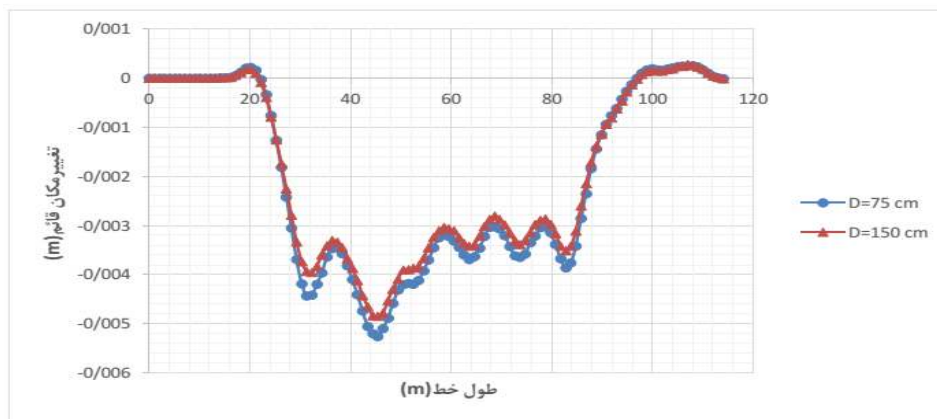


نمودار ۴. بیشینه شتاب قائم نقطه مرکزی بستر در حالت فاقد تسلیح بستر در مقابل سرعت حرکت قطار

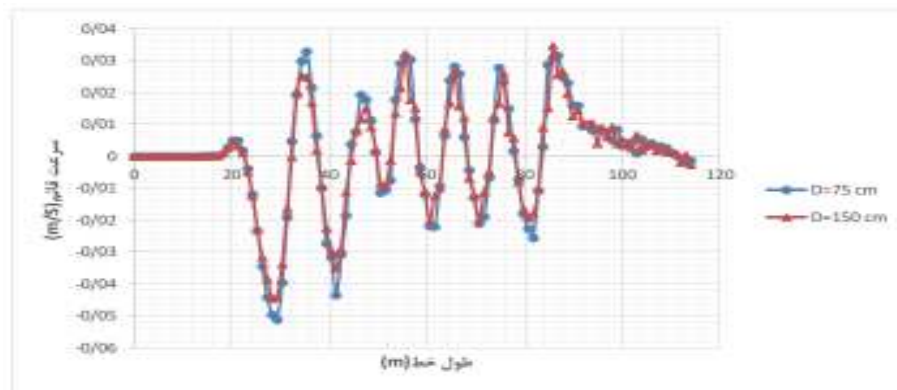
بررسی تاثیر قطر ستونها بر پارامترهای ارتعاشی

قائم مرکز بستر کاهش یافته است. در حالت‌های مختلف ستون‌های سنگی به قطر ۷۵ و ۱۵۰ سانتی‌متر میزان تغییر مکان قائم مرکز بستر را به ترتیب ۵/۱ تا ۱۱/۲ درصد و ۱۰/۸ تا ۱۹/۲ درصد کاهش داده‌اند.

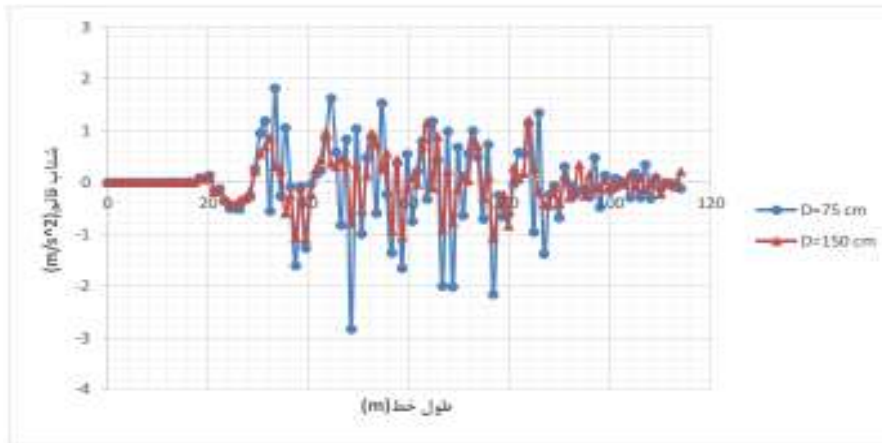
انتظار می‌رود با افزایش قطر ستون‌ها به دلیل افزایش سختی و همچنین افزایش جرم ستون‌ها، پایداری آن‌ها در برابر ارتعاش افزایش یابد که در ادامه این مسئله مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در نمودار ۵ مشاهده می‌شود با افزایش قطر ستون‌ها از ۷۵ به ۱۵۰ سانتی‌متر میزان تغییر مکان



نمودار ۵. تغییر مکان قائم ارتعاشی مرکز بستر (چیدمان مثلثی، $V=140 \text{ Km/h}$, $R=200 \text{ cm}$)



نمودار ۶. سرعت قائم ارتعاشی مرکز بستر (چیدمان مربعی، $V=180 \text{ Km/h}$, $R=300 \text{ cm}$)



نمودار ۷. شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر (چیدمان مثلثی، $R=200\text{ cm}$ ، $V=180\text{ Km/h}$)

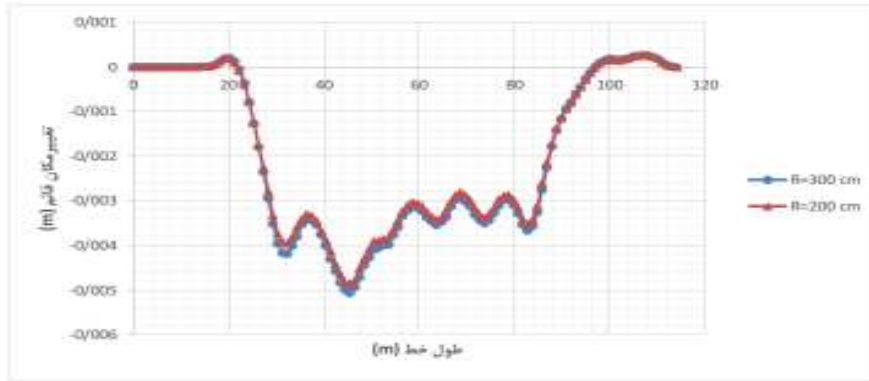
متوسط آن ۶/۸ درصد است. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که افزایش قطر ستون‌ها در مقابل کاهش فاصله‌ی مرکز به مرکز آن‌ها تا حدودی تاثیر بیشتری در کاهش تغییرمکان قائم مرکز خاک بستر دارد. بجز ۵ حالت از ۱۶ حالت مختلف که کاهش فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها موجب افزایش دامنه تغییرات سرعت قائم ارتعاشی مرکز بستر شده است در سایر حالت‌ها دامنه تغییرات سرعت قائم ارتعاشی مرکز بستر در فاصله مرکز به مرکز ۲۰۰ سانتی‌متر، ۳ تا ۱۰/۵ درصد کمتر از زمانی است که فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها ۳۰۰ سانتی‌متر است که میانگین آن ۶/۱ درصد است (نمودار ۹). این در شرایطی است که افزایش قطر ستون‌ها از ۷۵ به ۱۵۰ سانتی‌متر دامنه تغییرات سرعت قائم ارتعاشی مرکز بستر را ۳/۵ تا ۲۴/۱ درصد و به طور متوسط ۹/۲ درصد بیشتر کاسته است. افزایش قطر ستون‌ها موثرتر از کاهش فاصله مرکز به مرکز آن‌ها است در اکثر حالت‌ها کاهش فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها از ۳۰۰ به ۲۰۰ سانتی‌متر تاثیر منفی بر دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی داشته است. به عبارت دیگر فاصله مرکز به مرکز ۳۰۰ سانتی‌متری بین ستون‌ها عملکرد بهتری نسبت به فاصله‌ی ۲۰۰ سانتی‌متری در کاهش دامنه‌ی تغییرات شتاب قائم ارتعاشی دارد. برای مثال در نمودار ۱۰ فاصله‌ی مرکز به مرکز ۳۰۰ سانتی‌متری بین ستون‌ها دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر را ۱۶/۷ درصد کاهش داده است. اما زمانی که در همان شرایط فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها به ۲۰۰ سانتی‌متر کاهش یافته دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی ۴۵/۲ درصد افزایش یافته است. این در شرایطی است که افزایش قطر ستون‌ها از ۷۵ به ۱۵۰ سانتی‌متر جز در ۵ حالت دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی را ۱/۷ تا ۷۳/۵ درصد و به طور میانگین ۱۵/۲ درصد کاهش داده است.

همانطور که در نمودار ۶ قابل مشاهده است با افزایش قطر ستون‌ها از ۷۵ به ۱۵۰ سانتی‌متر دامنه تغییرات سرعت قائم ارتعاشی کاهش یافته است. در حالت‌های مختلف ستون‌های سنگی ۳/۲ تا ۱۹/۸ درصد و ۱۴/۸ تا ۲۷/۹ درصد کاهش در دامنه تغییرات سرعت قائم ارتعاشی مرکز بستر به ترتیب برای قطرهای ۷۵ و ۱۵۰ سانتی‌متر نشان می‌دهند. در مورد بیشینه سرعت قائم ارتعاشی نیز ستون‌هایی به قطر ۷۵ و ۱۵۰ سانتی‌متر در حالت‌های مختلف به ترتیب ۱ تا ۱۹/۵ درصد و ۱۴/۵ تا ۳۰/۳ درصد کاهش نشان می‌دهند. مطابق نمودار ۷ نیز ستون‌های سنگی با قطرهای ۷۵ و ۱۵۰ سانتی‌متر در حالت‌های مختلف دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر را به ترتیب ۳/۹ تا ۲۵/۴ درصد و ۴/۹ تا ۲۷/۹ درصد کاهش داده‌اند. در مورد بیشینه شتاب قائم ارتعاشی در حالت‌های مختلف ستون‌های سنگی ۴ تا ۲۸ درصد و ۵/۷ تا ۴۲/۷ درصد به ترتیب برای قطرهای ۷۵ و ۱۵۰ سانتی‌متر کاهش ایجاد کرده‌اند.

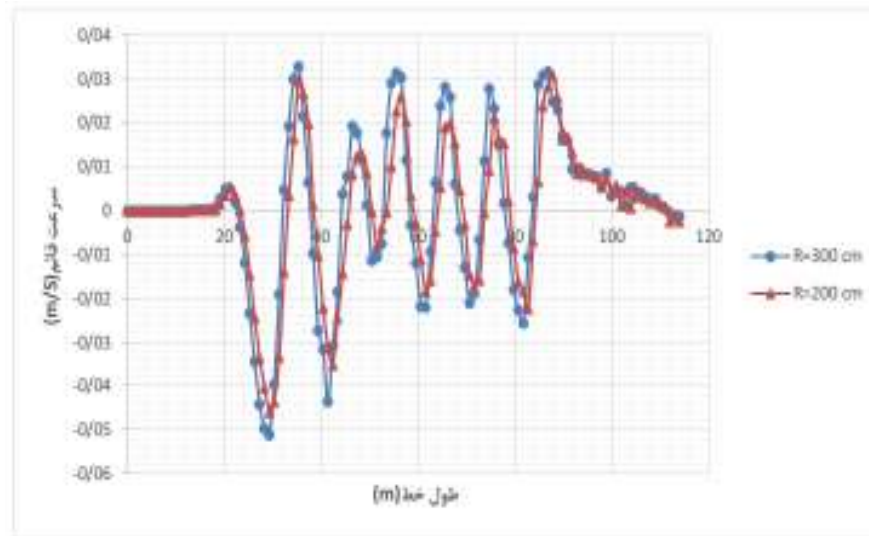
بررسی تاثیر فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها بر

پارامترهای ارتعاشی

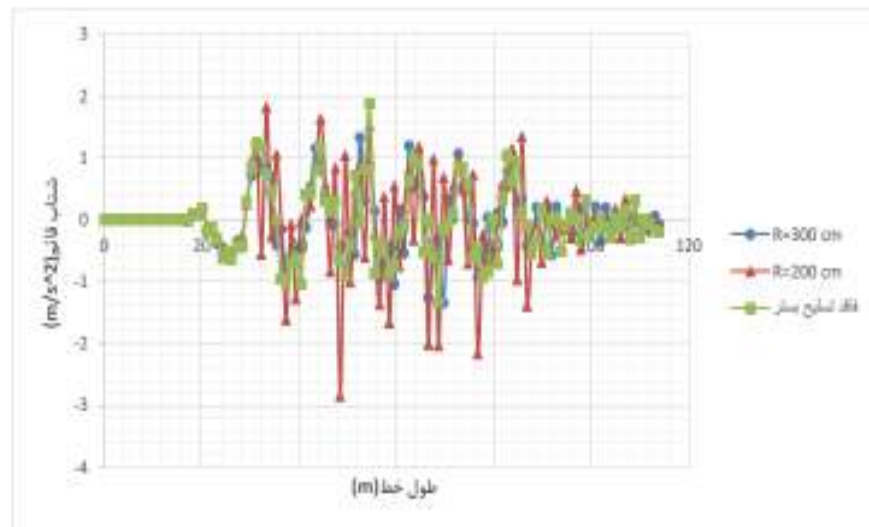
به نظر می‌رسد کاهش فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها موجب کاهش مقادیر پارامترهای ارتعاشی گردد که در ادامه این موضوع مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانطور که در نمودار ۸ قابل مشاهده است کاهش فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها از ۳۰۰ به ۲۰۰ سانتی‌متر تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش تغییرمکان مرکز بستر نداشته است. در حالت‌های مختلف کاهش فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها از ۳۰۰ به ۲۰۰ سانتی‌متر مقدار بیشینه تغییرمکان قائم مرکز بستر را ۲/۶ تا ۸ درصد کاهش داده است که مقدار متوسط آن ۴/۳ درصد است. این در شرایطی است که افزایش قطر ستون‌ها از ۷۵ به ۱۵۰ سانتی‌متر بیشینه تغییرمکان قائم مرکز ستون میانی را ۵/۷ تا ۹/۸ کاهش می‌دهد که مقدار



نمودار ۸. تغییر مکان قائم ارتعاشی مرکز بستر (چیدمان مثلثی، $V=140\text{ Km/h}$, $D=150\text{ cm}$)



نمودار ۹. سرعت قائم ارتعاشی مرکز بستر (چیدمان مربعی، $V=180\text{ Km/h}$, $D=75\text{ cm}$)

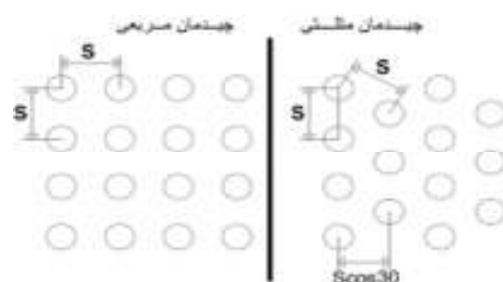


نمودار ۱۰. شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر (چیدمان مثلثی، $V=180\text{ Km/h}$, $D=75\text{ cm}$)

بررسی تاثیر الگوی چیدمان ستون‌ها بر پارامترهای ارتعاشی

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است در هر دو الگوی چیدمان مربعی و مثلثی فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها برابر S است، اما نحوه قرارگیری ستون‌ها در مجاورت یکدیگر در چیدمان مثلثی به گونه‌ای است که فاصله دو ردیف ستون مجاور هم در آن حالت برابر $Scos 30^\circ$ شده است. بنابراین، در الگوی چیدمان مثلثی فاصله ردیف‌های مجاور کمتر بوده و در عرض بزرگتر تعداد ردیف ستون‌های بیشتری جای خواهد گرفت. بنابراین، می‌توان ادعا کرد در صورت استفاده از الگوی چیدمان مثلثی تعداد ردیف‌های بیشتر ستون‌ها سبب افزایش

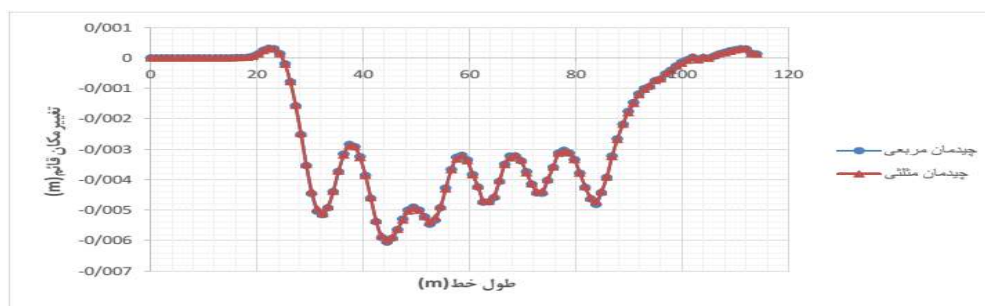
بیشتر سختی خاک بهسازی شده نسبت به الگوی چیدمان مربعی خواهد شد، و الگوی چیدمان مثلثی در کاهش پارامترهای ارتعاشی بهتر عمل خواهد کرد. اما از آنجایی که هدف ما صرفاً بررسی تاثیر شکل قرارگیری ستون‌ها در مجاورت همدیگر است، مقایسه بین این دو حالت به ازای تعداد ردیف‌های برابر انجام شده است. در واقع تفاوت اصلی بین دو الگوی چیدمان در این پژوهش، تمرکز بیشتر ردیف ستون‌های مجاور در نزدیکی منبع تولید ارتعاشات در الگوی چیدمان مثلثی نسبت به الگوی چیدمان مربعی است.



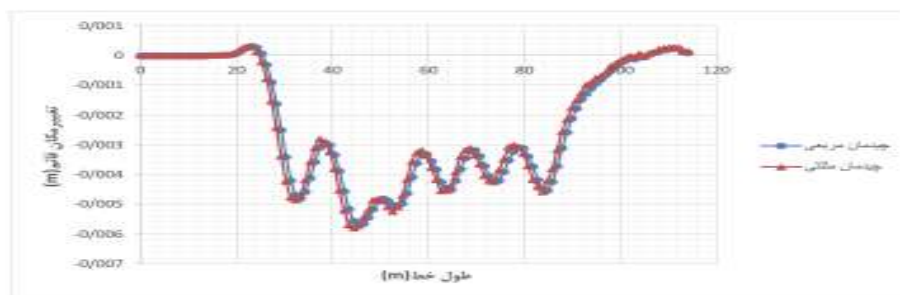
شکل ۳. مقایسه‌ی الگوی چیدمان مربعی و مثلثی

نمودار و نمودار قبلی تنها در فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون-هاست. به طور کلی زمانی که فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها ۳۰۰ سانتی‌متر است الگوی چیدمان مثلثی به اندازه ۰/۲ تا ۱/۶ درصد در حالت‌های مختلف عملکرد بهتری در کاهش بیشینه تغییرمکان قائم مرکز بستر نسبت به الگوی چیدمان مربعی دارد و زمانی که فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها ۲۰۰ سانتی‌متر است الگوی چیدمان مربعی به اندازه ۰/۳ تا ۳/۳ درصد در حالت‌های مختلف عملکرد بهتری در کاهش بیشینه تغییرمکان قائم مرکز بستر نسبت به الگوی چیدمان مثلثی دارد.

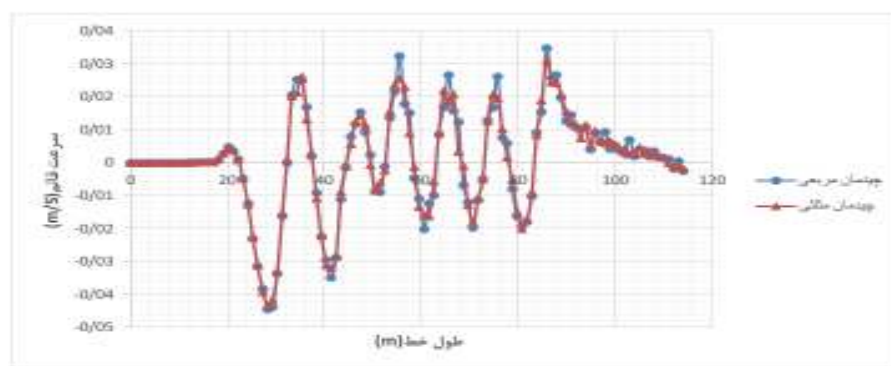
همانطور که در نمودار ۱۱ مشاهده می‌شود الگوی چیدمان مربعی و مثلثی تفاوت زیادی در کاهش تغییرمکان قائم ارتعاشی مرکز بستر با یکدیگر ندارند. مطابق این نمودار الگوی چیدمان مربعی سبب ۵/۶ درصد کاهش و الگوی چیدمان مثلثی سبب ۶/۶ درصد کاهش در بیشینه تغییرمکان قائم ارتعاشی مرکز بستر شده‌اند. در نمودار ۱۲ نیز الگوهای چیدمان مربعی و مثلثی به ترتیب ۱۱/۲ و ۹/۷ درصد بیشینه تغییرمکان قائم ارتعاشی مرکز بستر را کاهش داده‌اند که برخلاف حالت قبلی الگوی چیدمان مربعی عملکرد مناسب‌تری دارد. تفاوت بین این



نمودار ۱۱. تغییر مکان قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی ($V=180\text{ Km/h}$, $D=75\text{ cm}$, $R=300\text{ cm}$)



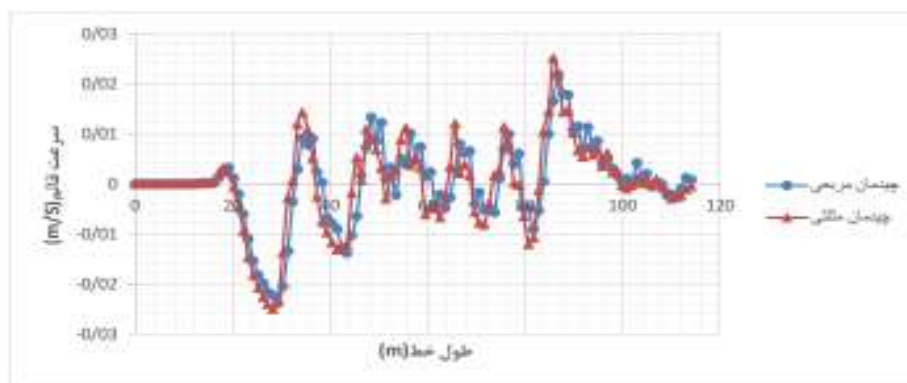
نمودار ۱۲. تغییر مکان قائم ارتعاشی مرکز بستر ($V=180\text{ Km/h}$, $D=75\text{ cm}$, $R=200\text{ cm}$)



نمودار ۱۳. سرعت قائم ارتعاشی مرکز بستر ($V=180\text{ Km/h}$, $D=150\text{ cm}$, $R=300\text{ cm}$)

تغییرات سرعت قائم ارتعاشی مرکز بستر زمانی که فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها ۳۰۰ سانتی‌متر است الگوی چیدمان مثلثی در حالت‌های مختلف به اندازه‌ی ۰/۹ تا ۵ درصد نسبت به الگوی چیدمان مربعی موفق‌تر بوده است. و برعکس زمانی که فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها ۲۰۰ سانتی‌متر است الگوی چیدمان مربعی در حالت‌های مختلف به اندازه ۱/۲ تا ۱۱/۲ درصد نسبت به الگوی چیدمان مثلثی موفق‌تر عمل کرده است.

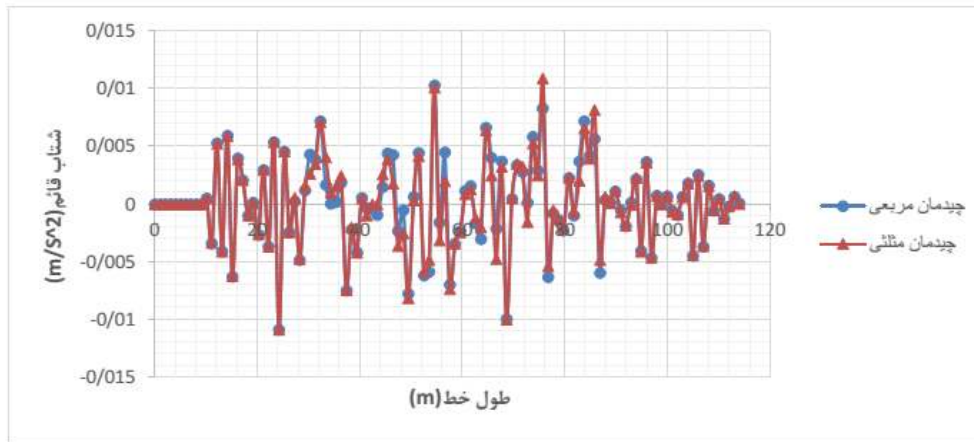
در نمودار ۱۳ که فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها ۳۰۰ سانتی‌متر است الگوهای چیدمان مثلثی و مربعی دامنه‌ی تغییرات سرعت قائم ارتعاشی مرکز بستر را به ترتیب ۲۲/۳ و ۱۷/۳ درصد کاهش داده‌اند. و در نمودار ۱۴ که فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها ۲۰۰ سانتی‌متر است الگوهای چیدمان مثلثی و مربعی دامنه‌ی تغییرات سرعت قائم ارتعاشی مرکز بستر را به ترتیب ۷/۷ و ۱۵/۸ درصد کاهش داده‌اند. در حالت کلی در مورد دامنه



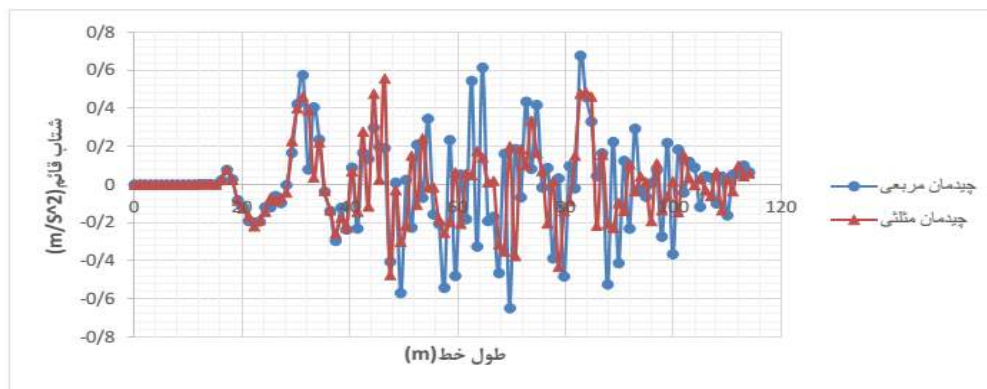
نمودار ۱۴. سرعت قائم ارتعاشی مرکز بستر ($V=140\text{ Km/h}$, $D=75\text{ cm}$, $R=200\text{ cm}$)

بستر را به ترتیب ۶/۹ درصد کاهش و ۱۱/۳ درصد افزایش داده‌اند که نشان دهنده عملکرد بهتر الگوی چیدمان مثلثی است اما در نمودار ۱۸ الگوهای چیدمان مثلثی و مربعی دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر را به ترتیب ۴۵/۲ درصد افزایش و ۲۳/۳ درصد کاهش داده‌اند که نشان دهنده عملکرد بهتر الگوی چیدمان مربعی است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت در مورد دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی در هر دو فاصله مرکز به مرکز ۳۰۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر برای ستون‌ها الگوهای چیدمان مثلثی و مربعی رفتارهای متفاوتی دارند و نمی‌توان با قطعیت در مورد عملکرد بهتر هر کدام نسبت به دیگری در وضعیت‌های مختلف اظهار نظر کرد.

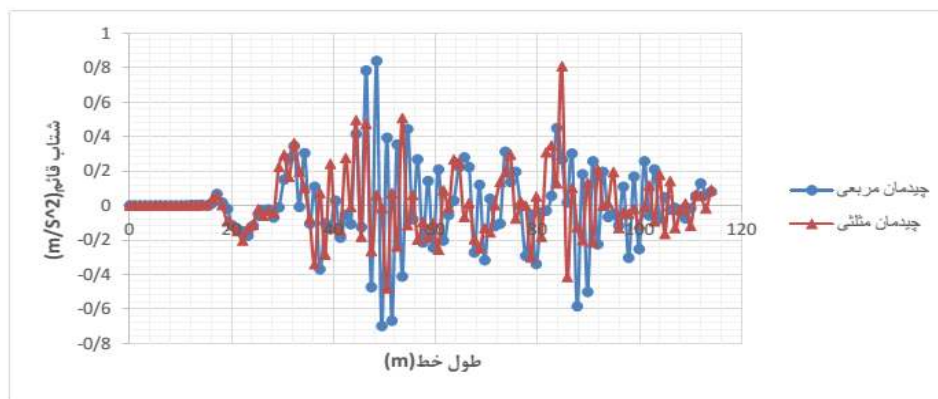
در نمودارهای ۱۵ و ۱۶ که مربوط به شتاب قائم ارتعاشی هستند فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها ۳۰۰ سانتی‌متر است. در نمودار ۱۵ الگوهای چیدمان مثلثی و مربعی دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر را به ترتیب ۵/۶ و ۱/۸ درصد کاهش داده‌اند که نشان دهنده عملکرد بهتر الگوی چیدمان مربعی است اما در نمودار ۱۶ الگوهای چیدمان مثلثی و مربعی دامنه‌ی تغییرات شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر را به ترتیب ۲۵/۴ و ۳/۹ درصد کاهش داده‌اند که نشان دهنده عملکرد بهتر الگوی چیدمان مثلثی است. در نمودارهای ۱۷ و ۱۸ فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها ۲۰۰ سانتی‌متر است. در نمودار ۱۷ الگوهای چیدمان مثلثی و مربعی دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی مرکز



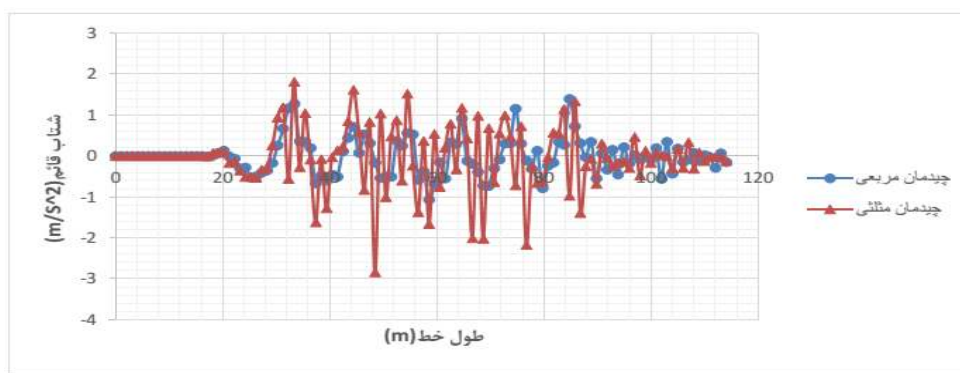
نمودار ۱۵. شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر (V=۱۵ Km/h , D=۷۵ cm , R=۳۰۰ cm)



نمودار ۱۶. شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر (V=۱۴۰ Km/h , D=۷۵ cm , R=۳۰۰ cm)



نمودار ۱۷. شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر ($V=140 \text{ Km/h}$, $D=150 \text{ cm}$, $R=200 \text{ cm}$)



نمودار ۱۸. شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر ($V=180 \text{ Km/h}$, $D=75 \text{ cm}$, $R=200 \text{ cm}$)

بررسی پدیده تشدید در برخی حالت‌ها

۳- افزایش ۴۵/۱۷ درصدی در قطر ۷۵ و فاصله مرکز به مرکز ۲۰۰ سانتی‌متری در چیدمان مثلثی و سرعت ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت.

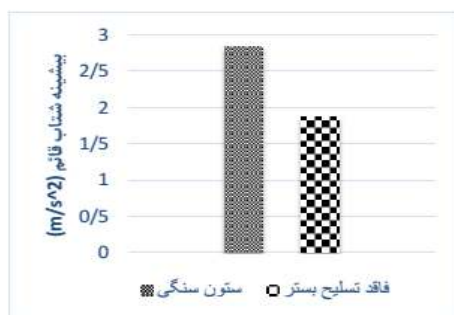
۴- افزایش ۱۱/۳۱ درصدی در قطر ۱۵۰ و فاصله مرکز به مرکز ۲۰۰ سانتی‌متری در چیدمان مربعی و سرعت ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت.

همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین مقادیر تشدید مربوط به حالت دوم و سوم است که در هر دوی آن‌ها قطر و فاصله مرکز به مرکز و چیدمان ستون‌ها یکسان است و سرعت حرکت قطار به ترتیب ۱۴۰ و ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت است. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که وقوع پدیده تشدید به تک تک پارامترهای مربوط به ستون‌ها و همچنین سرعت حرکت قطار بستگی دارد.

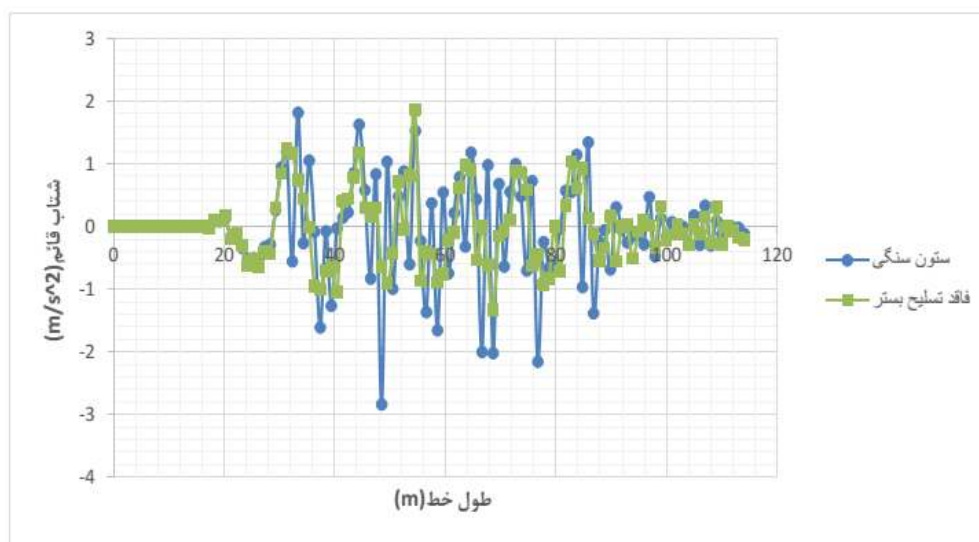
در مورد دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی در برخی حالت‌ها ستون‌های سنگی نه تنها پارامتر مذکور را کاهش نداده‌اند بلکه آن را به مقدار زیادی افزایش داده‌اند که نشانگر وقوع پدیده تشدید است. برای مثال در نمودار ۱۹ حضور ستون‌های سنگی با مشخصات گفته شده دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر را ۴۵/۲ درصد افزایش داده است و مطابق نمودار ۲۰ نیز بیشینه شتاب قائم ارتعاشی را ۵۲ افزایش داده است. در مجموع در ۴ حالت پدیده تشدید در مورد شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر اتفاق افتاده است که عبارت‌اند از:

۱- افزایش ۵/۷۳ درصدی در قطر ۷۵ و فاصله مرکز به مرکز ۳۰۰ سانتی‌متری در چیدمان مثلثی و سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت.

۲- افزایش ۳۸/۳۸ درصدی در قطر ۷۵ و فاصله مرکز به مرکز ۲۰۰ سانتی‌متری در چیدمان مثلثی و سرعت ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت.



نمودار ۲۰. بیشینه شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر (چیدمان مثلثی، $V=180\text{ Km/h}$ ، $R=200\text{ cm}$ ، $D=75\text{ cm}$)



نمودار ۱۹. شتاب قائم ارتعاشی مرکز بستر (چیدمان مثلثی، $V=180\text{ Km/h}$ ، $R=200\text{ cm}$ ، $D=75\text{ cm}$)

۴-بحث

مثلثی و مربعی به ترتیب ۴/۸۶ و ۵/۱۵ درصد است که کمترین مقادیر درصد جایگزینی مصالح بین تمام حالت‌ها می‌باشد. بدیهی است هرچقدر درصد مساحت جایگزینی بیشتر باشد هزینه اجرای آن بالاتر خواهد بود.

به نظر می‌رسد به منظور اقتصادی شدن بهسازی بایستی یکی از حالت‌های زیر انتخاب شود:

۱- قطر ستون‌ها ۷۵ سانتی‌متر با فاصله مرکز به مرکز ۲۰۰ سانتی‌متر.

۲- قطر ستون‌ها ۱۵۰ سانتی‌متر با فاصله مرکز به مرکز ۳۰۰ سانتی‌متر.

در حالت اول الگوی چیدمان مربعی عملکرد بهتری نسبت به الگوی چیدمان مثلثی دارد و نسبت مساحت جایگزینی آن

در جدول ۲ درصد کاهش هر یک از پارامترهای ارتعاشی برای وضعیت‌های مختلف متغیرهای مستقل به صورت میانگین چهار سرعت (۱۵، ۸۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت) ارائه شده است. همانطور که در این جدول قابل مشاهده است بیشترین کاهش پارامترهای ارتعاشی در حالتی که قطر ستون‌ها ۱۵۰ و فاصله مرکز به مرکز آن‌ها ۲۰۰ سانتی‌متر است اتفاق افتاده است. این حالت با ۳۹/۴۷ و ۴۱/۲۳ درصد مساحت جایگزینی به ترتیب برای چیدمان‌های مثلثی و مربعی بیشترین مساحت جایگزینی را دارند. همچنین، در حالتی که قطر ستون‌ها ۷۵ و فاصله مرکز به مرکز آن‌ها ۳۰۰ سانتی‌متر است کمترین میزان کاهش پارامترهای ارتعاشی اتفاق افتاده است. در این حالت درصد جایگزینی مصالح برای الگوهای چیدمان

تغییرات شتاب قائم را $2/76$ درصد بیشتر کاهش داده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در هر دو حالت اختلاف بین درصد جایگزینی بیشتر از اختلاف بین درصد کاهش پارامترهای ارتعاشی است. در بخش‌های قبلی نیز به این نتیجه رسیدیم که تاثیر افزایش قطر ستون‌ها در کاهش پارامترهای ارتعاشی به مراتب بیشتر از تاثیر کاهش فاصله مرکز به مرکز آن‌هاست، بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ستون‌های سنگی در حالت دوم مناسب‌ترین وضعیت را دارد. همچنین در بخش‌های قبلی به این نتیجه رسیدیم، زمانی که فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها 300 سانتی‌متر است، چیدمان مثلثی عملکرد بهتری در کاهش پارامترهای ارتعاشی بخصوص در مورد تغییر مکان و دامنه تغییرات سرعت قائم ارتعاشی دارد. در مجموع می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از ستون‌های سنگی با قطر 150 و فاصله مرکز به مرکز 300 سانتی‌متر با چیدمان مثلثی بهترین وضعیت متغیرهای مستقل در این پژوهش را به همراه خواهد داشت.

$11/78$ درصد است. و بیشینه تغییر مکان قائم، دامنه تغییرات سرعت قائم و دامنه تغییرات شتاب قائم را به ترتیب 10 ، $14/23$ و $13/56$ درصد کاهش داده است. اگر این حالت را با حالتی که بهترین عملکرد را در کاهش پارامترهای ارتعاشی دارد، مقایسه کنیم متوجه می‌شویم که نسبت مساحت جایگزینی در آن حدود 28 درصد کمتر است و در مقابل بیشینه تغییر مکان قائم، دامنه تغییرات سرعت قائم و دامنه تغییرات شتاب قائم به ترتیب $7/63$ ، $9/71$ و $0/52$ درصد کمتر کاهش پیدا کرده است. در حالت دوم الگوی چیدمان مثلثی تا حدودی عملکرد بهتری نسبت به الگوی چیدمان مربعی دارد و نسبت مساحت جایگزینی آن $19/44$ درصد است. و بیشینه تغییر مکان قائم، دامنه تغییرات سرعت قائم و دامنه تغییرات شتاب قائم را به ترتیب $12/54$ ، $19/42$ و $16/84$ درصد کاهش داده است. در مقایسه با حالتی که بهترین عملکرد را دارد نسبت مساحت جایگزینی آن حدود $20/5$ درصد کمتر است و در مقابل بیشینه تغییر مکان قائم، دامنه تغییرات سرعت قائم و دامنه تغییرات شتاب قائم، دامنه تغییرات سرعت قائم و دامنه تغییرات شتاب قائم را به ترتیب $5/09$ و $4/52$ درصد کمتر کاهش داده و دامنه

جدول ۲. میانگین کاهش پارامترهای ارتعاشی برای ۴ حالت سرعت در مرکز خاک بستر

قطر ستون‌ها (cm)	فاصله مرکز به مرکز (cm)	چیدمان	درصد مساحت جایگزینی	میانگین کاهش پارامترهای ارتعاشی برای ۴ حالت سرعت		
				بیشینه تغییر مکان قائم	دامنه تغییرات سرعت قائم	دامنه تغییرات شتاب قائم
۷۵	۳۰۰	مثلثی	$4/86$	$5/97$	$10/47$	
		مربعی	$5/15$	$10/62$	$11/96$	
	مثلثی	$11/19$	$8/95$	$-17/21$		
	مربعی	$11/78$	$14/23$	$13/56$		
۱۵۰	۳۰۰	مثلثی	$19/44$	$12/54$	$16/84$	
		مربعی	$20/72$	$17/42$	$15/98$	
	مثلثی	$39/47$	$23/94$	$14/08$		
	مربعی	$41/23$	$22/04$	$12/10$		

۵- نتیجه گیری

می‌گردد. هرچقدر درصد مساحت بهسازی بیشتر باشد هزینه اجرای آن نیز بالاتر خواهد بود. بنابراین، به منظور اقتصادی شدن بهسازی بایستی متغیرهای قطر و فاصله مرکز به مرکز به نحوی انتخاب شود که این امر محقق گردد. تاثیر افزایش قطر ستون‌ها در کاهش پارامترهای ارتعاشی به مراتب بیشتر از تاثیر کاهش فاصله مرکز به مرکز آن‌هاست، بخصوص در مورد کاهش سرعت و شتاب قائم ارتعاشی. زمانی که فاصله

با افزایش سرعت حرکت قطار مقادیر پارامترهای ارتعاشی نیز افزایش می‌یابد. این افزایش در مورد شتاب قائم ارتعاشی بسیار شدیدتر از افزایش سرعت قائم ارتعاشی است و افزایش سرعت قائم نیز بسیار مشهودتر از افزایش تغییر مکان قائم است. افزایش قطر ستون‌ها و کاهش فاصله مرکز به مرکز آن‌ها سبب افزایش درصد مساحت جایگزینی و افزایش بیشتر سختی خاک بهسازی شده و در نتیجه کاهش بیشتر پارامترهای ارتعاشی

-Hughesh, J., Withers, N., (1974), "Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 11, No. 11, pp. 234-234.

-Isaac, D.S., Girish, M.S., (2009), "Suitability of Different Materials for Stone Column Construction", Department of Civil Engineering College of Engineering, Trivandrum, Kerala, EJGE, Vol. 14, pp.1-12.

-Bryan, C., James, N., Jonathan, B., (2007), "Ground improvement using the vibrio - stone column technique". The Institution of Engineers of Ireland, pp. 1-13.

- Basack, S., Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., (2016), "Analysis of the Behavior of Stone Column Stabilized Soft Ground Supporting Transport Infrastructure", International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG), Vol. 3, No. 143, pp. 347-354.

-Shahraki, M., JOSEF WITT, K., (2015), "Improvement of soft subgrade soil using stone columns for high-speed railway tracks". International Conference on Soft Ground Engineering (ICSGE), No. 11, pp. 155-165.

-Esmaili, M., Khajehei, H., (2016), "Mechanical behavior of embankments overlying on loose subgrade stabilized by deep mixed columns". Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 8, No. 5, pp. 651-659.

مرکز به مرکز ستون‌ها ۳۰۰ سانتی‌متر است الگوی چیدمان مثلثی عملکرد بهتری در کاهش تغییر مکان قائم و سرعت قائم ارتعاشی دارد و برعکس زمانی که فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها ۲۰۰ سانتی‌متر است الگوی چیدمان مربعی عملکرد بهتری در کاهش تغییر مکان قائم و سرعت قائم ارتعاشی دارد. اما در مورد شتاب قائم ارتعاشی نمی‌توان با قطعیت در مورد عملکرد هر یک از الگوهای چیدمان ستون‌ها تصمیم‌گیری کرد. با توجه به بندهای فوق می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از ستون‌های سنگی با قطر ۱۵۰ و فاصله مرکز به مرکز ۳۰۰ سانتی‌متر با الگوی چیدمان مثلثی مناسب‌ترین وضعیت را برای متغیرهای فوق فراهم می‌آورد.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Moving Load
2. Deep Mixed Column

۷- مراجع

- مختاری، م. دهقانی، م.، (۱۳۹۳)، "تحلیل عددی تاثیر گروه ستون‌های سنگی بر ظرفیت باربری خاک‌های رس استان هرمزگان"، کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، دوره هشتم، ص. ۸-۱
- اسماعیلی، م. حکیم‌پور، س.، (۱۳۹۳)، "تحلیل عددی تاثیر ستون سنگی برای کاهش خطر روانگرایی خاک در حین زلزله"، مجله‌ی علمی-پژوهشی «عمران مدرس»، دوره چهاردهم، شماره ۳، ص. ۱۵۳-۱۶۴.

Numerical Analysis of Stone Columns Used To Improve the Base Soil of Railways

Gholam Moradi, Associated Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Hossein Alivand, M.Sc., Graduate, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Meisam Jahangiri Alikamari, Ph.D. Graduate, School of Railway Engineering, Science and Technology University, Tehran, Iran.

Alireza Abbasnejad, Assistant Professor, Marand Technical College, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

E-mail: haa9314@gmail.com

Received: June 2020 -Accepted: September 2020

ABSTRACT

One of the significant development indicators in each region is the existence of various transport systems and their accessibility. Among the various transportation methods, railroad transport due to unique advantages has attracted the attention of country policy makers. And the development of the railways network is on the agenda. To expand the railway networks, construction of railway tracks on the loose subgrades is one of the inevitable issues. Among the various soil improvement methods, stone columns due to implementation and economic efficiency are of interest. These methods increase the bearing capacity and reduce the settlement of the loose subgrade soil and improve operation quality. In this investigation has studied the influence of presence of stone columns in term of reduce the dynamic response of loose sandy subgrade soil under the train path. This investigation results show that stone columns the maximum reduce in the vibration parameters of loose sandy subgrade soil such as vertical displacement, amplitude range of vertical velocity and acceleration are respectively 19/20, 27/85 and 41/74 percent.

Keywords: Abaqus Software, Finite Element Method, Stone Columns, Vibration Parameters