

## مطالعه عددی پاسخ بستر جاده در اثر اعمال ارتعاش دینامیکی

### پی ماشین آلات

#### مقاله پژوهشی

مسعود نصیری\*، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

احمدرضا مظاهری، استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد، ایران

علی امیری، دانشجوی کارشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمانشاه، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [nasiri\\_masoud@yahoo.com](mailto:nasiri_masoud@yahoo.com)

دریافت: ۹۹/۰۴/۲۸ - پذیرش: ۹۹/۱۱/۰۵

صفحه ۱۴۴-۱۲۹

#### چکیده

بررسی اثرات پی ماشین آلات و اثرات ارتعاشی و لرزه‌ای ایجاد شده در خاک زیرین آن، به ویژه در بستر جاده‌ها، یکی از مسائل اساسی و مهم در مباحث دینامیک خاک به شمار می‌رود. در این پژوهش به بررسی رفتار فونداسیونی واقع بر بستر جاده که تحت تأثیر ارتعاش با دامنه ۱۰ و ۲۰ کیلو نیوتن بر متر مربع و فرکانس ۱۰ و ۲۰ هرتز قرار گرفته پرداخته شده است. پاسخ بستر در نقاط مختلف در دو حالت خشک و اشباع و در دو حالت بدون میرایی و با میرایی رایلی، در فواصل مختلف از فونداسیون مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام تحلیل‌های عددی از نرم افزار اجزای محدود PLAXIS دو بعدی استفاده شده است. نتایج تحلیل‌های عددی نشان داده‌اند که با افزایش فرکانس و دامنه ارتعاش به میزان دو برابر، مقادیر بیشینه تغییر مکان، بیشینه سرعت و بیشینه شتاب در بستر جاده، دو برابر خواهند شد. اما در حالتی که فقط فرکانس اعمالی دو برابر شود و مقدار دامنه تغییری نکند، تغییرات جابجایی و سرعت در خاک خیلی چشمگیر نبوده، اما میزان تغییرات شتاب در خاک دو برابر می‌گردد. همین مطلب تأثیر فرکانس بر میزان شتاب را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ارتعاش دینامیکی، فرکانس، میرایی، تحلیل عددی

#### ۱- مقدمه

مکان‌های دینامیکی است (بازیار و قناد، ۱۳۸۲). اگر تغییر مکان پی ماشین بزرگ‌تر از حد مجاز باشد، سه اشکال عمده و اساسی در آن پدید می‌آید که عبارتند از: به مشکل بر خوردن کار با آن؛ آسیب دیدن دستگاه‌های متصل به آن و مختل شدن عملکرد سازه. معیار اصلی حاکم بر عملکرد مناسب ماشین آلات، دامنه مجاز حرکت آن‌ها است. انواع متداول ماشین‌آلات به چهار دسته تقسیم بندی می‌شوند که در ادامه هر کدام به اختصار شرح داده خواهند شد (بازیار و قناد، ۱۳۸۲). الف) ماشین آلات رفت و برگشتی: نیروی

مطالعات بر روی پی ماشین آلات در سال‌های ۱۹۳۰ توسط مهندسان آلمانی، علم دینامیک خاک را پایه گذاری کرده است. در سال‌های اولیه ظهور علم دینامیک خاک، طراحی پی ماشین آلات یکی از متداول‌ترین مسائل بوده است (بازیار و قناد، ۱۳۸۲). در مسائل پی ماشین آلات، دستگاهی که ارتعاش یا بار دینامیک نامتوازن ایجاد می‌کند، روی بلوک پی و در نهایت روی خاک قرار می‌گیرد. بارهای دینامیکی ناشی از کارکرد ماشین آلات موجب جابجایی دینامیکی بلوک پی می‌شوند. نکته مهم در مسئله‌ی طراحی پی ماشین آلات تغییر

دینامیکی حاصل از عملکرد ماشین دوره‌ای منظم (سینوسی) است و فرکانس نیرو با فرکانس چرخش موتور برابر است. مقدار نیروی دینامیکی متناسب با توان دوم فرکانس کاری ماشین است؛ بنابراین حرکت سریع‌تر ماشین سبب افزایش نیروی دینامیکی نامتوازن خواهد شد. به عنوان نمونه‌ای از این ماشین، می‌توان به کمپرسور هوای ساده اشاره کرد. ب) ماشین آلات چرخشی: در این نوع ماشین آلات، نیروهای دینامیکی به صورت تناوبی می‌باشد و با افزایش سرعت دستگاه، افزایش می‌یابد. توربین‌های به حرکت درآورنده ژنراتورهای الکتریکی از قبیل این دستگاه‌ها هستند. ج) ماشین آلات ضربه‌ای: در این دستگاه‌ها، بار به صورت ضربه اعمال می‌شود و شامل تعداد زیادی فرکانس است. دستگاه‌های پرس را می‌توان در زمره این ماشین آلات قرار داد. د) ماشین آلات حساس: پی‌های ماشین آلاتی همچون پی رادار و آنتن‌های ماهواره‌ای به دلیل حساسیت‌های بسیار زیاد آن‌ها به تغییر مکان، باید بسیار دقیق طراحی شوند.

نیروهای دینامیکی به صورت تکراری و در مدتی طولانی به مجموعه پی و خاک وارد می‌شوند. بنابراین لازم است که خاک رفتاری الاستیک از خود نشان دهد، در غیر این صورت تغییر مکان و نشست پس از هر سیکل بیشتر و بیشتر شده و ارتعاش می‌تواند موجب وارد آمدن آسیب شود. بارهای وارد بر پی ماشین آلات استاتیکی و دینامیکی هستند. بارهای استاتیکی در اصل تابعی از وزن ماشین و تجهیزات آن و بارهای دینامیکی ناشی از نیروهای نامتوازن، نیروهای اینرسی و در بعضی موتورها حرکت سیالات داخل دستگاه است (عبدالله‌پور، ۱۳۹۱).

گرتاس (۱۹۸۰، ۱۹۸۱) پی صلب را بر روی خاک با متغیر سرعت، تحت حرکت قائم، افقی و گهواره‌ای و پی دایره‌ای که در معرض بارهای پیچشی می‌باشد را مورد مطالعه قرار داده است. تحلیل دینامیکی پی ماشین آلات روی خاک الاستیک، نیازمند در نظر گرفتن اندرکنش دینامیکی و جنبشی است (اسیک، ۱۹۹۹). باید به این نکته توجه داشت که مدفون سازی فونداسیون سبب افزایش فرکانس تشدید و کاهش دامنه تشدید (بردگو و نواک، ۱۹۷۲) و افزایش میرایی شعاعی می‌شود (هوشمند، ۱۹۸۲). افزایش عمق مدفون فونداسیون توانایی این موضوع را دارد که به خوبی دامنه ارتعاش را کاهش دهد (پراکش و پوری، ۲۰۰۶). اولین بررسی‌های جامع در رابطه با اثرات ارتعاش ماشین آلان بر پاسخ فونداسیون‌ها به سال ۱۹۲۸ و ۱۹۳۶ بر می‌گردد (دگبو، ۱۹۴۳). رایزنر (داس و رامانا، ۲۰۱۱) به بررسی پاسخ دیسک استوانه‌ای در نیم فضای الاستیک پرداخته است. گرتاس (۱۹۸۳) ارتعاش عمودی روی شالوده‌های مربعی و دایره‌ای را بررسی کرد. پس از گذشت مدتی، همین محقق سایر بارگذاری‌ها (افقی و گشتاوری) را نیز در رابطه با مسئله پی ماشین آلات مورد مطالعه قرار داد. لیسمر و ریچارت (۱۹۹۶) رفتار دینامیکی شالوده‌های بزرگ را در اثر بارهای عمودی بررسی کرد، که کار او به کمک سیستم یک درجه آزادی (جرم-فنر-میراگر) قابل بیان است. یک سال پس از او ریچارت و ویتمن (۱۹۶۷) نظریه ارائه شده توسط لیسمر را بسط و گسترش دادند.

در رابطه با پی ماشین آلات در نیم فضا روابط تحلیلی متعددی ارائه شده است (گرتاس، ۱۹۹۱). مدل و بدیا (۲۰۰۴) در مطالعه آزمایشگاهی خود رفتار شالوده بتنی را روی بستر خاکی مطالعه کردند و نشان دادند که توری نیم فضای الاستیک در اثر اعمال بار هارمونیک قائم، دامنه جابجایی‌ها را دست پایین محاسبه خواهد کرد. چن و همکاران (۲۰۱۶) نوسانات اجباری سیستم‌های پی دایره‌ای صلب را بررسی کردند و دریافتند که برای تحلیل پاسخ فونداسیون در لنگرهای گهواره ای، باید پاسخ‌های تشدید اولیه و ثانویه را حتماً مورد توجه قرار داد. آی و همکاران (۲۰۱۶) راه‌حل‌های تحلیلی برای پاسخ ارتعاش قائم دیسک صلب در نیم فضای چند لایه ارتوتروپیک ارائه کرده‌اند. نتایج تحقیقات چای و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که وقتی فرکانس اعمالی نسبتاً کوچک باشد، خصوصیات دینامیکی سیستم خاک-فونداسیون اثر قابل توجهی روی پاسخ سازه مورد نظر نخواهد داشت. میزان خرابی ایجاد شده در پل‌های تک‌پایه در هنگام وقوع زلزله به عوامل بسیاری از جمله مکانیسم شکست، اثر جهت‌پذیری، نوع خاک و همچنین خصوصیات شمع و پایه‌ی پل مانند ارتفاع شمع، طراحی پایه‌ها و شمع بستگی دارد (طباطبایی عقدا و شاه محمدی مهرجردی، ۱۳۹۷). بر اثر زلزله نیروی عظیمی بر عرشه‌ی پل‌ها وارد خواهد شد که در صورت عدم استهلاک مناسب آن، منجر به وارد آمدن خسارت به سازه پل‌ها می‌شود (نادریپور و همکاران، ۱۳۹۷). بررسی اندرکنش خاک-تونل-شمع نیز توسط شعبان نژاد اشکلک و آزادی (شعبان نژاد اشکلک و آزادی، ۱۳۹۸) انجام شده است.

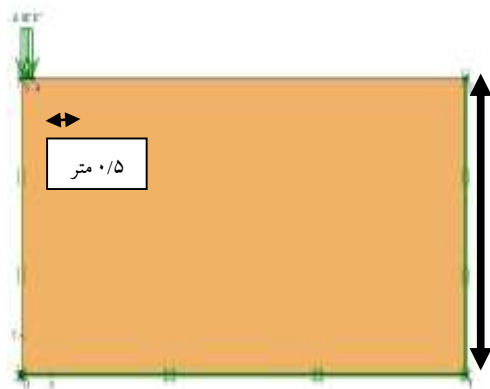
نیروهای دینامیکی به صورت تکراری و در مدتی طولانی به مجموعه پی و خاک وارد می‌شوند. بنابراین لازم است که خاک رفتاری الاستیک از خود نشان دهد، در غیر این صورت تغییر مکان و نشست پس از هر سیکل بیشتر و بیشتر شده و ارتعاش می‌تواند موجب وارد آمدن آسیب شود. بارهای وارد بر پی ماشین آلات استاتیکی و دینامیکی هستند. بارهای استاتیکی در اصل تابعی از وزن ماشین و تجهیزات آن و بارهای دینامیکی ناشی از نیروهای نامتوازن، نیروهای اینرسی و در بعضی موتورها حرکت سیالات داخل دستگاه است (عبدالله‌پور، ۱۳۹۱).

گرتاس (۱۹۸۰، ۱۹۸۱) پی صلب را بر روی خاک با متغیر سرعت، تحت حرکت قائم، افقی و گهواره‌ای و پی دایره‌ای که در معرض بارهای پیچشی می‌باشد را مورد مطالعه قرار داده است. تحلیل دینامیکی پی ماشین آلات روی خاک الاستیک، نیازمند در نظر گرفتن اندرکنش دینامیکی و جنبشی است (اسیک، ۱۹۹۹). باید به این نکته توجه داشت که مدفون سازی فونداسیون سبب افزایش فرکانس تشدید و کاهش دامنه تشدید (بردگو و نواک، ۱۹۷۲) و افزایش میرایی شعاعی می‌شود (هوشمند، ۱۹۸۲). افزایش عمق مدفون فونداسیون توانایی این موضوع را دارد که به خوبی دامنه ارتعاش را کاهش دهد (پراکش و پوری، ۲۰۰۶). اولین بررسی‌های جامع در رابطه با اثرات ارتعاش ماشین آلان بر پاسخ فونداسیون‌ها به سال ۱۹۲۸ و ۱۹۳۶ بر می‌گردد (دگبو، ۱۹۴۳).

گرتاس (۱۹۸۰، ۱۹۸۱) پی صلب را بر روی خاک با متغیر سرعت، تحت حرکت قائم، افقی و گهواره‌ای و پی دایره‌ای که در معرض بارهای پیچشی می‌باشد را مورد مطالعه قرار داده است. تحلیل دینامیکی پی ماشین آلات روی خاک الاستیک، نیازمند در نظر گرفتن اندرکنش دینامیکی و جنبشی است (اسیک، ۱۹۹۹). باید به این نکته توجه داشت که مدفون سازی فونداسیون سبب افزایش فرکانس تشدید و کاهش دامنه تشدید (بردگو و نواک، ۱۹۷۲) و افزایش میرایی شعاعی می‌شود (هوشمند، ۱۹۸۲). افزایش عمق مدفون فونداسیون توانایی این موضوع را دارد که به خوبی دامنه ارتعاش را کاهش دهد (پراکش و پوری، ۲۰۰۶). اولین بررسی‌های جامع در رابطه با اثرات ارتعاش ماشین آلان بر پاسخ فونداسیون‌ها به سال ۱۹۲۸ و ۱۹۳۶ بر می‌گردد (دگبو، ۱۹۴۳).

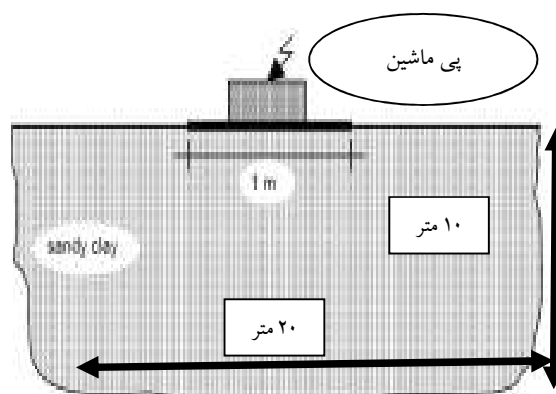
## ۲- مدل‌سازی در نرم افزار اجزای محدود دو

### بعدی



شکل ۲. هندسه مدل

برای مدل‌سازی تحلیل دینامیکی یک پی ماشین آلات بر روی بستر خاکی از نرم افزار اجزای محدود پلکسیس استفاده شده است. در مدل‌سازی‌های انجام شده، میرایی فیزیکی به دلیل خاصیت ویسکوز خاک، به کمک میرایی رایلی در نظر گرفته شده است. منبع ارتعاش یک شالوده بتنی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و طول ۱ متر است. شکل ۱ منبع ژنراتور را نشان می‌دهد.



شکل ۱. ژنراتور تولید کننده ارتعاش

برای مدل‌سازی شالوده از المان صفحه استفاده شده است. پس از ساخت هندسه مدل مطابق شکل ۲، علاوه بر مرزهای استاندارد، از مرز جاذب استفاده شده است (هدف از این کار جلوگیری از انعکاس و برگشت موج اعمال شده دینامیکی به خاک است). خاک مدل شده از نوع ماسه رس دار می‌باشد و مشخصات مصالح مطابق جدول ۱ می‌باشد. در این پژوهش خاک به صورت الاستیک در نظر گرفته شده است. وزن شالوده ۵ کیلونیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شده است که به صورت توزیع یکنواخت روی پی ماشین آلات اعمال شده است.

جدول ۱. مشخصات خاک و پی ماشین آلات

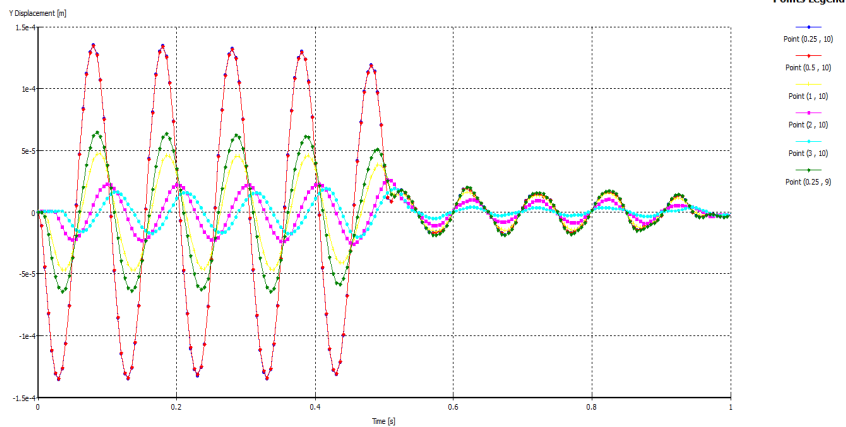
مقدار	مشخصات خاک
۲۰ کیلونیوتن بر متر مکعب	وزن مخصوص
۵۰۰۰۰ کیلونیوتن متر مربع بر متر مربع	مدول الاستیسیته
۰/۳	نسب پواسون
مقدار	مشخصات پی ماشین آلات (پلکسیس، ورژن ۸)
۷/۶ کیلونیوتن بر متر	سختی نرمال (EA)
۲۴۰۰۰ کیلونیوتن متر مربع بر متر مربع	صلبیت خمشی (EI)
۰	نسب پواسون
۵ کیلونیوتن بر متر بر متر	وزن

در این پژوهش، ارتعاش ژنراتور به صورت بارگذاری هارمونیک شبیه سازی شده است. که فرکانس آن ۱۰ و ۲۰ هرتز؛ و دامنه آن هم ۱۰ و ۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع بوده است. علاوه بر وزن پی، وزن استاتیکی ژنراتور هم ۸ کیلونیوتن بر متر در نظر گرفته شده است. این وزن به صورت توزیع یکنواخت اعمال شده است. مدل‌سازی به صورت متقارن انجام شده است و هندسه مدل در شکل ۲ نشان داده شده است. در این پژوهش از ۱۵۰ المان برای مش‌بندی مدل استفاده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، به منظور حذف اثر انعکاس و برگشت موج فاصله‌ی مرزها بسیار دورتر از شالوده قرار گرفته است. با توجه به این مسئله که سازه‌های مهندسی معمولاً دارای فرکانس اساسی ارتعاشی قائم در بازه ۵ تا ۲۰ هرتز می‌باشند (کوند و همکاران، ۲۰۱۶)، ملاک انتخاب بازه فرکانسی پژوهش پیش رو همین مسئله می‌باشد.

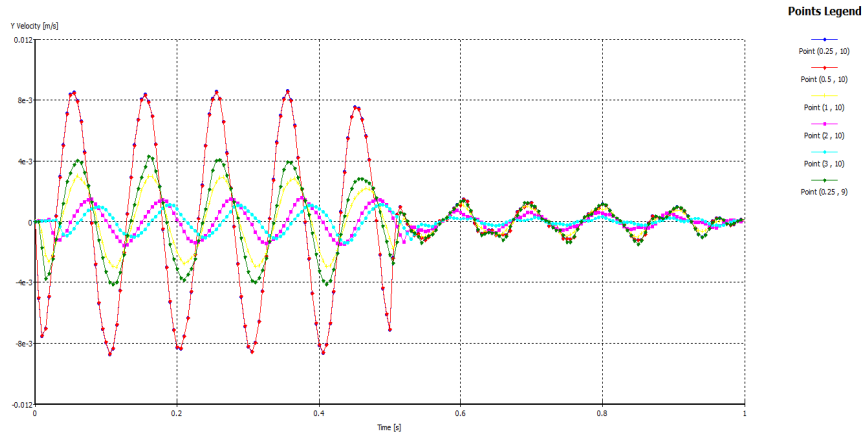
سیکل در نیم ثانیه است. نتایج این تحلیل در شکل های ۳ تا ۵ نشان داده شده است.

## ۱-۲- مدل سازی شالوده در حالت خشک بدون میرایی (مدل ۱)

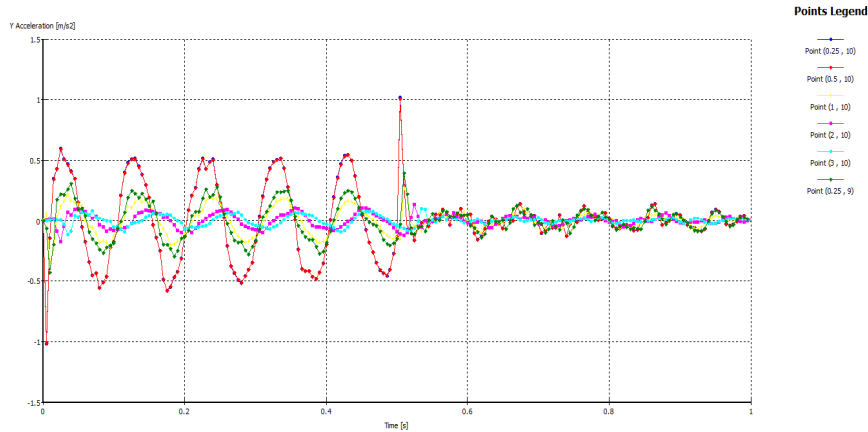
در این حالت، بار هارمونیک قائم وارده شده از طرف ژنراتور به زمین داری دامنه ۱۰ کیلونیوتن بر متر مربع و فرکانس ۱۰ هرتز می باشد، و بازه زمانی اعمال شده آن ۵



شکل ۳. جابجایی قائم نقاط مختلف خاک خشک در اثر ارتعاش بدون میرایی



شکل ۴. سرعت قائم نقاط مختلف خاک خشک در اثر ارتعاش بدون میرایی

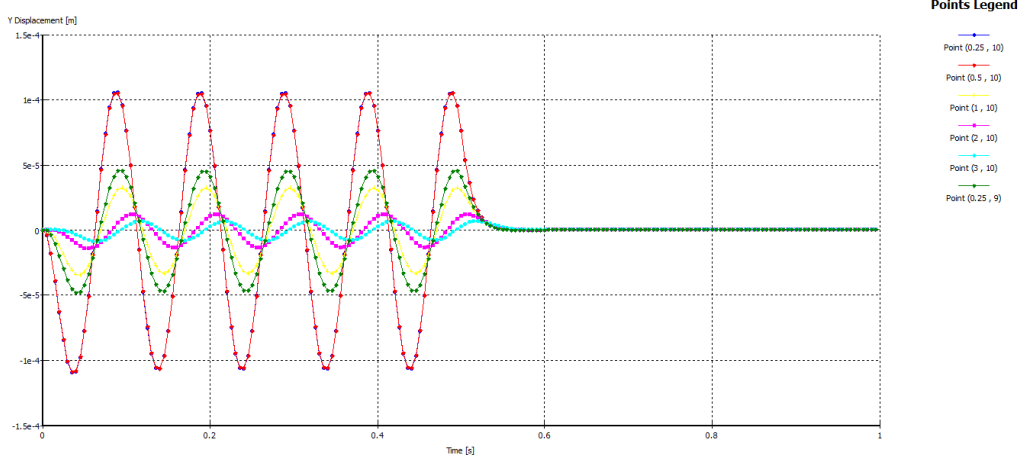


شکل ۵. شتاب قائم نقاط مختلف خاک خشک در اثر ارتعاش بدون میرایی

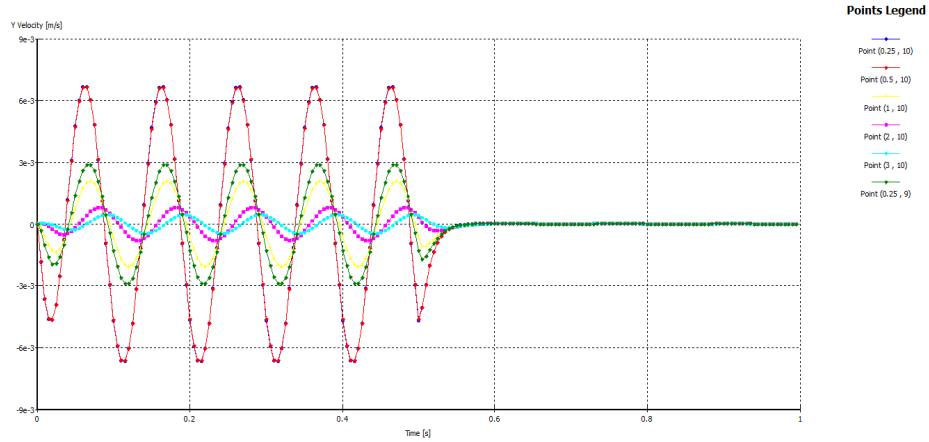
ترتیب ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱ استفاده شده است. شکل‌های ۶ تا ۸ نتایج تحلیل را نشان می‌دهند.

## ۲-۲- مدل‌سازی شالوده در حالت خشک با میرایی (مدل ۱)

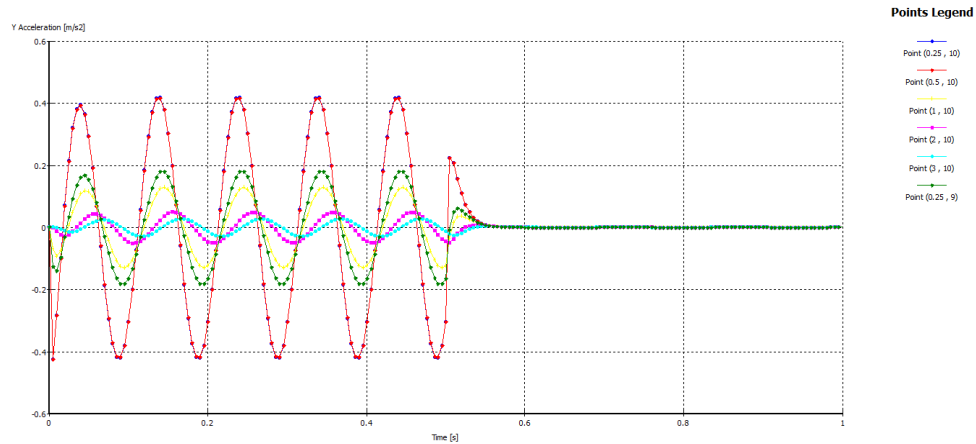
این حالت، دقیقاً مشابه مدل پیشین است با این تفاوت که در آن از میرایی رایلی با مشخصات آلفا و بتای رایلی به



شکل ۶. جابجایی قائم نقاط مختلف خاک خشک در اثر ارتعاش با میرایی



شکل ۷. سرعت قائم نقاط مختلف خاک خشک در اثر ارتعاش با میرایی



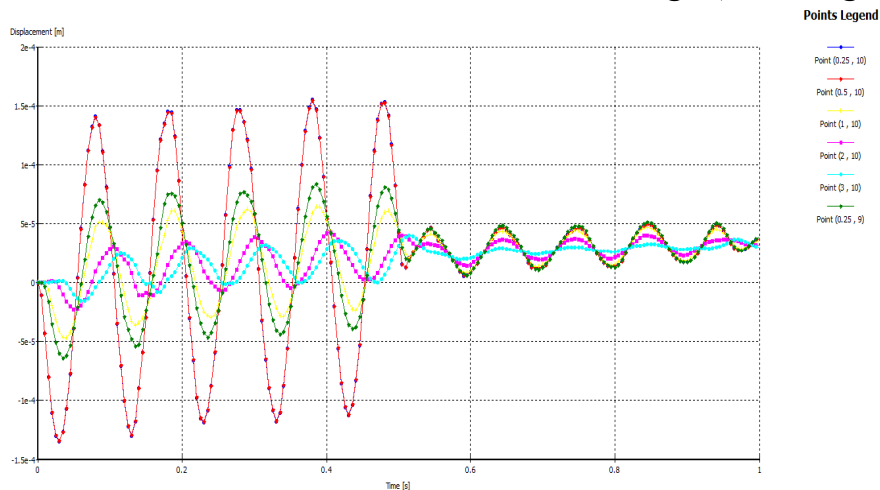
شکل ۸. شتاب قائم نقاط مختلف خاک خشک در اثر ارتعاش با میرایی

۳-۲- مدل‌سازی شالوده در حالت اشباع بدون میرایی

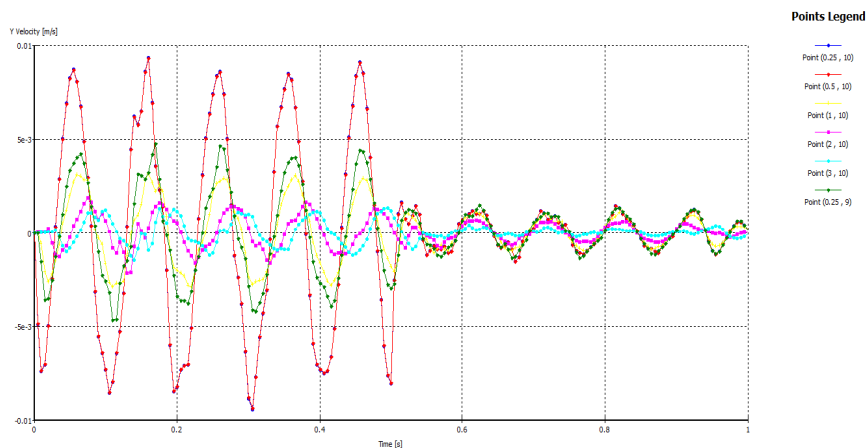
(مدل ۱)

شده است و به بررسی نتایج در این حالات پرداخته شده است. شکل‌های ۹ تا ۱۱ نتایج تحلیل این قسمت را نشان می‌دهند.

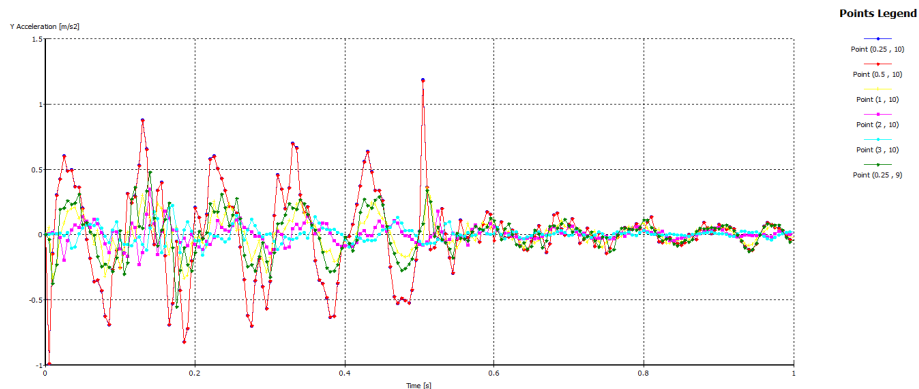
مشخصات و ابعاد عیناً مشابه حالات پیشین است، اما در این قسمت، سطح تراز آب، هم سطح زمین در نظر گرفته



شکل ۹. جابجایی قائم نقاط مختلف خاک اشباع در اثر ارتعاش بدون میرایی

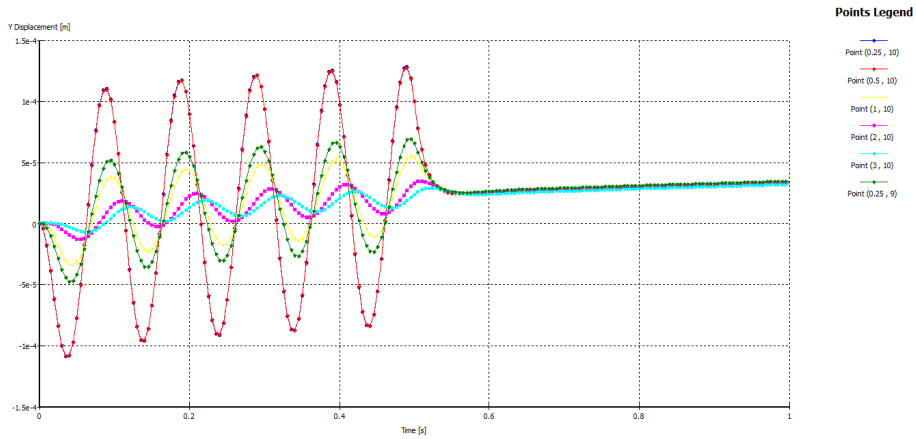


شکل ۱۰. سرعت قائم نقاط مختلف خاک اشباع در اثر ارتعاش بدون میرایی

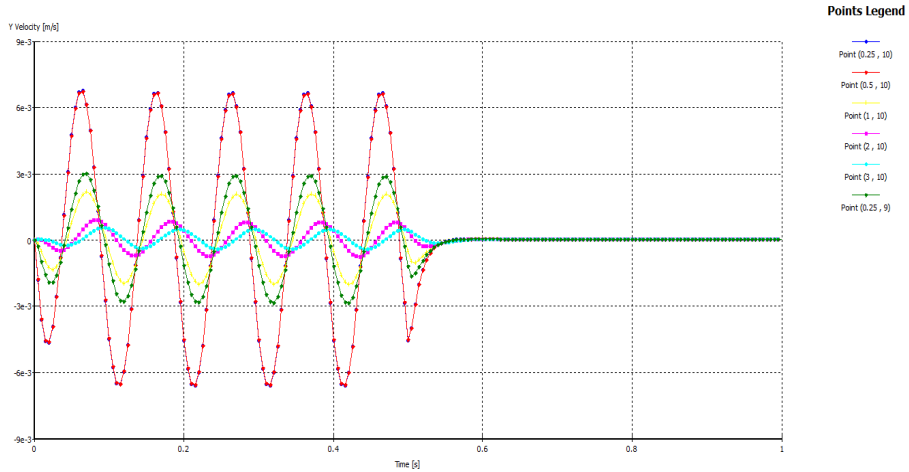


شکل ۱۱. شتاب قائم نقاط مختلف خاک اشباع در اثر ارتعاش بدون میرایی

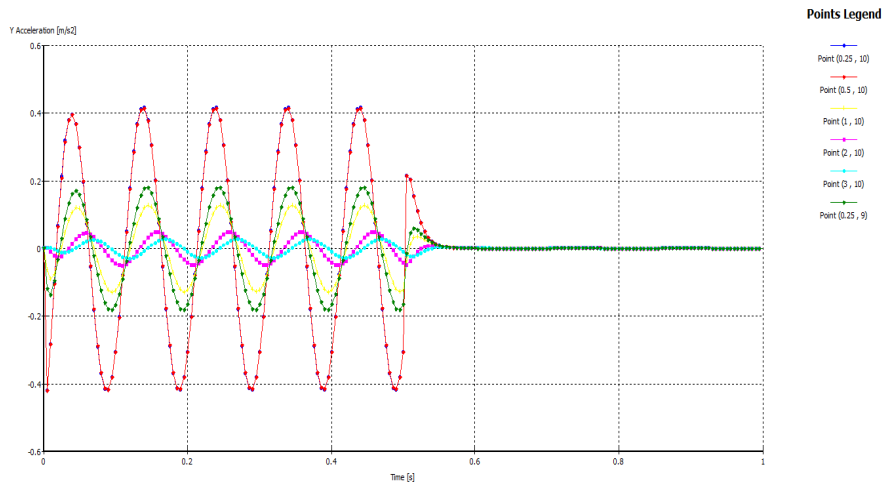
۲-۴- مدل‌سازی شالوده در حالت اشباع با میرایی (مدل ۱)  
 در این حالت، هم مشابه تحلیل‌های قسمت دوم از میرایی با همان مشخصات گفته شده استفاده شده است. شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نتایج تحلیل را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. جابجایی قائم نقاط مختلف خاک اشباع در اثر ارتعاش با میرایی

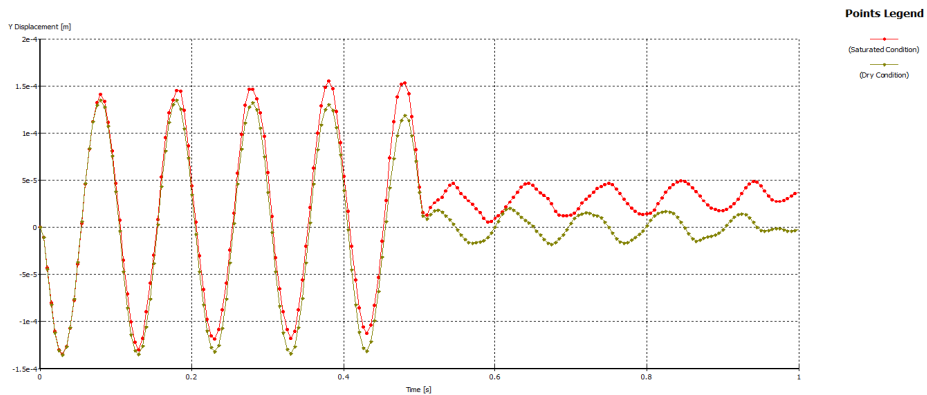


شکل ۱۳. سرعت قائم نقاط مختلف خاک اشباع در اثر ارتعاش با میرایی

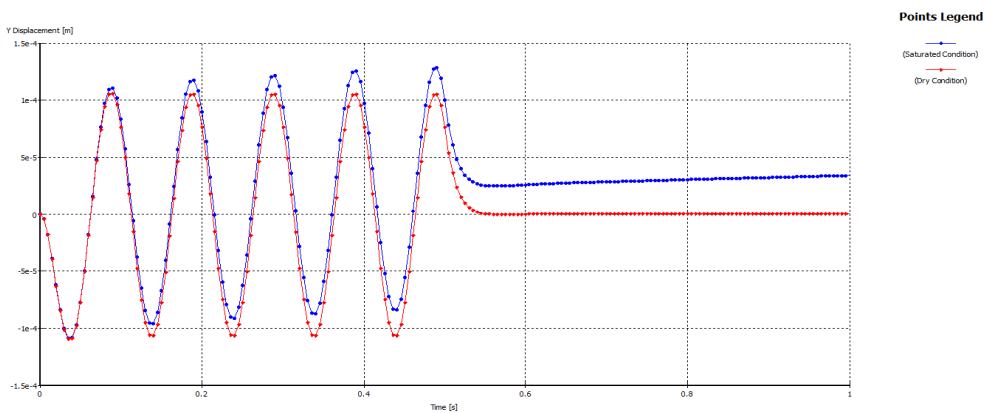


شکل ۱۴. شتاب قائم نقاط مختلف خاک اشباع در اثر ارتعاش با میرایی

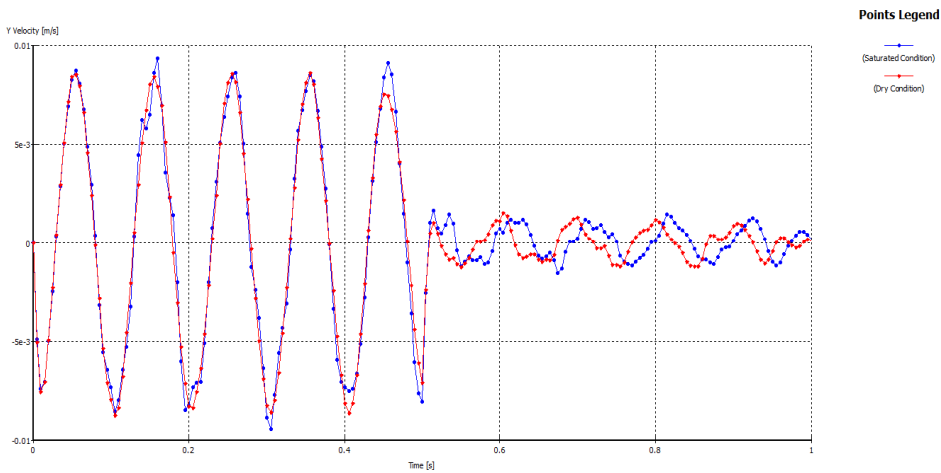
۲-۵- مقایسه رفتار خشک و اشباع برای شالوده در شکل‌های ۱۵ تا ۲۰ نتایج تحلیل‌های این مدل را نشان می‌دهند. مدل ۱



شکل ۱۵. مقایسه جابجایی قائم در حالت خشک و اشباع برای ارتعاش بدون میرایی

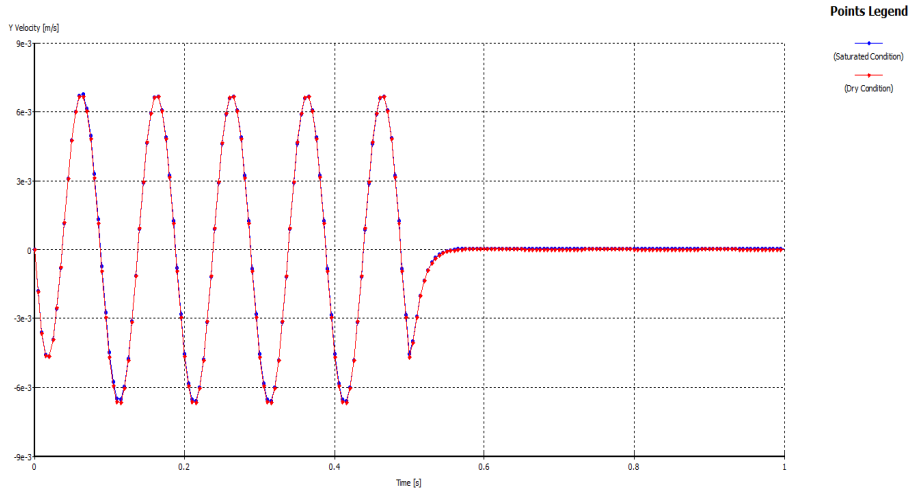


شکل ۱۶. مقایسه جابجایی قائم در حالت خشک و اشباع برای ارتعاش با میرایی

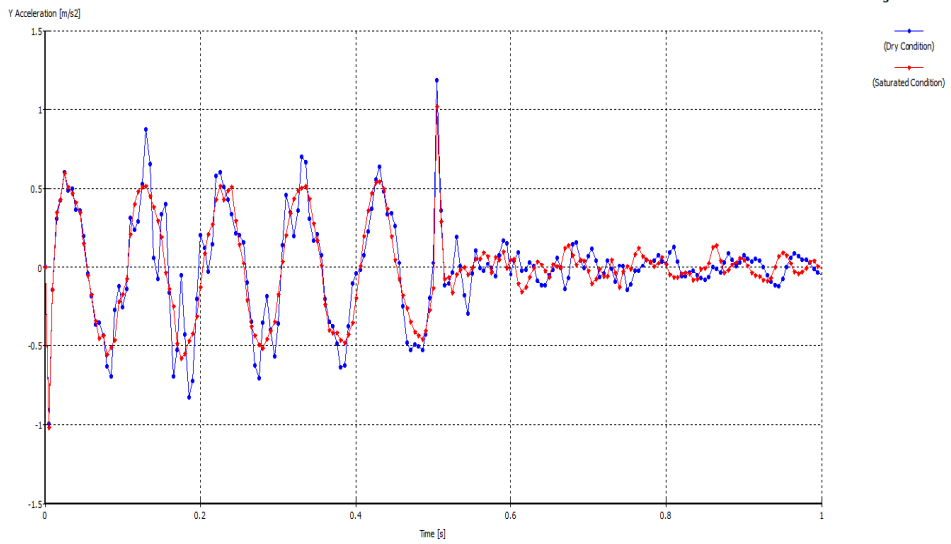


شکل ۱۷. مقایسه سرعت قائم در حالت خشک و اشباع برای ارتعاش بدون میرایی

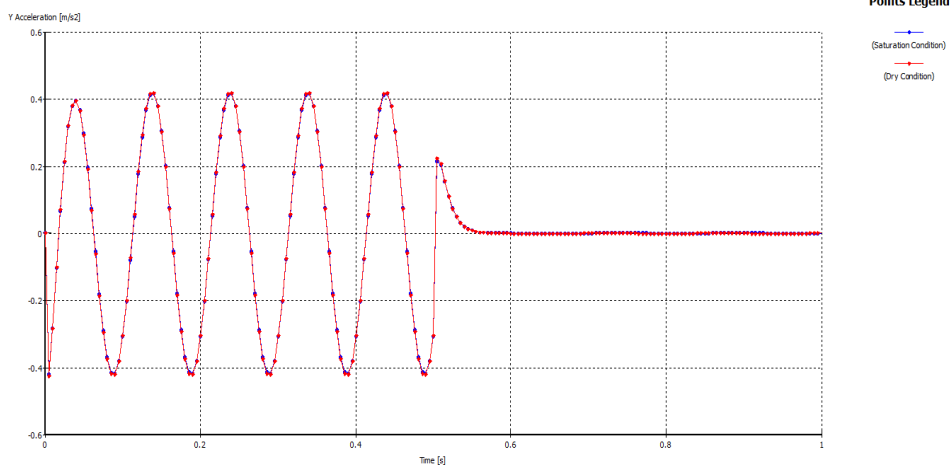




شکل ۱۸. مقایسه سرعت قائم در حالت خشک و اشباع برای ارتعاش با میرایی



شکل ۱۹. مقایسه شتاب قائم در حالت خشک و اشباع برای ارتعاش بدون میرایی

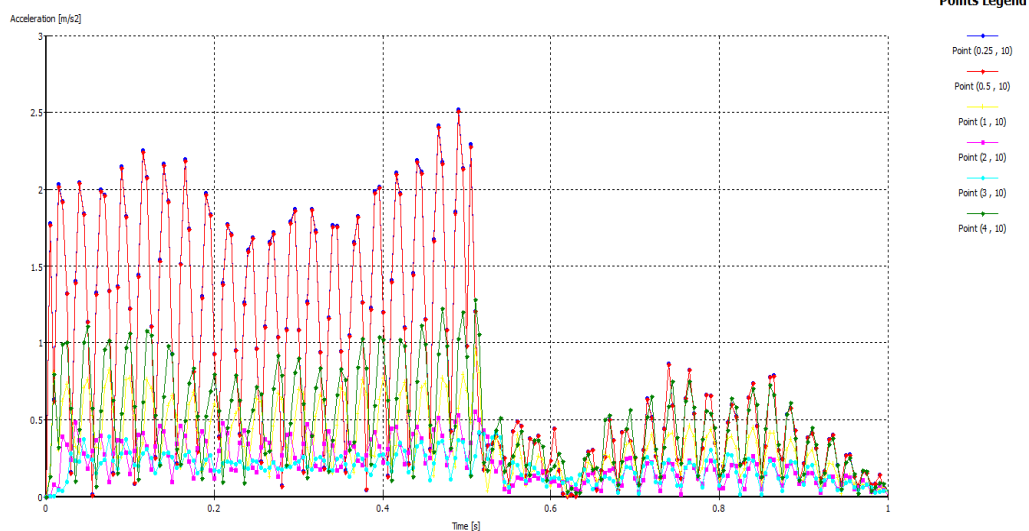


شکل ۲۰. مقایسه شتاب قائم در حالت خشک و اشباع برای ارتعاش با میرایی

فرکانس ۲۰ هرتز می‌باشد، و بازه زمانی اعمال شده آن ۵ سیکل در نیم ثانیه است. نتایج شتاب کلی نقاط مختلف این تحلیل در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

### ۶-۲- مدل‌سازی شالوده در حالت خشک بدون میرایی (مدل ۲)

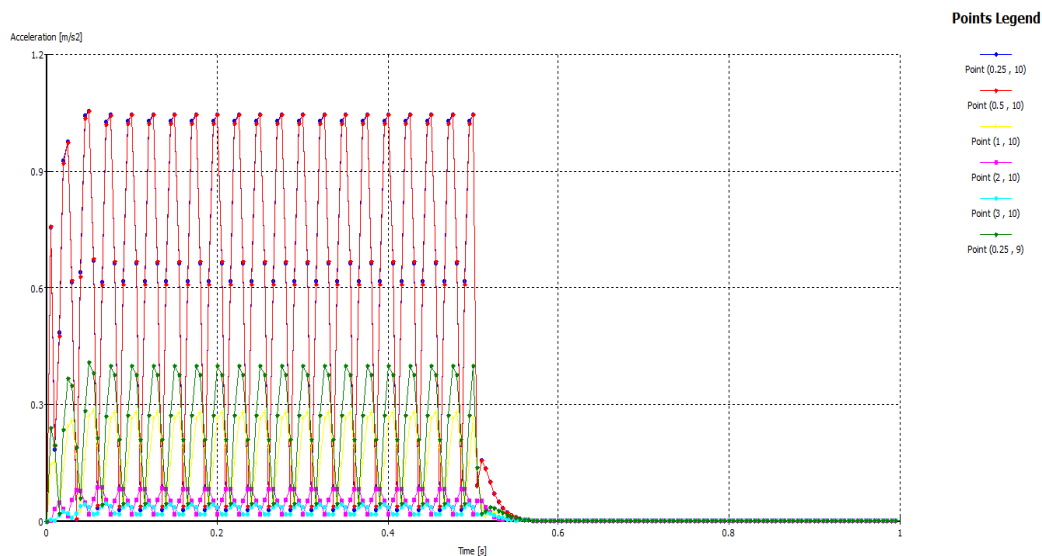
در این حالت، بار هارمونیک قائم وارده شده از طرف زلزاتور به زمین داری دامنه ۱۰ کیلونیوتن بر متر مربع و



شکل ۲۱. شتاب کلی نقاط مختلف خاک خشک در اثر ارتعاش بدون میرایی

شکل ۲۲ نتایج تحلیل این مدل در حالت با میرایی رایلی و همان مشخصات قبل را نشان می‌دهد.

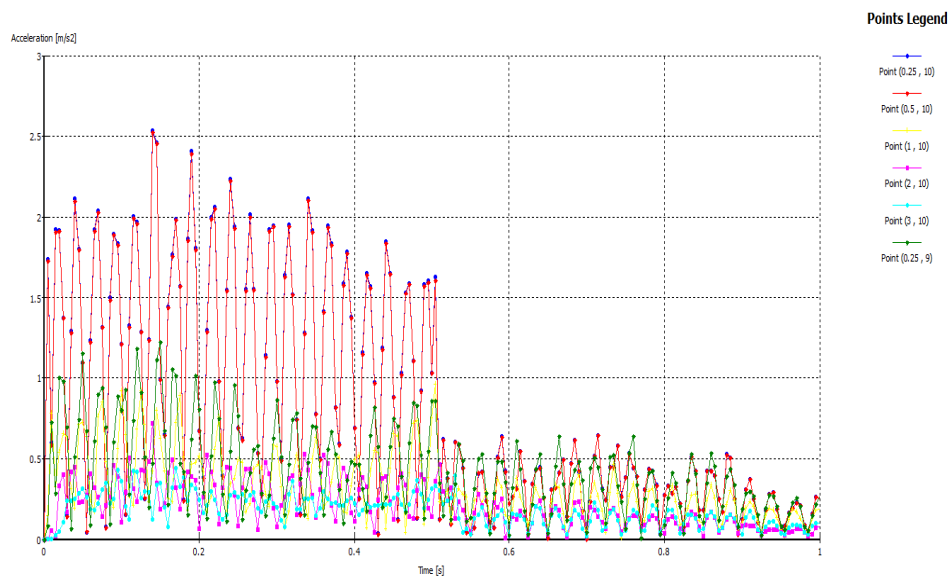
### ۷-۲- مدل‌سازی شالوده در حالت خشک با میرایی (مدل ۲)



شکل ۲۲. شتاب کلی نقاط مختلف خاک خشک در اثر ارتعاش با میرایی

در این حالت سطح آب هم برای مدل تعریف شده است.  
شکل ۲۳ نتایج را برای این مدل نشان می‌دهد.

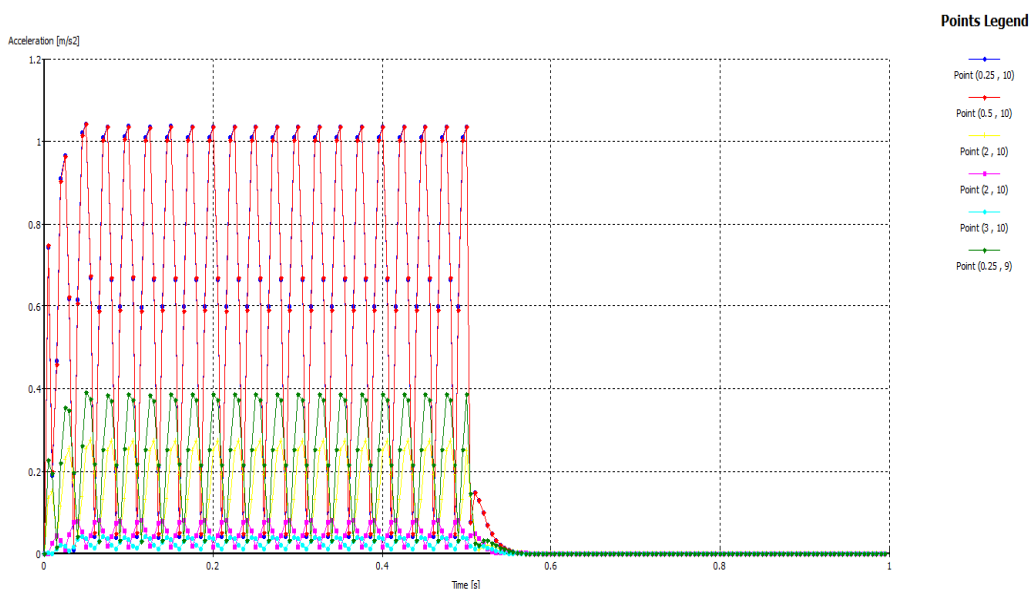
۸-۲- مدل‌سازی شالوده در حالت اشباع بدون میرایی  
(مدل ۲)



شکل ۲۳. شتاب کلی نقاط مختلف خاک اشباع در اثر ارتعاش بدون میرایی

شکل ۲۴ نتایج به دست آمده برای شتاب کلی نقاط  
مختلف را برای این مدل نشان می‌دهد.

۹-۲- مدل‌سازی شالوده در حالت اشباع با میرایی  
(مدل ۲)

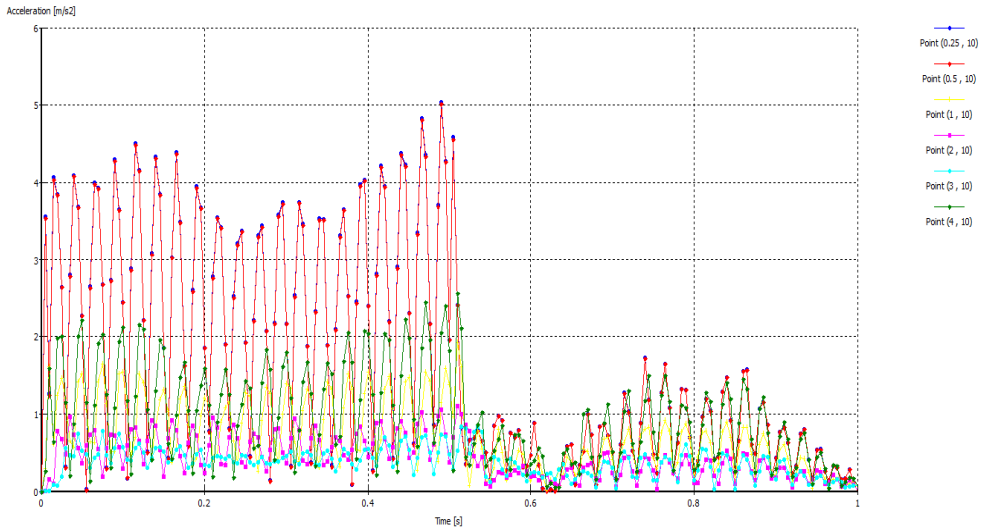


شکل ۲۴. شتاب کلی نقاط مختلف خاک اشباع در اثر ارتعاش با میرایی

فرکانس ۲۰ هرتز می‌باشد. شکل ۲۵ نتایج تحلیل شتاب این مدل با همان مشخصات قبل را نشان می‌دهند.

۱۰-۲- مدل‌سازی شالوده در حالت خشک بدون میرایی (مدل ۳)

در این حالت، بار هارمونیک قائم وارده شده از طرف ژنراتور به زمین داری دامنه ۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع و

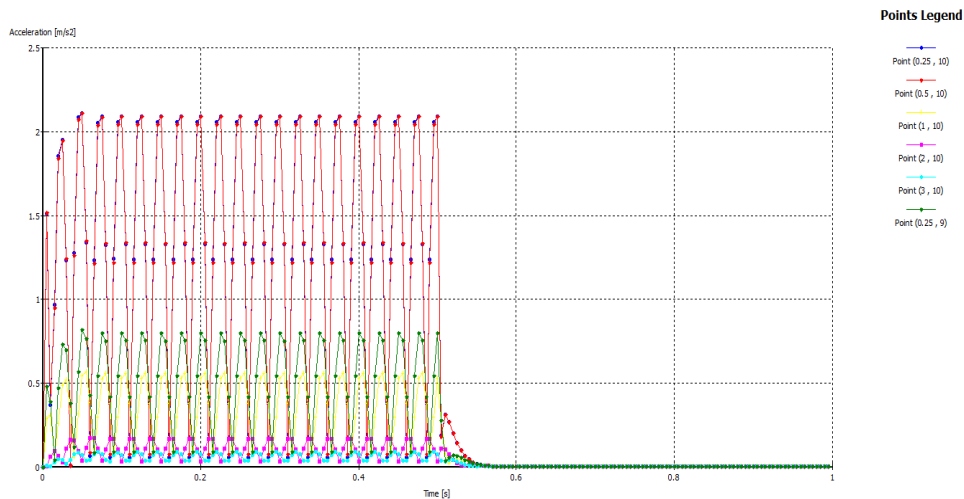


شکل ۲۵. شتاب کلی نقاط مختلف خاک خشک در اثر ارتعاش بدون میرایی

حالت با میرایی رایلی و همان مشخصات قبل را نشان می‌دهد.

۱۱-۲- مدل‌سازی شالوده در حالت خشک با میرایی (مدل ۳)

در این حالت، بار هارمونیک قائم وارده شده از طرف ژنراتور به زمین داری دامنه ۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع و فرکانس ۲۰ هرتز می‌باشد. شکل ۲۶ نتایج تحلیل این مدل در

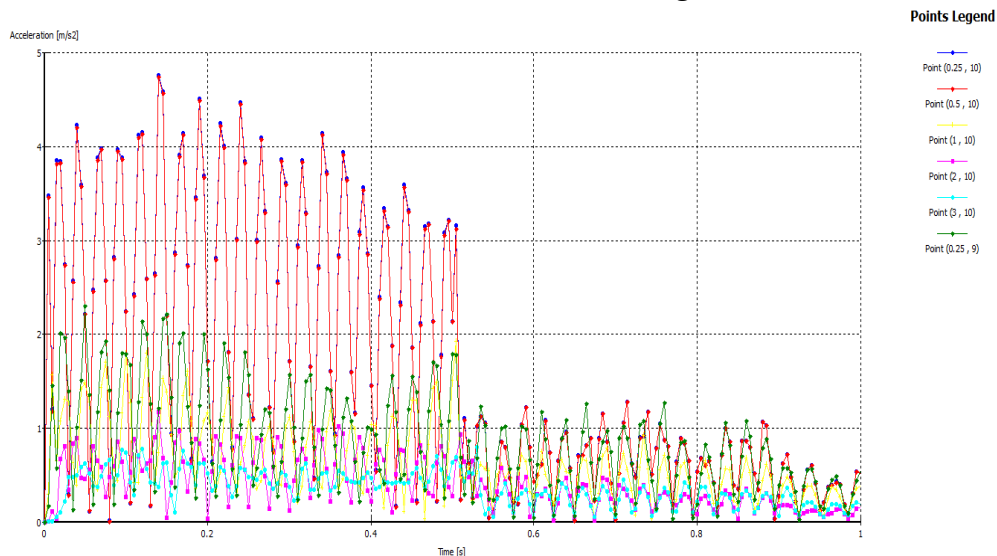


شکل ۲۶. شتاب کلی نقاط مختلف خاک خشک در اثر ارتعاش با میرایی

هرتز می‌باشد. شکل ۲۷ نتایج تحلیل این مدل را با همان مشخصات قبل نشان می‌دهند.

۱۲-۲- مدل‌سازی شالوده در حالت اشباع بدون میرایی (مدل ۳)

در این حالت، بار هارمونیک قائم وارده شده از طرف ژنراتور به زمین داری دامنه ۲۰ کیلو نیوتن بر متر مربع و فرکانس ۲۰

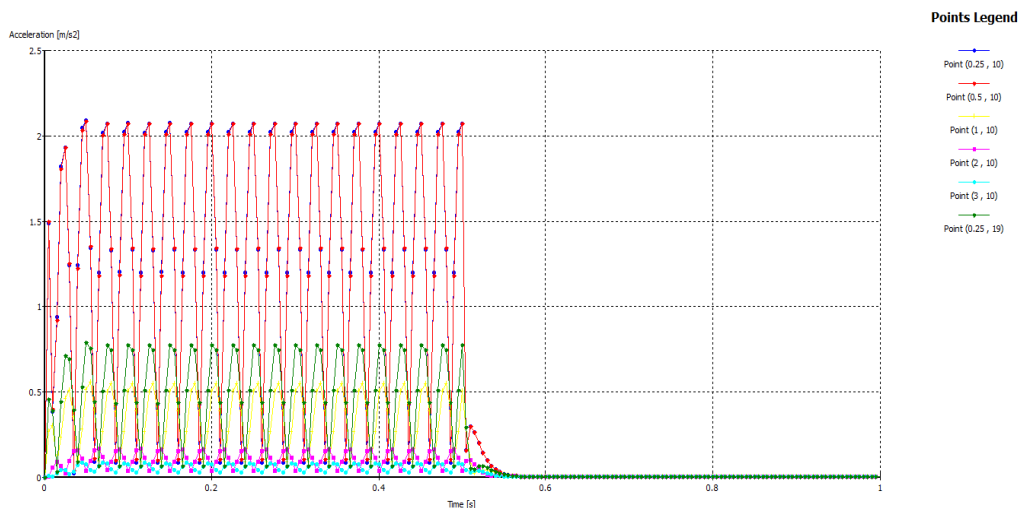


شکل ۲۷. شتاب کلی نقاط مختلف خاک اشباع در اثر ارتعاش بدون میرایی

فرکانس ۲۰ هرتز می‌باشد و سطح آب هم برای مدل تعریف شده است. اشکال ۲۸ نتایج را نشان می‌دهد.

۱۳-۲- مدل‌سازی شالوده در حالت اشباع با میرایی (مدل ۳)

در این حالت، بار هارمونیک قائم وارده شده از طرف ژنراتور به زمین داری دامنه ۲۰ کیلو نیوتن بر متر مربع و



شکل ۲۸. شتاب کلی نقاط مختلف خاک اشباع در اثر ارتعاش با میرایی

### ۳- بحث و بررسی

در این پژوهش، مدل‌سازی‌های عددی برای سه نوع مدل مشخص به منظور بررسی رفتار خاک تحت اثر ارتعاش پی ماشین آلات انجام شده است. بدین منظور، ارتعاش اعمالی ماشین آلات بر زمین به صورت اعمال بار دینامیکی هارمونیک بر فونداسیون شبیه سازی شده است. در جدول ۲ نتایج مقدار بیشینه جابجایی، سرعت و شتاب به دست آمده در اثر اعمال بار دینامیکی به ماشین آلات در این پژوهش نشان داده شده است. از اشکال پیشین مشخص است که در شرایط بدون میرایی هم در اواخر بازه زمانی مقادیر سرعت، شتاب و جابجایی تا حدودی به سمت صفر میل کرده (این موضوع در حالات خشک واضح تر مشخص است)، علت این موضوع را هم می‌توان به شرایط میرایی هندسی ربط داد که در اثر این نوع میرایی چنین شرایطی رخ می‌دهد.

همانطور که در جدول ۲ مشخص است در اثر میرایی هر سه مقدار جابجایی، سرعت و شتاب کاهش می‌یابند، اما مقادیر کاهش شتاب در شرایط وجود میرایی بسیار چشمگیرتر است. از آنجایی که حالت اشباع هم به صورت زهکشی شده در نظر گرفته شده است، در نتیجه مقادیر به دست آمده در حالت اشباع هم تفاوت چندانی با شرایط خشک ندارند. زمانی که فرکانس دوبرابر می‌شود (اما دامنه تغییر نمی‌کند)، شتاب بیش از دو برابر می‌شود؛ همچنین پارامترهای دیگر نیز افزایش می‌یابند، اما رشد آن‌ها بسیار کمتر از شتاب است. زمانی که فرکانس و دامنه هر دو افزایشی دو برابری پیدا می‌کنند، مقادیر جابجایی، سرعت و شتاب هر سه به اندازه دو برابر رشد پیدا می‌کنند. این موضوع نشان می‌دهد که اگر فرکانس اعمالی به تنهایی افزایش یابد، تنها پارامتری که به صورت چشمگیر تغییر می‌کند، مقدار شتاب است.

جدول ۲. نتایج تحلیل‌های عددی در حالات مختلف

فرکانس ۱۰ هرتز و دامنه ۱۰ کیلونیوتن بر متر مربع (خاک خشک)	بدون میرایی	با میرایی
بیشینه جابجایی کلی (متر)	$1/31 \times 10^{-2}$	$1/1 \times 10^{-2}$
بیشینه شتاب کلی (متر بر ثانیه)	$8/3 \times 10^{-3}$	$6/5 \times 10^{-3}$
بیشینه شتاب کلی (متر بر مجذور ثانیه)	۱	۰/۴۲

فرکانس ۱۰ هرتز و دامنه ۱۰ کیلونیوتن بر متر مربع (خاک اشباع)		
بیشینه جابجایی کلی (متر)	$1/55 \times 10^{-2}$	$1/22 \times 10^{-2}$
بیشینه شتاب کلی (متر بر ثانیه)	$9 \times 10^{-3}$	$6/7 \times 10^{-3}$
بیشینه شتاب کلی (متر بر مجذور ثانیه)	۱/۱۹	۰/۴۲
فرکانس ۲۰ هرتز و دامنه ۱۰ کیلونیوتن بر متر مربع (خاک خشک)		
بیشینه جابجایی کلی (متر)	$1/57 \times 10^{-2}$	$8 \times 10^{-3}$
بیشینه شتاب کلی (متر بر ثانیه)	۰/۱۹	$9 \times 10^{-3}$
بیشینه شتاب کلی (متر بر مجذور ثانیه)	۲/۵	۱/۱
فرکانس ۲۰ هرتز و دامنه ۱۰ کیلونیوتن بر متر مربع (خاک اشباع)		
بیشینه جابجایی کلی (متر)	$1/52 \times 10^{-2}$	$8/7 \times 10^{-3}$
بیشینه شتاب کلی (متر بر ثانیه)	۰/۱۹	$9 \times 10^{-3}$
بیشینه شتاب کلی (متر بر مجذور ثانیه)	۲/۵	۱/۰۵
فرکانس ۲۰ هرتز و دامنه ۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع (خاک خشک)		
بیشینه جابجایی کلی (متر)	$3/1 \times 10^{-2}$	$1/6 \times 10^{-2}$
بیشینه شتاب کلی (متر بر ثانیه)	۰/۳۸	۰/۱۸
بیشینه شتاب کلی (متر بر مجذور ثانیه)	۵	۲/۱
فرکانس ۲۰ هرتز و دامنه ۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع (خاک اشباع)		
بیشینه جابجایی کلی (متر)	$2/8 \times 10^{-2}$	$1/6 \times 10^{-2}$
بیشینه شتاب کلی (متر بر ثانیه)	۰/۳۶	۰/۱۸
بیشینه شتاب کلی (متر بر مجذور ثانیه)	۴/۸	۲/۱

### ۴- نتیجه گیری

از مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های عددی انجام شده در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که اثرات ارتعاش اعمالی از طرف ماشین آلات در سطح زمین، روی خاک زیر آن در حالت خشک و اشباع تقریباً مشابه می‌باشند (تنها مقادیر جابجایی‌های بیشینه است که اندکی تغییر دارند) چرا که شرایط اشباع برای حالت زهکشی شده تحلیل گردید و این موضوع نشان می‌دهد که به دلیل زهکشی خاک، شرایط تقریباً همانند محیط خشک خواهد بود. اگر مقدار فرکانس و دامنه هر دو با هم دو برابر شوند، آنگاه میزان تغییرات جابجایی، سرعت و شتاب همگی دو برابر می‌شوند؛ اما اگر فرکانس به تنهایی دو برابر شود و مقدار دامنه بار دینامیکی

- Das, B.M. and Ramana, G.V., (2011), "Principles of soil dynamics", CENGAGE Learning, USA.
- DEGEBO, (1943), Deutsch forschungsgesellschaft fur bordenmechanik.
- Gazetas, G., (1981), Torsional displacements and stresses in non-homogeneous soils, *Geo technique*, 31(4), pp.487.
- Gazetas, G., (1983), "Analysis of machine foundation vibrations: state of art", *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2(1), pp.2-42.
- Gazetas, G., (1991), "Formulas and charts for impedance of surface and embedded foundations", *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(9), pp.1363-1381.
- Hushmand, B., (1983), "Experimental Studies of Dynamic Response of Foundation", Ph.D. thesis, California Institute of Technology.
- Kavand, A. Sarkeshik Zade Motlagh, A. and Ghalandar Zade, A., (2016), "Dynamic response of alluvial sedimentation caused by vertical earthquake component of near field fault", *Bulletin of Earthquake science and Engineering*, 3(2), pp.1-20.
- Lysmer, J. and Richart, F.E., (1996), "Dynamic response of footing to vertical loading", *Journal of Soil Mechanics and Foundation*, 92(1), pp.65-91.
- Mandel, A. and Baidya, D., (2004), "Effect of presence of rigid base within the soil on the dynamic response of rigid surface foundation", *Geotechnical Testing Journal*, 27(5), pp.475-482.
- PLAXIS Software version 8, user manual.
- Prakash, S. and Puri, K.V., (2006), "Foundation for vibrating machines", *Journal of Structural Engineering*, (special issue). SERC, Madras, India, pp.1-38.
- Richart, F.E. and Whitman, R.V., (1967), "Comparison of footing vibration tests with theory", *Journal of Soil Mechanics and Foundation*, 93(6), pp.143-168.
- Gazetas, G., (1980), "Static and dynamic displacements of foundations on heterogeneous multilayered soils", *Geotechnique*, 30(2), pp.159.
- اعمالی ثابت بماند، تنها میزان شتاب است که به صورت چشمگیر تغییر می‌کند و دو پارامتر دیگر تغییرات محسوسی از خود نشان نمی‌دهند.
- ### ۵-مراجع
- بازیار، م.ح. و قناده، ز.، (۱۳۸۲). "دینامیک خاک، با نگرشی ویژه به مهندسی زلزله". انتشارات دانشگاه علم و صنعت.
- شعبان‌نژاد اشکلک، ا. آزادی، م.، (۱۳۹۸)، "بررسی اندرکنش دینامیکی خاک- تونل- شمع بر سازه‌های سطحی به روش تاریخچه زمانی با استفاده از روش تفاضل محدود سه بعدی"، جاده، دوره ۲۷، شماره ۱، ص. ۵۹-۱۰۰.
- طباطبایی عقدا، س.ط.، شاه‌محمدی مهرجردی، م.، (۱۳۹۷)، "اثر جهت پذیری زلزله‌ی حوزه نزدیک و دور با در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه پایه پل (مطالعه موردی پل چالوس)". جاده، در دست چاپ.
- نادرپور، ح. فخاریان، پ. نوغانی، س. نورمحمدی، ا.، (۱۳۹۷). "بررسی تاثیر انواع سیستم‌های کنترل سازه‌ای بر کاهش پاسخ پل‌ها"، جاده، در دست چاپ.
- عبدالله‌پور، ح.، (۱۳۹۱). "تحلیل دینامیکی فونداسیون ماشین با اعمال اثرات اندرکنش خاک-شمع"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تفرش.
- Ai, Z.Y. Liu, C.L. and Jiang, J.P., (2016), "Dynamic analysis of a vertically loaded rigid disc in transversely isotropic multi layered half space", *Mechanica*, 51(8), pp.1887-1895.
- Asik, M. Z., (1999), "Dynamic response analysis of the machine foundations on non-homogeneous soil layer. *Computers and Geotechnics* 24", pp.141-153.
- Beredugo, Y.O. and Novak, M., (1972), "Coupled horizontal and rocking vibrations of embedded footings", *Canadian Geotechnical Journal* 9(4), pp.477-497.
- Chai, S.H. Ghaemmaghami, A.R. and Kwon, O.S., (2017), "Numerical modeling method for inelastic and frequency-dependent behavior of shallow foundations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, pp.377-387.
- Chen, S.S. Liao, K.H. and Shi, J.Y., (2016), "A dimensionless parametric study for forced vibrations of foundation-soil systems", *Computers and Geotechnics*, 76, pp.184-193.

# Numerical Investigation of Road Response to Dynamic Vibration of Machine Foundation

*Masoud Nasiri, Ph.D. Candidate, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Razi University, Kermanshah, Iran.*

*Ahmad Reza Mazaheri, Assistant Professor, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.*

*Ali Amiri, B.A. Student, Islamic Azad University, Kermanshah Branch, Iran.*

*E-mail: [nasiri\\_masoud@yahoo.com](mailto:nasiri_masoud@yahoo.com)*

Received: September 2020-Accepted: January 2021

## ABSTRACT

Investigating the effects of machine and the vibrational effects created on its subsoil, especially on road surfaces, is one of the most important issues in soil dynamics. In this study, the foundation behavior on the road surface, which has been affected by vibration with a range of 10 and 20 KN/m<sup>2</sup> and a frequency of 10 and 20 Hz, has been investigated. The ground response at different points in both dry and saturated states and in two states without damping and with Rayleigh damping was investigated at different distances from the foundation. Two-dimensional Finite Element software (PLAXIS) has been used for numerical analysis. The results of numerical analysis have shown that by increasing the frequency and amplitude of the vibration up to twice, the maximum values of displacement, maximum speed and maximum acceleration on the road surface will be doubled. However, when only the applied frequency is doubled and the amplitude value does not change, the displacement and velocity changes in the soil are not very significant. However, the rate of acceleration changes in the soil is doubled. This indicates the effect of frequency on the rate of acceleration.

**Keywords:** Dynamic Vibration, Frequency, Damping, Numerical Analysis