بررسی تاثیر حضور ستون‌های اختلاط عمیق در زیرسازی خطوط راه‌آهن بر کاهش ارتعاشات ناشی از عبور ناوگان ریلی

علیرضا عباس‌نژاد
استادیار دانشکده فنّی و مهندسی مرند، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
abbasnejad @tabrizu.ac.ir

غلام مرادی
دانشیار، دانشکده فنّی و مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
gmoradi@tabrizu.ir

حسین علی‌وند
دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد، دانشکده فنّی و مهندسی عمران دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
Haa9314@gmail.com

میثم جهانگیری
دانش آموخته مقطع دکتری، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
m_jahangiri@rail.iust.ac.ir

چکیده

یکی از الگوهای اصلی توسعه یافتگی در هر منطقه‌ای توسعه‌ی سیستم‌های حمل و نقل و سهولت دسترسی به آنها در آن منطقه می باشد. 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 راه آهن 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 ستون‌های اختلاط عمیق به دلیل سهولت در اجرا و سازگاری با محیط زیست بسیار مورد توجه هستند. این ستون‌ها موجب افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست بستر تحت بارهای وارده می‌گردند و کیفیت بهره‌برداری را افزایش می‌دهند. در این تحقیق به بررسی تاثیر حضور ستون‌های اختلاط عمیق در زیرسازی خطوط راه‌آهن بر کاهش پاسخ‌های دینامیکی بستر سست و غیرمتراکم ماسه‌ای، تحت بارگذاری ناشی از عبور یکی از قطارهای متداول در کشور پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد در صورت استفاده از روش اختلاط عمیق پارامترهای ارتعاشی خاک ماسه‌ای سست و غیرمتراکم بستر، شامل تغییرمکان قائم، دامنه‌ی تغییرات سرعت قائم و دامنه‌ی تغییرات شتاب قائم به ترتیب حداکثر ٪۳۲/۳۶، ٪۵۳/۸۷ و ٪۵۳/۰۹ کاهش می‌یابند.

واژهای کلیدی: ستون‌های اختلاط عمیق، روش اجزاء محدود، نرم افزار آباکوس، پارامترهای ارتعاشی

Influence of presence of deep mixed columns in railways tracks subgrade in reduce the vibrations from the train path

Alireza Abbasnejad*, Gholam Moradi, Hossein Alivand, Meysam Jahanghiri

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, deep mixed columns due to implementation and economic efficiency are of interest. This method 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 deep mixed columns in term of reduce the dynamic response of loose sandy subgrade soil under the train path. This investigation results show that deep mixed 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 32/36, 53/87 and 53/09 percent.

KEYWORDS

Deep mixed columns, Finite element method, abaqus software, vibration parameters

تاریخ دریافت : ۱۳۹۷/۱۰/۰۴ تاریخ آخرین اصلاحات : ۱۴۰۰/۱۰/۲۲ تاریخ پذیرش : ۱۴۰۱/۰۲/۱۰

۱- مقدمه

یکی از عوامل موثر در عملکرد مناسب هر نوع سازه‌ای کیفیّت بستری است که سازه بر روی آن احداث می‌شود. در صورتی که این بستر کیفیّت لازم را نداشته باشد، سازه‌ی مورد نظر در حین بهره برداری دچار مشکلات و آسیب‌های جدی خواهد شد. با توجه به ماهیّت طولانی بودن مسیرهای راه و راه‌آهن و عبور آن‌ها از مناطقی با شریط ژئوتکنیکی متفاوت، قطعا مناطقی وجود خواهند داشت که خاک آن‌ها از این نظر دچار ضعف و ناکارآمدی می‌باشد. کمااینکه 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 ستون‌های اختلاط عمیق اشاره کرد. روش‌های مذکور اغلب به دلیل سازگاری با محیط زیست و سهولت در اجرا بسیار مورد توجه هستند. استفاده از این نوع ستون‌ها سبب افزایش سختی خاک، و در نتیجه کاهش نشست آن می‌شود. از این رو استفاده از روش اختلاط عمیق در بهسازی خاک بستر خطوط راه‌آهن از هر نظر مناسب بوده و در مجموع سبب بهبود پارامترهای مقاومتی مجموعه‌ی زیرسازی می‌شود.

روش اختلاط عمیق خاک (Deep Soil Mixing) که به اختصار DSM نامیده می شود، به روشی اطلاق می‌شود که در آن مواد پایدارکننده‌ای نظیر سیمان یا آهک با استفاده از یک حفار با محور توخالی بصورت مکانیکی با خاک مخلوط می‌شود. فرآیند اختلاط خاک موجب تولید ستون یکنواختی (با پهنای ثابت) از خاک و ماده افزودنی می‌گردد. این روش در طیف وسیعی از خاک‌ها از ریزدانه که شامل رس و سیلت می‌باشد تا خاک‌های درشت‌دانه ماسه‌ای کاربرد دارد. استفاده از این تکنیک منجر به بهبود قابل ملاحظه‌ی خواص مکانیکی و فیزیکی خاک محل که با سیمان، آهک یا افزودنی‌های دیگر مخلوط شده است می‌گردد. خاک بهسازی شده با این روش مقاومت بالاتر، نفوذپذیری کمتر و قابلیّت تراکم پذیری کمتری از خاک اولیه خواهد داشت.

مطالعات وسیعی توسط محققان مختلف در سرتاسر دنیا در مورد روش اختلاط عمیق و کاربرد آن‌ها در موارد مختلف انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد.

بررسی رابطه‌ی بین طول و همچنین فواصل ستون‌های آهکی- سیمانی با قطر مشخص با نشست ناشی از احداث خاکریز بر روی خاک رس چند لایه نشان داد که اگر ضخامت لایه‌های رس کم باشد، استفاده از ستون‌های آهکی - سیمانی کاهش نشست حدودا ۳۰ الی ۴۰ درصدی (با توجه به فاصله‌ی بین ستون‌ها) ایجاد خواهد کرد. همچنین در بررسی نشست‌های بلند مدت مشاهده گردید استفاده از ستون‌های مذکور منجر به کاهش نشست ۳۵ تا ۷۰ درصدی می‌شود، به طوری که استفاده از ستون‌های با فاصله‌ی یک متر بیشترین کاهش نشست و استفاده از ستون‌های با فاصله‌ی دو متر کمترین کاهش نشست را دارد. در مطالعه‌ی تغییرمکان‌های جانبی ستون‌ها ملاحظه گردید که تغییرمکان جانبی ستون‌ها در نشست‌های آنی بیشتر از نشست‌های بلند مدت است. دلیل این امر این است که با گذشت زمان و در حین زائل شدن اضافه فشار آب منفذی ستون‌ها تمایل دارد به حالت اولیه‌ی خود بازگردند[۱] .

ستون‌های شفته آهکی متراکم در دو حالت ستون شناور (floating column) و ستون دارای تکیه‌گاه انتهایی (end bearing columns) با نسبت مساحت‌های ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ سطح کل نمونه، سختی زمین نرم را به ترتیب در حالت ستون شناور ۶۰٪، ۹۰٪ و ۱۱۵٪ و در حالت ستون دارای تکیه‌گاه انتهایی ۱۵۰٪، ۲۴۰٪ و ۲۷۵٪ افزایش می‌دهد[۲].

ساخت مدل آزمایشگاهی یک خاکریز احداث شده بر روی بستر ماسه‌ای غیر متراکم مسلح شده با ستون های اختلاط عمیق در دو الگوی چیدمان مربعی و مثلثی در مقیاس $\frac{1}{10}$ و بارگذاری مکانیکی آن تا لحظه-ی گسیختگی نتایج زیر را دربر داشت: در الگوی مربعی ستون های اختلاط عمیق باعث افزایش بار گسیختگی تا ۶۴٪ و کاهش نشست تا ۴۰٪ می شود. این مقادیر برای حالت مثلثی به ترتیب ۶۳٪ و ۱۲٪ می‌باشد. نتایج کارایی بهتر ستون‌ها در چیدمان مربعی را نشان می‌دهد که علت آن سطح جایگزینی بیشتر در این حالت است. سطح جایگزینی در چیدمان مربعی ۱۱/۴۲٪ و در چیدمان مثلثی ۱۰/۸٪ بودند.[۳].

استفاده از یک نوع آرایش خاص از ستون‌های مخلوط آهک و سیمان در زیر خط ریلی، موجب تغییر در رژیم انتشار امواج و همچنین کاهش میزان ارتعاشات ناشی از عبور قطارهای سریع‌السیر در فواصل مختلف از اطراف خط می‌شود. اندازه‌گیری‌های میدانی نشان می‌دهد که برای محدوده‌ی فرکانسی پایین تا ۳۰HZ، استفاده از ستون‌های مذکور در زیر خط ارتعاشات ناشی از عبور ترافیک ریلی را تا 6db در فواصل دورتر از خط کاهش می‌دهد[۴].

بررسی پارامترهای موثر در طراحی ستون‌های مخلوط سیمانی نشان می‌دهد که ضریب اطمینان در برابر خرابی در اثر کمبود ظرفیت باربری، گسیختگی کلی و شکست خمشی به ترتیب برابر ۳۱، ۴,۱۲ و ۱,۸۲ است. بنابراین عمل خمش که در اثر تغییر مکان جانبی بخشی از ستون که در خاک رس نرم قرار گرفته است بوجود می‌آید، عامل کنترل کننده در طراحی این ستون‌ها است.[۵]

با مرور تحقیقات و مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی ستون‌های اختلاط عمیق ملاحظه می‌شود که این ستون‌ها تحت بارهای بهره‌برداری یعنی بارگذاری ناشی از عبور ناوگان ریلی کمتر مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته‌اند. از این‌رو هدف از انجام این پژوهش بررسی تاثیر حضور ستون‌های اختلاط عمیق در زیرسازی خطوط راه‌آهن بر کاهش پارامترهای ارتعاشی خاک بستر تحت بارگذاری یکی از قطارهای متداول در کشور می‌باشد.

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 ذیل است:

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

۲-۱- خاک بستر و ستون‌ها

خاک بستر به‌صورت یک مکعب مستطیل مدلسازی شده است که ۴۰ متر طول ۱۰۵ متر عرض و ۳۰ متر عمق دارد و در قسمت میانی آن سوراخ‌هایی جهت جاگذاری ستون‌ها تعبیه شده است. ستون‌ها نیز به صورت استوانه مدلسازی شده‌اند که طول آن‌ها ۴ متر بوده و در دو قطر ۰/۷۵ متر و ۱/۵ متر جهت تحلیل حساسیّت هستند. خاک بستر به همراه ستون‌ها به‌صورت یکپارچه مدلسازی شده است.

۱-۲- خاکریز، بالاست و تراورس‌ها

خاکریز دارای مقطع ذوزنقه است که طول آن به اندازه‌ی ۴۰ متر طول خط امتداد یافته است. ضلع پایینی این ذوزنقه ۱۵ متر و ضلع بالایی آن ۷ متر بوده و ارتفاع خاکریز نیز ۲ متر است. لایه بالاست نیز دارای مقطع ذوزنقه است که به اندازه ۴۰ متر طول خط امتداد یافته است. ضلع پایینی این ذوزنقه ۵/۱۱ متر و ضلع بالایی آن ۳/۴ متر است. تراورس نیز به‌صورت مکعب مستطیل مدلسازی شده است که ارتفاع مقطع آن ۲۲ سانتی‌متر بوده و طول آن نیز ۲/۶ متر است. خاکریز، لایه بالاست و تراورس‌ها به‌صورت یکپارچه مدلسازی شده‌اند.

۱-۳- ریل

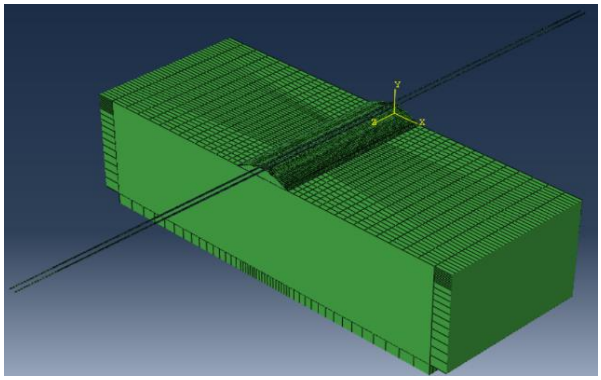
ریل UIC60 به‌صورت یک مکعب مستطیل مدلسازی شده است. ابعاد مقطع این مکعب به نحوی انتخاب شده است که ممان اینرسی حول محور افقی گذرنده از مرکز سطح مقطع آن برابر با ممان اینرسی حول محور افقی گذرنده از مرکز سطح مقطع ریل UIC60 باشد. مقطع ریل دارای ۱۰/۸ سانتی‌متر عرض و ۱۵ سانتی‌متر ارتفاع است. شکل۱ تصویری از مدل ساخته شده در نرم افزار را نشان می‌دهد.

۲- مشخصات مصالح و مدل رفتاری

خصوصیات مصالح شامل: جرم مخصوص، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته در جدول زیر آورده شده است. مدل رفتاری مصالح نیز خطی در نظر گرفته شده است. چرا که این مدل رفتاری برای مدلسازی بسترهای تحت بارگذاری ناشی از عبور ناوگان ریلی مناسب است[۶].

تماس بین ریل و تراورس‌ها که در عمل توسط پابند و پد زیر ریل بوجود می‌آید به صورت یک فنر دو نقطه‌ای با سختی ۲/۴×۱۰۹ نیوتن بر متر و میرایی ۲۴۸۰۰۰ نیوتن متر بر ثانیه مدلسازی شده است.

شکل ۱- مدل مش‌بندی شده با المان نامحدود



جدول۱- خصوصیات مصالح

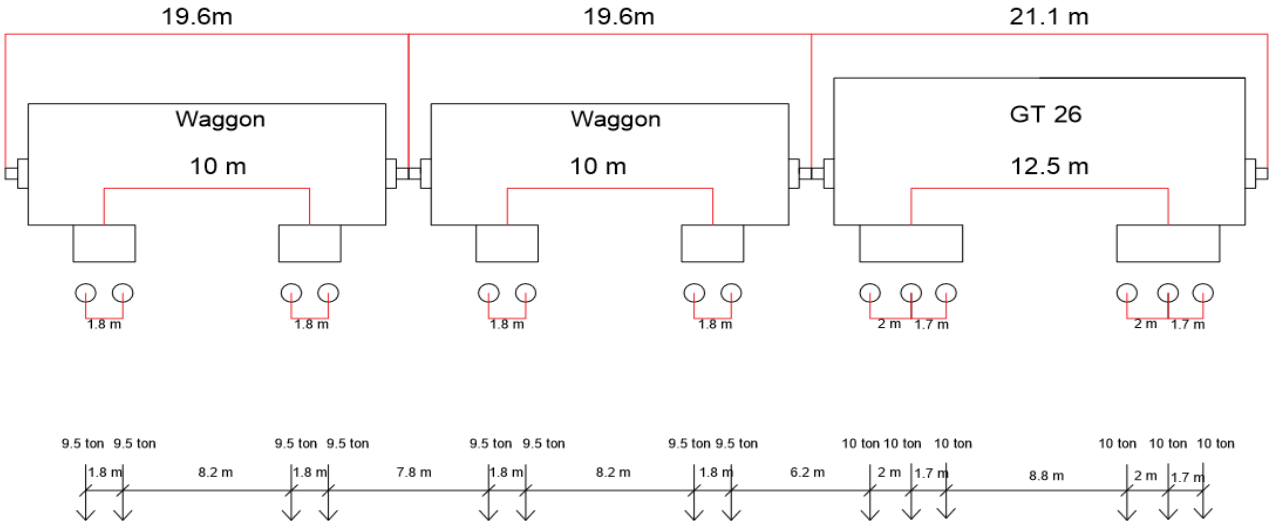
اجزاء مدل	جرم مخصوص (Kg/m^3)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)
ریل	۷۸۵۰	۰/۳	۲۰۶۹۰۰
تراورس	۲۵۰۰	۰/۱۵	۲۹۰۰۰
بالاست	۱۹۰۰	۰/۳	۳۰۰
خاکریز	۱۸۰۰	۰/۴	۵۰
ستون‌ها	۱۶۶۲	۰/۲	۵۷۴
خاک بستر	۱۷۰۰	۰/۲۵	۱۵

۳- بارگذاری

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 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. به منظور بارگذاری مدل از بار متحرک (Moving Load) استفاده شده است. همچنین این بارها دارای سرعت‌های ۱۵، ۸۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت جهت تحلیل حساسیّت هستند.

۴- صحت سنجی

به منظور صحت سنجی نتایج تحلیل با نرم‌افزار، مدلسازی تحقیق صورت گرفته توسط Shahraki و witt در دستور کار قرار گرفت[۶]. ایشان در این پژوهش با فرض رفتار خطی و با مدلسازی عددی بخشی از یک مسیر راه‌آهن سریع السیر دوخطه که از خاک چند لایه تشکیل شده به بررسی تاثیر حضور ستون‌های سنگی در کاهش تغییرمکان قائم و افقی سطح بستر در اثر عبور قطارهای سریع‌السیر پرداختند. همانطور که در نمودار۱ قابل مشاهده است انطباق مناسبی بین نتایج مدل عددی و نتایج پژوهش Shahraki و Witt وجود دارد.



شکل ۲- مقادیر بارهای نقطه‌ای و فاصله‌ی آن‌ها از یکدیگر

۵- متغیّرهای پژوهش

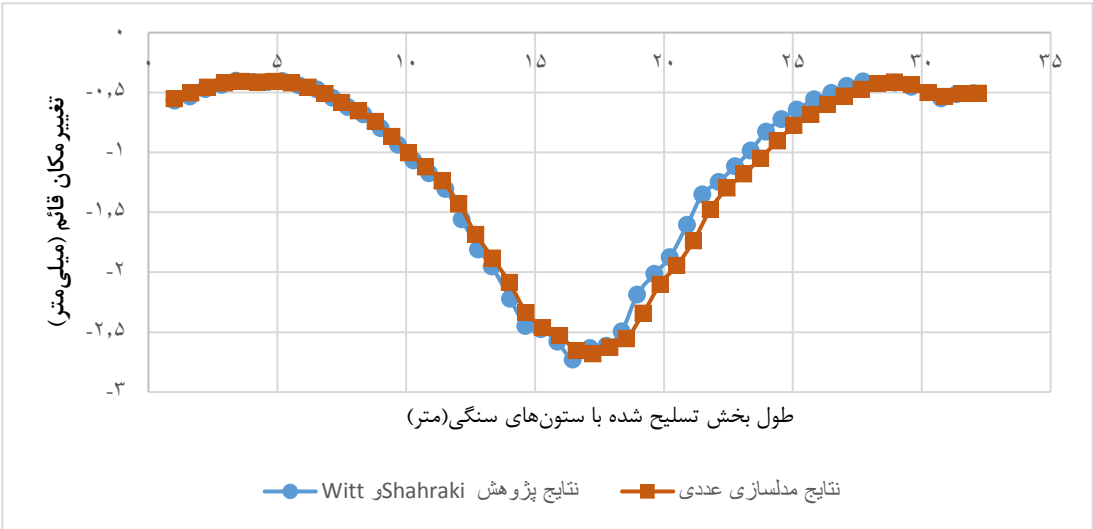
متغیرهای این پژوهش شامل: سرعت حرکت قطار (۱۵، ۸۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت)، قطر ستون‌ها (۷۵ و ۱۵۰ سانتی‌متر)، فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها (۳۰۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر) و چیدمان ستون‌ها (مثلثی و مربعی) است. بنابراین مجموع کل تحلیل‌های صورت گرفته توسط نرم افزار جهت تحلیل حساسیّت، ۳۲ تحلیل است.

۶- بررسی نتایج

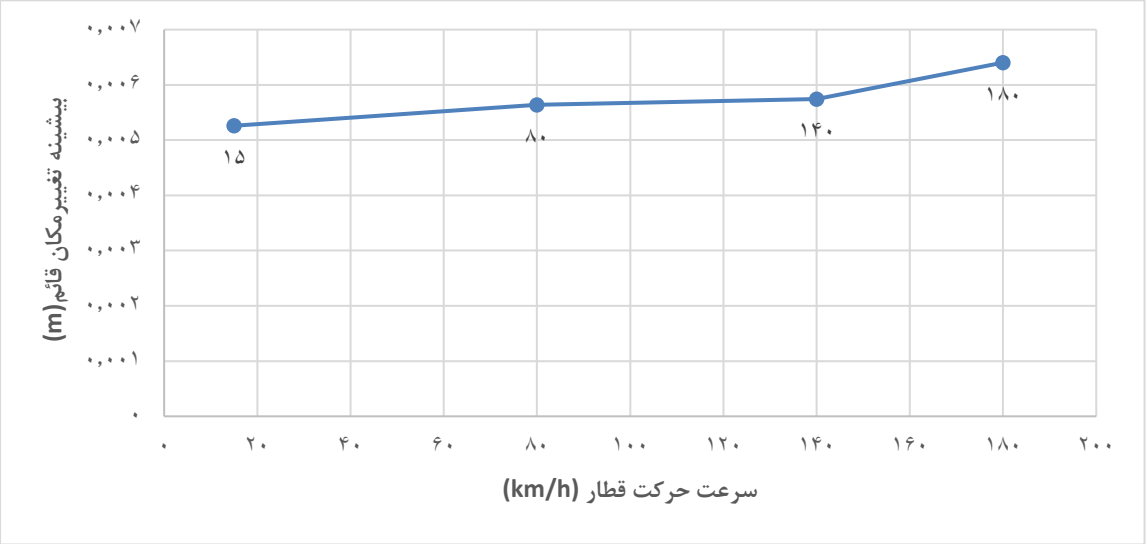
۶-۱- بررسی تاثیر سرعت حرکت قطار بر پارامترهای ارتعاشی

همانطور که در نمودار۲ ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت از ۱۵ تا ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت میزان تغییرمکان قائم نیز افزایش می‌یابد. این افزایش برای سرعت‌های ۸۰، ۱۴۰و ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت نسبت به سرعت ۱۵ کیلومتر بر ساعت به ترتیب ۷/۲، ۹/۲ و ۲۱/۷ درصد هستند.

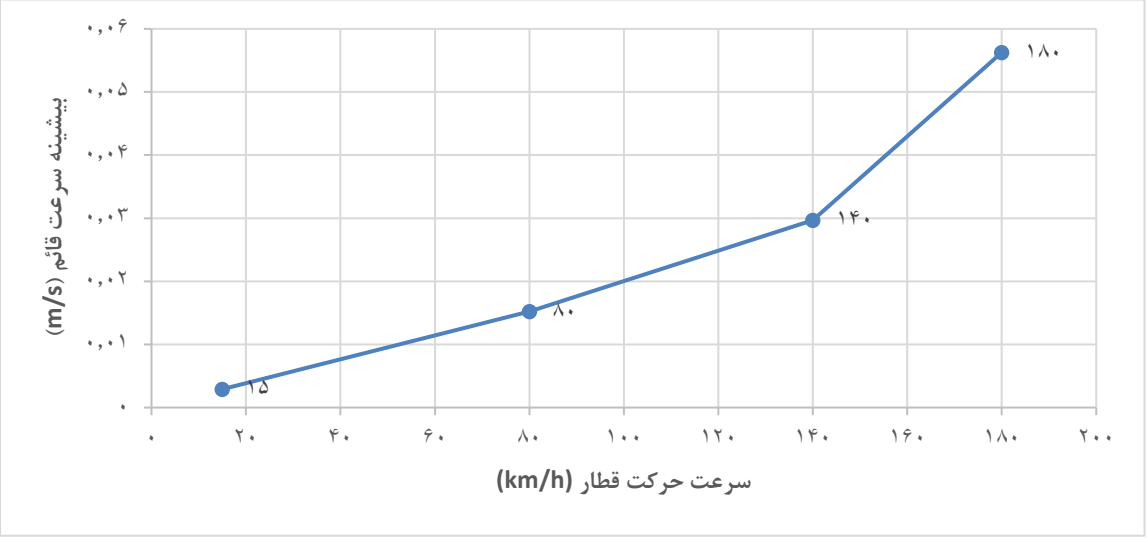
مطابق نمودار ۳ افزایش سرعت قائم ارتعاشی بسیار مشهودتر از افزایش تغییرمکان قائم است به طوری که بیشینه سرعت قائم ارتعاشی نقطه مرکزی خاک بستر برای سرعت‌های ۸۰ ، ۱۴۰و ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت نسبت به سرعت ۱۵ کیلومتر بر ساعت به ترتیب ۵/۲، ۱۰/۲ و ۱۹/۳ برابر شده است.



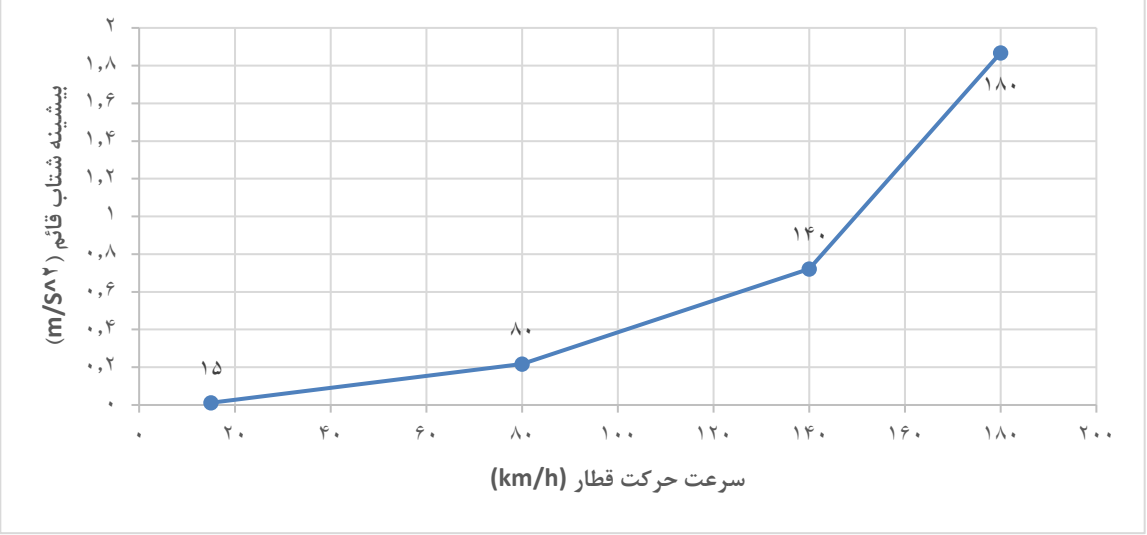
نمودار ۱- مقایسه نتایج تحلیل با نتایج پژوهش Shahraki و Witt



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



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



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

مطابق نمودار ۴ نیز با افزایش سرعت حرکت قطار بیشینه شتاب قائم ارتعاشی مرکز خاک بستر برای سرعت‌های ۸۰، ۱۴۰و ۱۸۰ نسبت به سرعت ۱۵ کیلومتر بر ساعت به ترتیب ۱۸/۵، ۶۱/۳ و ۱۵۸/۶ برابر شده است.

۶-۲- بررسی تاثیر افزایش قطر ستون‌ها بر پارامترهای ارتعاشی

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 تغییرمکان قائم مرکز خاک بستر کاهش یافته است. در حالت‌های مختلف ستون‌های اختلاط عمیق به قطر ۷۵ و ۱۵۰ سانتی‌متر میزان تغییرمکان قائم مرکز خاک بستر را به ترتیب ۱۶/۱ تا ۲۳/۶ درصد و ۲۳/۹ تا ۳۲/۴ درصد کاهش داده‌اند.

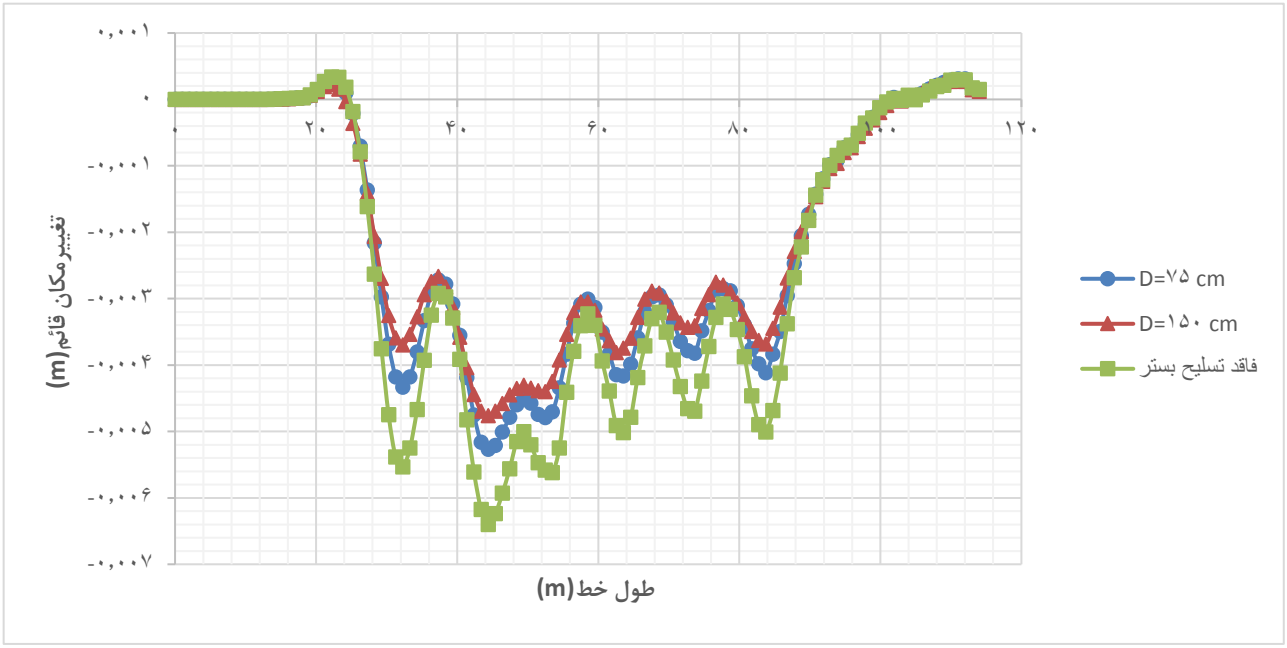
همانطور که در نمودار ۶ قابل مشاهده است با افزایش قطر ستون‌ها از ۷۵ به ۱۵۰ سانتی‌متر دامنه تغییرات سرعت قائم ارتعاشی کاهش یافته است. در حالت‌های مختلف ستون‌های اختلاط عمیق ۲۱/۸ تا ۳۷/۶ درصد و ۳۲/۱ تا ۵۳/۹ درصد کاهش در دامنه تغییرات سرعت قائم ارتعاشی مرکز خاک بستر به ترتیب برای قطرهای ۷۵ و ۱۵۰ سانتی‌متر نشان می‌دهند. در مورد بیشینه سرعت قائم ارتعاشی نیز ستون‌هایی به قطر ۷۵ و ۱۵۰ سانتی‌متر در حالت‌های مختلف به ترتیب ۲۳/۸ تا ۳۸/۸ درصد و ۲۹/۳ تا ۵۴ درصد کاهش نشان می‌دهند.

مطابق نمودار ۷ نیز ستون‌های اختلاط عمیق با قطرهای ۷۵ و ۱۵۰ سانتی‌متر در حالت‌های مختلف دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی مرکز خاک بستر را به ترتیب ۹/۲ تا ۴۶/۹ درصد و ۱۰/۸ تا ۵۵/۲ درصد کاهش داده‌اند. در مورد بیشینه شتاب قائم ارتعاشی در حالت‌های مختلف ستون‌های اختلاط عمیق ۱/۹ تا ۴۷/۷ درصد و ۶/۳ تا ۵۹/۴ درصد به ترتیب برای قطرهای ۷۵ و ۱۵۰ سانتی‌متر کاهش ایجاد کرده‌اند.

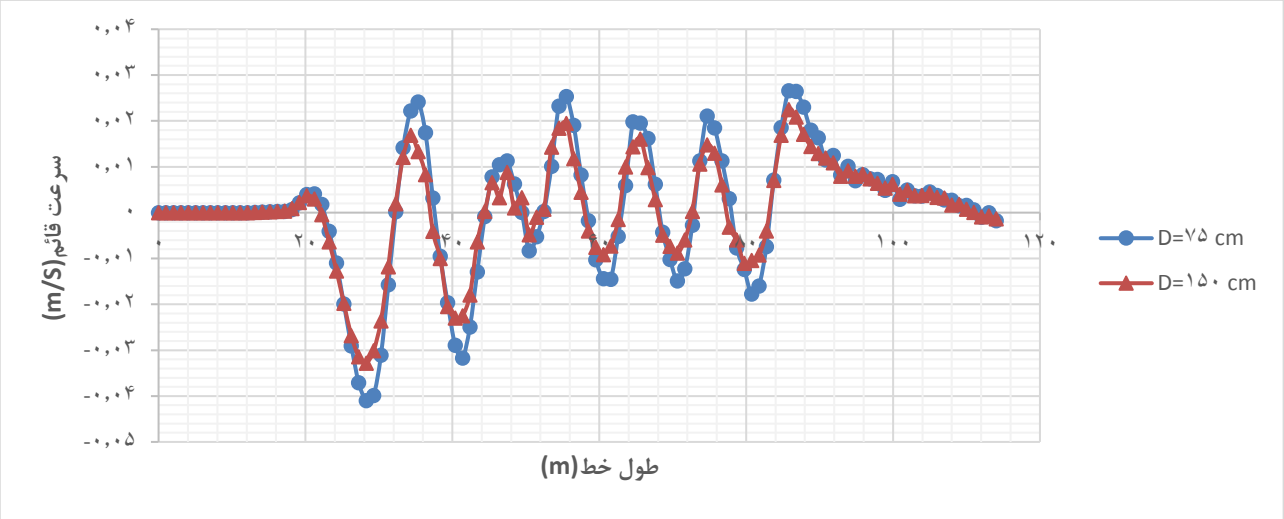
۶-۳- بررسی تاثیر فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها بر پارامترهای ارتعاشی

به نظر می‌رسد کاهش فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها موجب کاهش مقادیر پارامترهای ارتعاشی گردد که در ادامه این موضوع مورد بررسی قرار می‌گیرد.

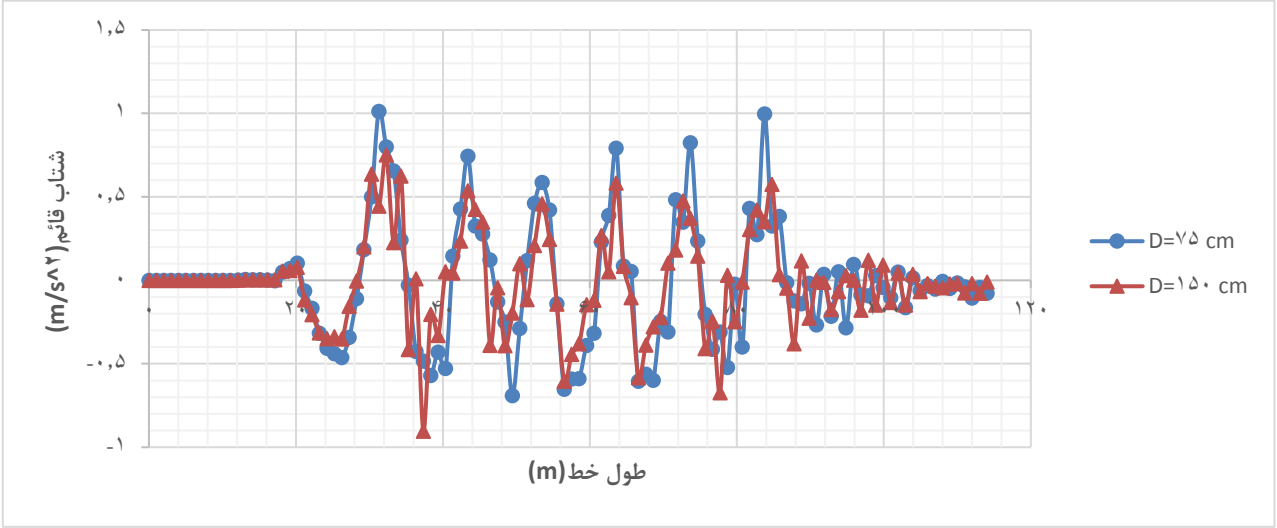
همانطور که در نمودار ۸ قابل مشاهده است کاهش فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها از ۳۰۰ به ۲۰۰ سانتی‌متر تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش تغییرمکان مرکزخاک بستر نداشته است. در حالت‌های مختلف کاهش فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها از ۳۰۰ به ۲۰۰ سانتی‌متر مقدار بیشینه تغییرمکان قائم مرکز خاک بستر را ۳/۸ تا ۷/۹ درصد کاهش داده است که مقدار متوسط آن ۵/۵ درصد است. این در شرایطی است که افزایش قطر ستون‌ها از ۷۵ به ۱۵۰ سانتی‌متر بیشینه تغییرمکان قائم مرکز ستون میانی را ۶/۹ تا ۹/۵ کاهش می‌دهد که مقدار متوسط آن ۷/۹ 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.



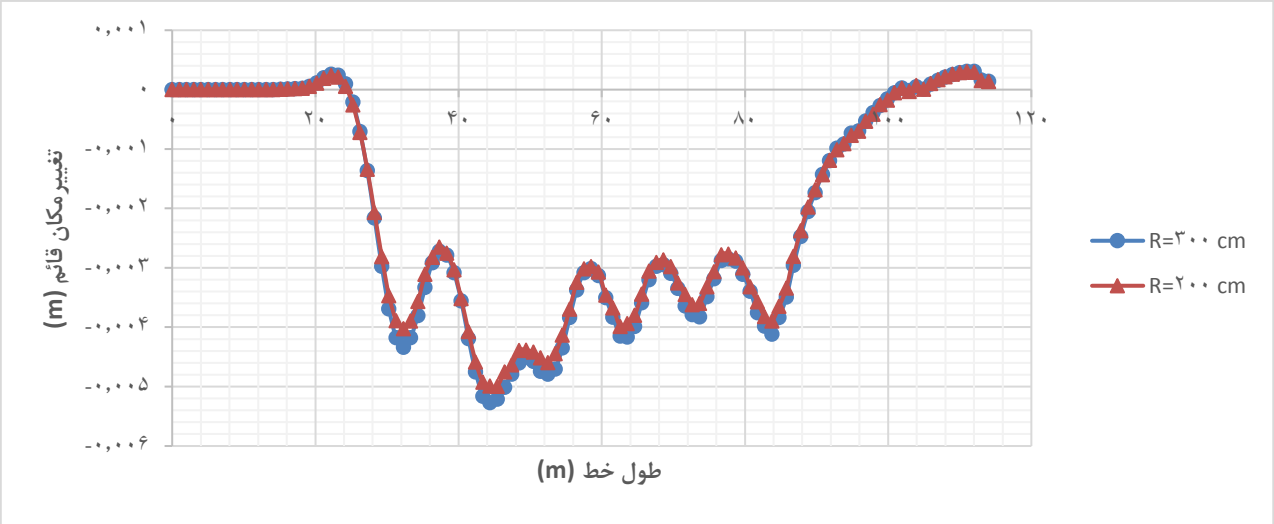
نمودار ۵- تغییرمکان قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی (چیدمان مثلثی، V=۱۸۰Km/h , R=۳۰۰cm)



نمودار ۶- سرعت قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی (چیدمان مثلثی، V=۱۸۰Km/h , R=۳۰۰cm)



نمودار ۷- شتاب قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی (چیدمان مثلثی، V=۱۸۰Km/h , R=۳۰۰cm)

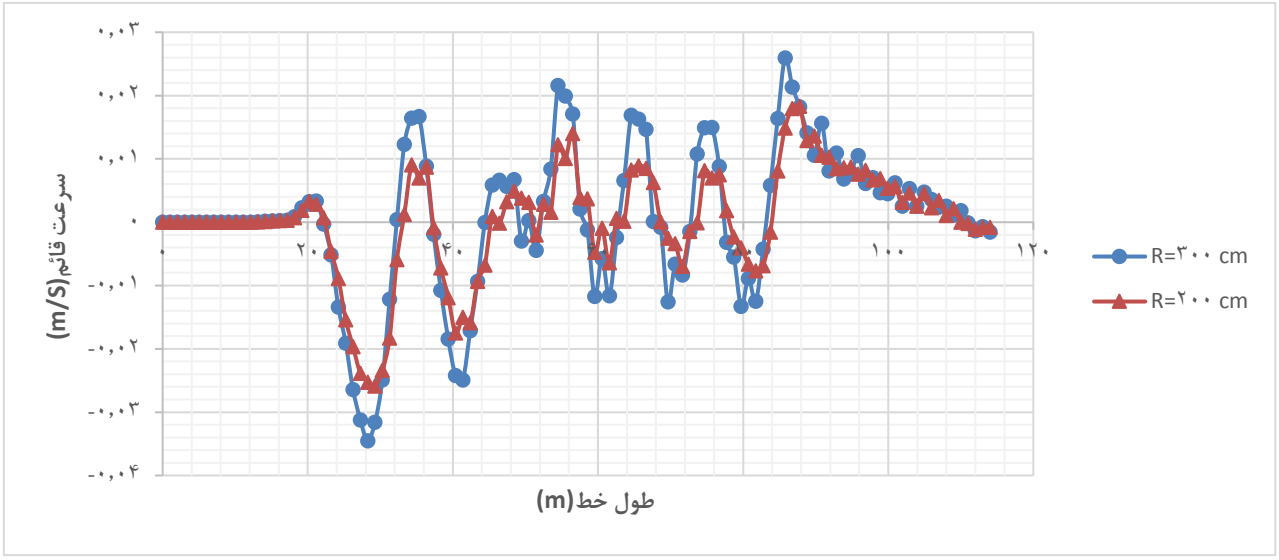


نمودار ۸- تغییرمکان قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی (چیدمان مثلثی، V=۱۸۰Km/h , D=۷۵cm)

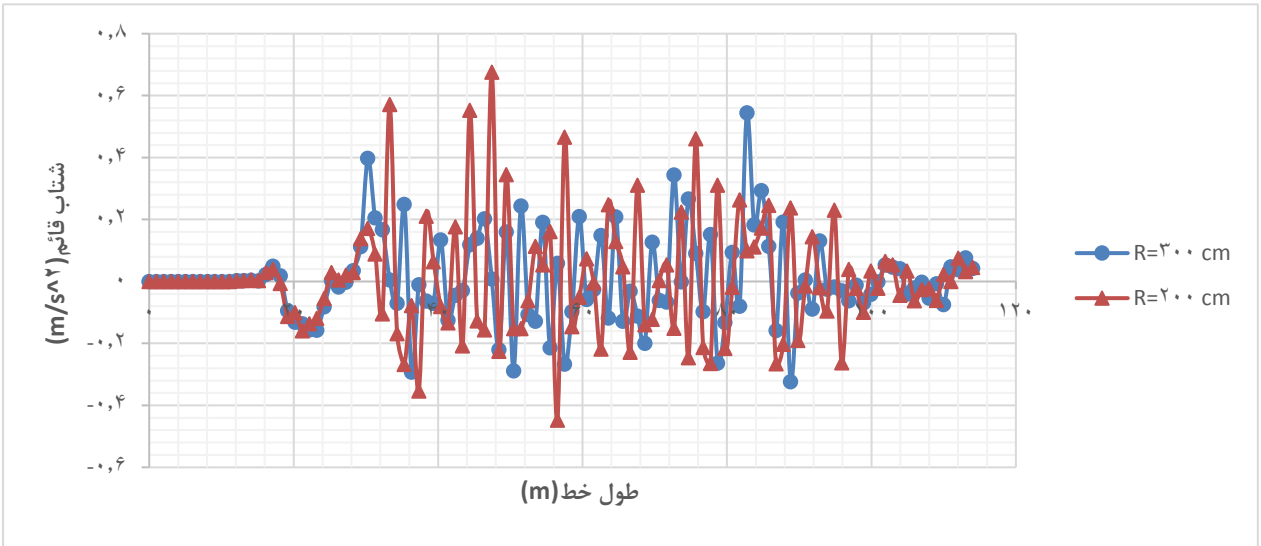
در حالت‌های مختلف دامنه تغییرات سرعت قائم ارتعاشی مرکز خاک بستر در فاصله مرکز به مرکز ۲۰۰ سانتی‌متر، ۰ تا ۱۷ درصد کمتر از زمانی است که فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها ۳۰۰ سانتی‌متر است که میانگین آن ۸ درصد است (نمودار۹). این در شرایطی است که افزایش قطر ستون‌ها از ۷۵ به ۱۵۰ سانتی‌متر دامنه تغییرات سرعت قائم ارتعاشی مرکز خاک بستر را ۶/۵ تا ۲۴/۱ درصد و به طور متوسط ۱۲/۵ درصد بیشتر کاسته است. که در این جا نیز 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 خاک بستر را ۳۷/۱ 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 ۱۸/۶ درصد کاهش یافته است. این در شرایطی است که افزایش قطر ستون‌ها از ۷۵ به ۱۵۰ سانتی‌متر دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی را در حالت‌های مختلف ۱/۵ تا ۳۲/۱ درصد و به طور میانگین ۸/۸ درصد بیشتر کاهش داده است.



نمودار ۹- سرعت قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی (چیدمان مربعی، V=۱۸۰Km/h , D=۱۵۰cm)



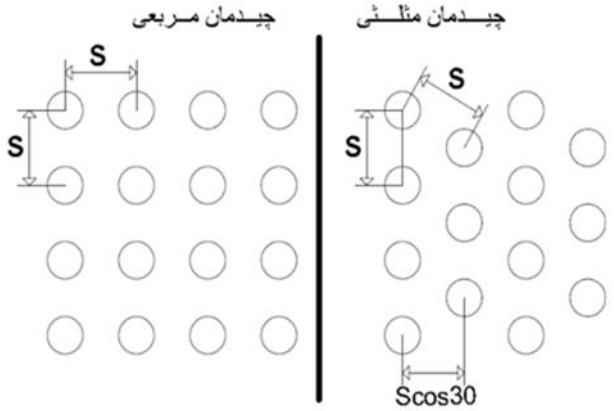
نمودار ۱۰- شتاب قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی (چیدمان مثلثی، V=۱۴۰Km/h , D=۱۵۰cm)

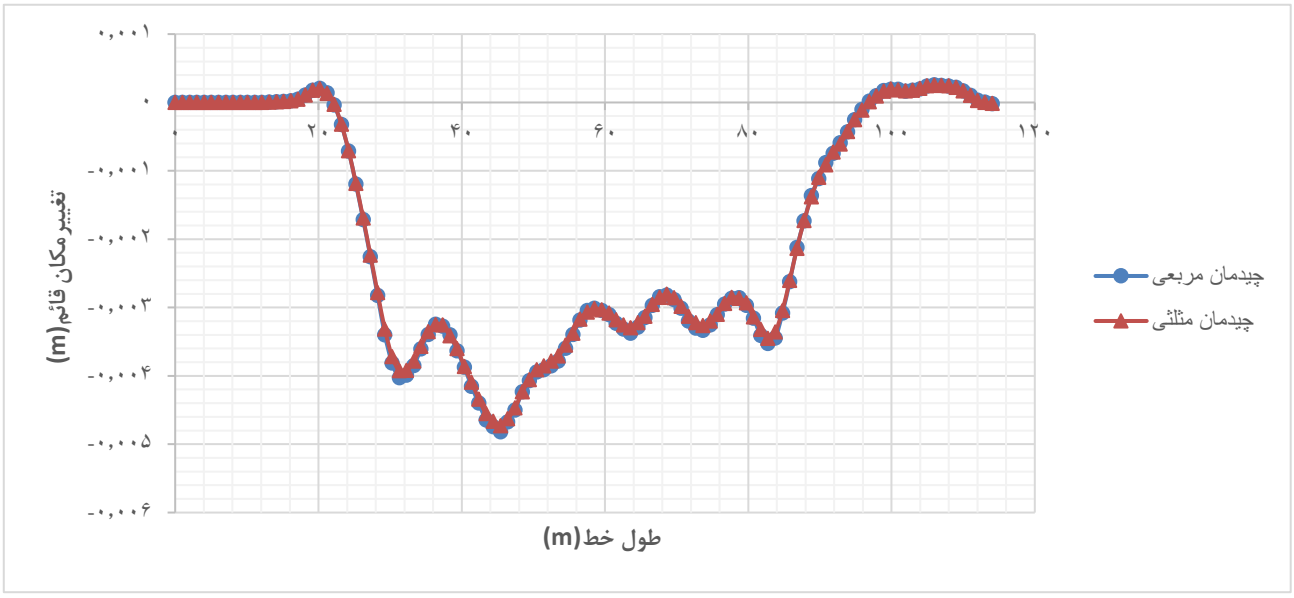
۶-۴- بررسی تاثیر الگوی چیدمان ستون‌ها بر پارامترهای ارتعاشی

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 مجاورهم در آن حالت برابر Scos 30° 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.

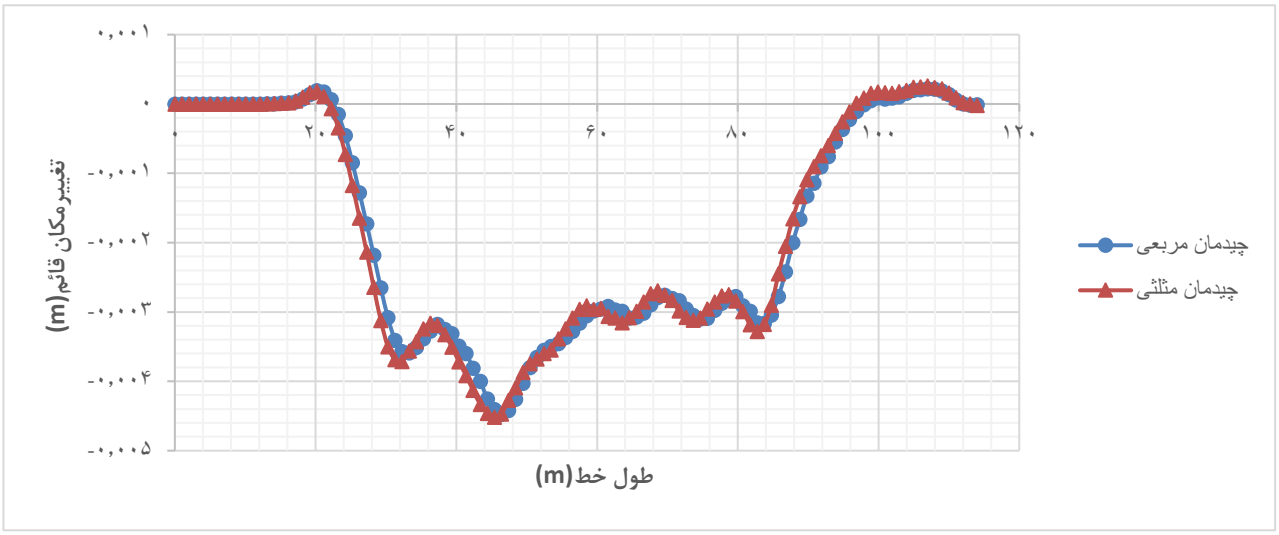
همانطور که در نمودار ۱۱ مشاهده می‌شود الگوی چیدمان مربعی و مثلثی تفاوت زیادی در کاهش تغییرمکان قائم ارتعاشی مرکز خاک بستر با یکدیگر ندارند. مطابق این نمودار الگوی چیدمان مربعی سبب ۱۶/۱ درصد کاهش و الگوی چیدمان مثلثی سبب ۱۷/۶ درصد کاهش در بیشینه تغییرمکان قائم ارتعاشی مرکز خاک بستر شده‌اند. در نمودار ۱۲ نیز الگوهای چیدمان مربعی و مثلثی به ترتیب ۲۲/۱ و ۲۱/۴ درصد بیشینه تغییرمکان قائم ارتعاشی مرکز خاک بستر را کاهش داده‌اند که برخلاف حالت قبلی الگوی چیدمان مربعی عملکرد مناسب‌تری دارد. تفاوت بین این نمودار و نمودار قبلی تنها در فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌هاست. به طور کلی زمانی که فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها ۳۰۰ سانتی‌متر است الگوی چیدمان مثلثی به اندازه ۰/۷ تا ۱/۵ درصد در حالت‌های مختلف عملکرد بهتری در کاهش بیشینه تغییرمکان قائم مرکز خاک بستر نسبت به الگوی چیدمان مربعی دارد و زمانی که فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها ۲۰۰ سانتی‌متر است الگوی چیدمان مربعی به اندازه ۰/۶ تا ۲/۶ درصد در حالت‌های مختلف عملکرد بهتری در کاهش بیشینه تغییرمکان قائم مرکز خاک بستر نسبت به الگوی چیدمان مثلثی دارد.

شکل ۳- مقایسه‌ی الگوی چیدمان مربعی و مثلثی

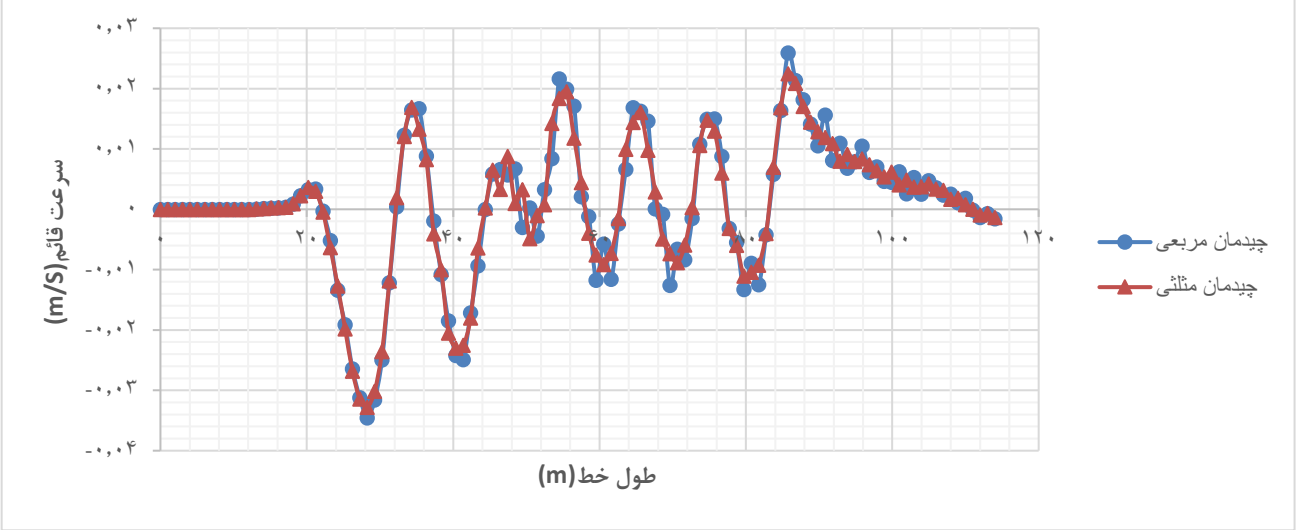




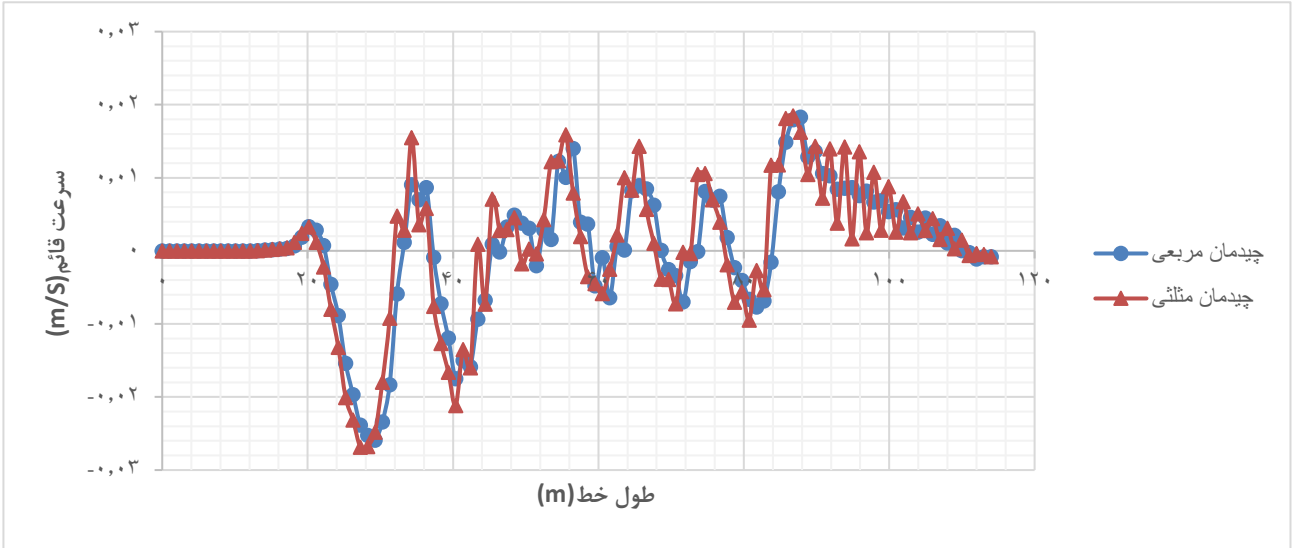
نمودار ۱۱- تغییرمکان قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی (V=۱۴۰Km/h , D=۷۵cm , R=۳۰۰cm)



نمودار ۱۲- تغییرمکان قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی (V=۱۴۰Km/h , D=۷۵cm , R=۲۰۰cm)



نمودار ۱۳- سرعت قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی (V=۱۸۰Km/h , D=۱۵۰cm R=۳۰۰cm)

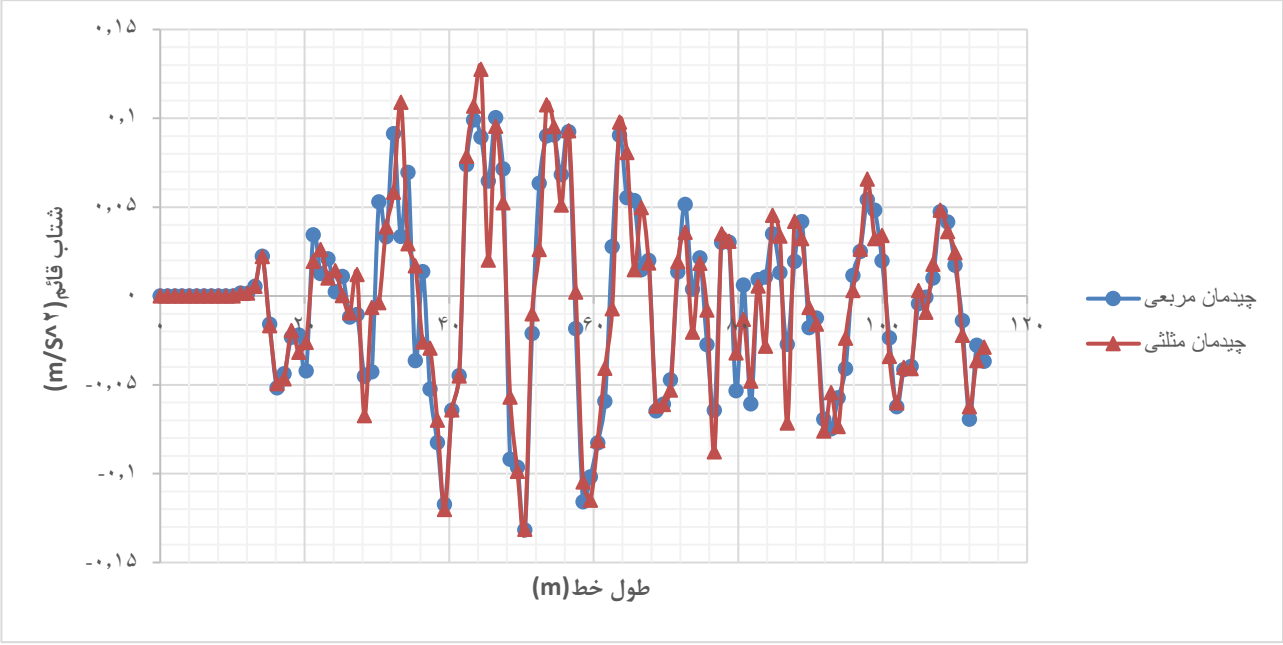


نمودار ۱۴- سرعت قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی (V=۱۸۰Km/h , D=۱۵۰cm , R=۲۰۰cm)

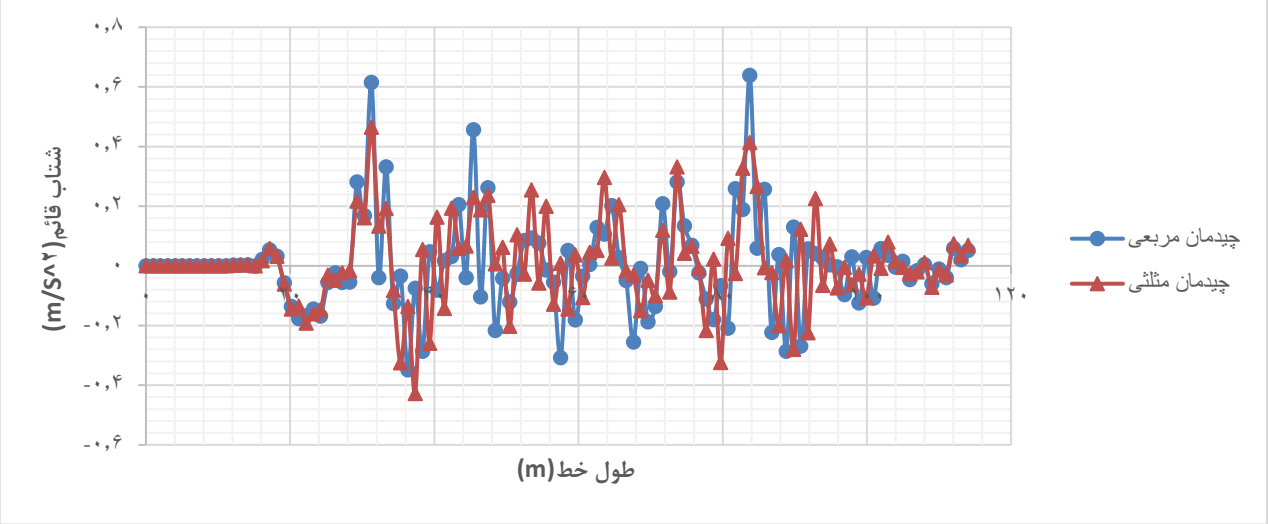
در نمودار ۱۳ که فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها ۳۰۰ سانتی‌متر است الگوهای چیدمان مثلثی و مربعی دامنه‌ی تغییرات سرعت قائم ارتعاشی مرکز خاک بستر را به ترتیب ۴۲/۳ و ۳۶/۹ درصد کاهش داده‌اند. و در نمودار ۱۴ که فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها ۲۰۰ سانتی‌متر است الگوهای چیدمان مثلثی و مربعی دامنه‌ی تغییرات سرعت قائم ارتعاشی مرکز خاک بستر را به ترتیب ۵۲/۷ و ۵۳/۹ درصد کاهش داده‌اند. در حالت کلی در مورد دامنه تغییرات سرعت قائم ارتعاشی مرکز خاک بستر زمانی که فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها ۳۰۰ سانتی‌متر است الگوی چیدمان مثلثی در حالت‌های مختلف به اندازه‌ی ۰/۶ تا ۵/۴ 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 ۹ درصد نسبت به الگوی چیدمان مثلثی موفق‌تر عمل کرده است.

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 خاک بستر را به ترتیب ۳۸/۱ و ۴۴/۵ 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 خاک بستر را به ترتیب ۳۵/۴ و ۲۸/۵ درصد کاهش داده‌اند که نشان دهنده عملکرد بهتر الگوی مثلثی است. در نمودارهای ۱۷و ۱۸ فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها ۲۰۰ سانتی‌متر است. در نمودار ۱۷ الگوهای

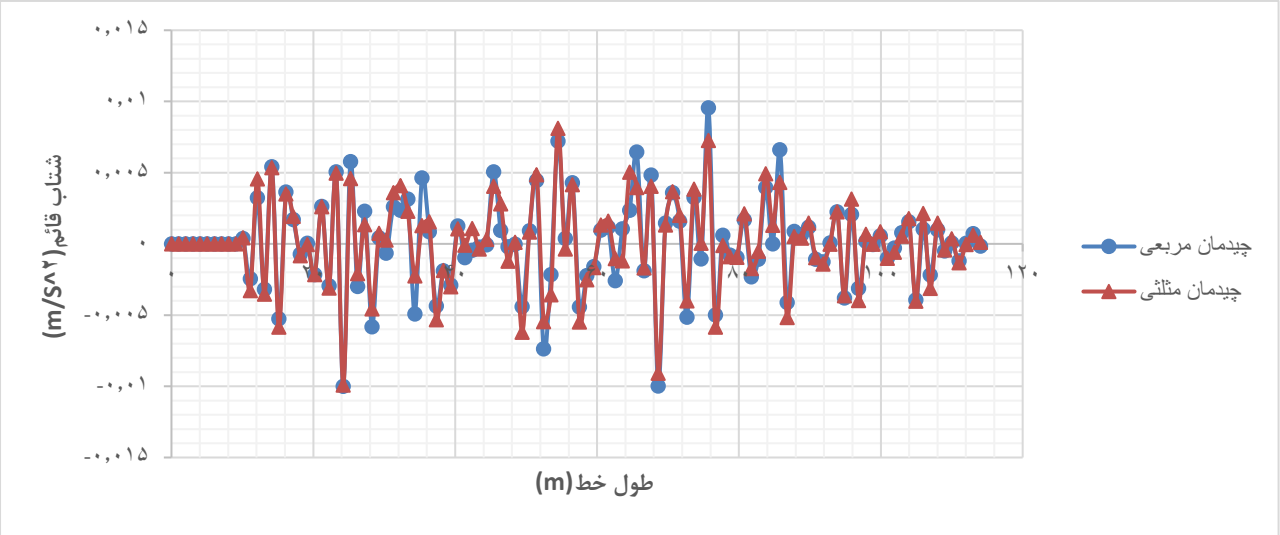
مثلثی و مربعی دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی مرکز خاک بستر را به ترتیب ۲۱/۸ درصد کاهش و ۱۵/۳ درصد افزایش داده‌اند که نشان دهنده عملکرد بهتر الگوی چیدمان مثلثی است اما در نمودار ۱۸ الگوهای چیدمان مثلثی و مربعی دامنه تغییرات شتاب قائم ارتعاشی مرکز خاک بستر را به ترتیب ۲۶/۲ و ۳۶/۴ درصد کاهش داده‌اند که 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 قطعیّت در مورد عملکرد بهتر هرکدام نسبت به دیگری در وضعیّت‌های مختلف اظهار نظر کرد.



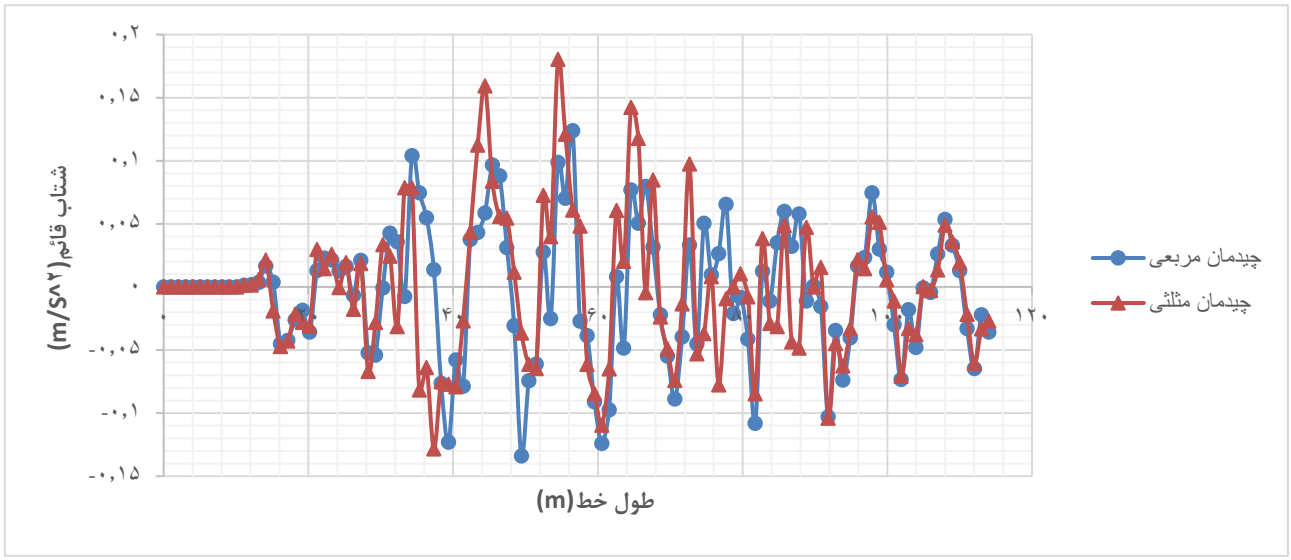
نمودار ۱۵- شتاب قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی (V=۸۰Km/h , D=۷۵cm , R=۳۰۰cm)



نمودار ۱۶- شتاب قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی (V=۱۴۰ km/h , D=۷۵ cm , R=۳۰۰cm)



نمودار ۱۷- شتاب قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی (V=۱۵ Km/h , D=۷۵cm , R=۲۰۰cm)



نمودار ۱۸- شتاب قائم ارتعاشی مرکز ستون میانی (V=۸۰ Km/h , D=۷۵cm , R=۲۰۰cm)

۷- بحث کلی و نتیجه‌گیری

در جدول ۲ درصد کاهش هر یک از پارامترهای ارتعاشی برای وضعیّت‌های 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 سانتی-متر و الگوی چیدمان مربعی است اتفاق افتاده است. این حالت با ۴۱/۲۳ درصد بیشترین مساحت جایگزینی را دارد. 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 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 ۱۱/۷۸ درصد است. و بیشینه تغییرمکان قائم، دامنه تغییرات سرعت قائم و دامنه تغییرات شتاب قائم را به ترتیب ۲۲/۹۲، ۳۵/۲۸ و ۲۹/۸۶ 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 ۲۹/۴۸ درصد کمتر است و در مقابل بیشینه تغییرمکان قائم، دامنه تغییرات سرعت قائم و دامنه تغییرات شتاب قائم به ترتیب ۸/۱۵، ۱۱/۴۵ و ۱۳/۸۶ 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 ۱۹/۴۴ درصد است. و بیشینه تغییرمکان قائم، دامنه تغییرات سرعت قائم و دامنه تغییرات شتاب قائم را به ترتیب ۲۵/۰۶، ۳۸/۹۸ و ۳۷/۴۰ درصد کاهش داده است. در مقایسه با حالتی که بهترین عملکرد را دارد نسبت مساحت جایگزینی آن ۲۱/۷۹ درصد کمتر است و در مقابل بیشینه تغییرمکان قائم، دامنه تغییرات سرعت قائم و دامنه تغییرات شتاب قائم را به ترتیب ۶/۰۱، ۷/۷۵ و ۶/۳۲ درصد کمتر 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 به این نتیجه رسید که استفاده از ستون‌های اختلاط عمیق در حالت دوم بهترین وضعیّت را دارد. همچنین در بخش‌های قبلی به این نتیجه رسیدیم زمانی که فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها ۳۰۰ سانتی‌متر است، چیدمان مثلثی عملکرد بهتری در کاهش پارامترهای ارتعاشی بخصوص در مورد تغییرمکان و دامنه تغییرات سرعت قائم ارتعاشی دارد. بنابراین در مجموع می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از ستون‌های اختلاط عمیق با قطر ۱۵۰ و فاصله مرکز به مرکز ۳۰۰ سانتی‌متر با چیدمان مثلثی بهترین وضعیت متغیرهای مستقل در این پژوهش را به همراه خواهد داشت.

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 تغییرمکان قائم	دامنه تغییرات سرعت قائم	دامنه تغییرات شتاب قائم
۷۵	۳۰۰	مثلثی	٪ ۴/۸۶	٪ ۱۷/۶۷	٪ ۲۷/۳۷	٪ ۳۴/۲۰
		مربعی	٪ ۵/۱۵	٪ ۱۶/۳۹	٪ ۲۴/۸۹	٪ ۳۱/۸۸
	۲۰۰	مثلثی	٪ ۱۱/۱۹	٪ ۲۱/۵۹	٪ ۲۹/۱۶	٪ ۲۰/۲۵
		مربعی	٪ ۱۱/۷۸	٪ ۲۲/۹۲	٪ ۳۵/۲۸	٪ ۲۹/۸۶
۱۵۰	۳۰۰	مثلثی	٪ ۱۹/۴۴	٪ ۲۵/۰۶	٪ ۳۸/۹۸	٪ ۳۷/۴۰
		مربعی	٪ ۲۰/۶۲	٪ ۲۴/۳۸	٪ ۳۵/۶۱	٪ ۳۹/۰۶
	۲۰۰	مثلثی	٪ ۳۹/۴۷	٪ ۲۹/۵۴	٪ ۴۵/۴۳	٪ ۲۵/۱۲
		مربعی	٪ ۴۱/۲۳	٪ ۳۱/۰۷	٪ ۴۶/۷۳	٪ ۴۳/۷۲

۸- جمع‌بندی نتایج

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 تغییرمکان 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 می‌گردد.

هرچقدر درصد مساحت بهسازی بیشتر باشد هزینه اجرای آن نیز بالاتر خواهد بود. بنابراین به منظور اقتصادی شدن بهسازی بایستی متغیرهای قطر و فاصله‌ی 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 فاصله‌ی مرکز به مرکز آن‌هاست، بخصوص در مورد کاهش سرعت و شتاب قائم ارتعاشی.

زمانی که فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها ۳۰۰ سانتی‌متر است الگوی چیدمان مثلثی عملکرد بهتری در کاهش تغییرمکان 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 تغییرمکان قائم و سرعت قائم ارتعاشی دارد. اما در مورد شتاب قائم ارتعاشی نمی‌توان با قطعیّت در مورد عملکرد هر یک از الگوهای چیدمان ستون‌ها تصمیم گیری کرد.

با توجه به بندهای فوق می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از ستون‌های اختلاط عمیق با قطر ۱۵۰ و فاصله مرکز به مرکز ۳۰۰ سانتی‌متر با الگوی چیدمان مثلثی مناسب‌ترین وضعیّت را برای متغیرهای فوق فراهم می‌آورد.

۹- مراجع

[۱] چراغی، سید اشکان؛ **"تاثیر استفاده از ستون آهکی- سیمانی بر کاهش نشست در لایه‌های رسی"**، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی عمران، بابل، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت ماه ۱۳۹۳.

[۲] ملک‌پور، محمدرضا؛ پورابراهیم، غلامرضا؛ **"مدلسازی آزمایشگاهی و عددی اصلاح خاک‌های ریزدانه نرم با استفاده از ستون‌های شفته‌آهکی متراکم"**، مجله‌ی علمی- پژوهشی «عمران مدرس»، دوره‌ی چهاردهم، شماره ۲، ۱۲۹-۱۴۱، ۱۳۹۳

[۳] Esmaeili, M.; Khajehei, H.; "*Mechanical behavior of embankments overlying on loose subgrade stabilized by deep mixed columns*", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, http://www.rockgeotech.org/qikan/public/tjdjl_en.asp?id=2920&wenjianming=20160507&houzhui=.pdf, pp. 651-659, 2016.

[۴] Peplow, A.T.; Kaynia, A.M.; "*Prediction and validation of traffic vibration reduction due to cement column stabilization*", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726107000164, pp.793-802, 2007.

[۵] Jamsawang, P.; Yoobanpot, N.; Thanasisathit, N.; Voottipruex, P.; Jongpradist, P.; "*Three-dimensional numerical analysis of a DCM column-supported highway embankment*", Computers and Geotechnics, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266352X15002360/pdfft?md5=bb65bbad1de53f5426279e8bf03caf1e&pid=1-s2.0-S0266352X15002360-main.pdf, pp. 42-56, 2015.

[۶] Shahraki, M.; Josefwitt, K.; "Improvement of soft subgrade soil using stone columns for high-speed railway tracks", International Conference on Soft Ground Engineering (ICSGE) 3-4 December 2015, Singapore, https://www.researchgate.net/profile/Mojtaba_Shahraki4/publication/286879063_Improvement_of_Soft_Subgrade_Soil_Using_Stone_Columns_for_High-Speed_Railway_Track/links/5672dbee08ae1557cf49361f/Improvement-of-Soft-Subgrade-Soil-Using-Stone-Columns-for-High-Speed-Railway-Track.pdf, pp. 155-156. 2015.