

بررسی اثر مشخصات خاک در سرعت بیشینه ذرات، ناشی از کوبش شمع با استفاده از آنالیز اجزاء محدود

بهزاد سعیدی (کارشناس ارشد)

میلاذ سعیدی (کارشناس ارشد)

مهدی دهستانی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۴ (دوره ۲ - ۳۱، شماره ۱/۴، ص. ۱۱۷-۱۲۴، یادداشت شفی)

شمع‌کوبی یکی از روش‌های رایج در اجرای پی‌های عمیق است، که به‌طور گسترده در ساختمان‌های مسکونی، صنعتی، پل‌ها، بزرگراه‌ها و... استفاده می‌شود. در کنار مزایایی که استفاده از این روش دارد، فرایند شمع‌کوبی حائز آثار نامطلوبی است که مهم‌ترین آن‌ها، ارتعاشات ایجادشده در زمین است، که می‌تواند باعث آسیب به سازه‌های مجاور و تأسیسات حساس شود. رایج‌ترین شاخص برای سنجش میزان ارتعاشات ناشی از شمع‌کوبی، سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک (PPV) است. در این نوشتار، با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود plaxis ۲D، پارامترهای مؤثر در ارتعاشات ایجادشده در سطح زمین ناشی از کوبش شمع بررسی شده است. نتایج تحلیلی نشان داده است که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی و ضریب پواسون خاک، سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک افزایش می‌یابد؛ در حالی که افزایش مدول کشسانی، وزن مخصوص و میرایی مصالح خاک، موجب کاهش سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک می‌شود. همچنین تغییرات دانسیته نسبی خاک، تأثیر محسوسی در سرعت بیشینه نداشته است.

واژگان کلیدی: شمع‌کوبی، ارتعاشات زمین، سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک، ۲D plaxis.

۱. مقدمه

انجام فعالیت‌های عمرانی همواره با ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی و همچنین ارتعاشات همراه بوده است. از طرف دیگر، این فعالیت‌ها غالباً در مناطق پرجمعیت و در مجاورت سازه‌های حساس به ارتعاش انجام می‌گیرند. امروزه، در بسیاری از کشورها آیین‌نامه‌های زیست‌محیطی جدیدی ارائه شده است، که انجام بعضی از فعالیت‌های ساخت و ساز را محدود یا ممنوع کرده است. یکی از فعالیت‌های عمرانی شمع‌کوبی است. شمع‌کوبی روشی متداول در ساخت پی‌ها در مناطقی است که خاک سطحی مقاومت کافی ندارد و یا بارهای وارده از روسازه، مقادیر بزرگی باشند. در کنار مزایایی که استفاده از این روش دارد، فرایند شمع‌کوبی آثار نامطلوبی نیز دارد. مهم‌ترین تأثیر نامطلوب شمع‌کوبی، که ناشی از ضربات چکش شمع‌کوب است، ارتعاشات حاصل از آن است؛ که علاوه بر ایجاد مزاحمت برای ساکنان منطقه، در سازه‌های مجاور و تأسیسات حساس نسبت به ارتعاش تأثیر نامطلوب می‌گذارد و همچنین عواقبی نظیر: احتمال تورم، چگالش، نشست دائمی، و یا تغییر مکان جانبی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۵، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۲/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۳/۲/۷.

behzad1365114@yahoo.com
m.saeedi1987@yahoo.com
dehestani@gmail.com

میرایی کاهش می‌یابد.^[۷] پژوهشگران دیگری نیز در سال ۲۰۱۲ با استفاده از نرم‌افزار Abaqus به بررسی برخی پارامترهای مؤثر از جمله: مشخصات شمع، مشخصات خاک و مشخصات چکش در سرعت بیشینه ذرات خاک ناشی از کوبش شمع پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که برای فواصل بیشتر از ۵ متر از محل کوبش شمع، سرعت بیشینه ذرات خاک در عمق نفوذ ۴/۵ تا ۵/۵ متر از شمع رخ می‌دهد و همچنین سرعت بیشینه ذرات خاک با افزایش نیروی شمع‌کوب و افزایش قطر و اصطکاک شمع و خاک افزایش و با افزایش مدول کشسانی خاک کاهش می‌یابد.^[۸] در این نوشتار، ابتدا به اعتبارسنجی نرم‌افزار Plaxis ۲D^[۹] با استفاده از نتایج یک مورد آزمایشگاهی کوبش شمع، که در سایت Chennai انجام شده بود،^[۱۰] و سپس به بررسی پارامترهای مؤثر خاک از جمله: دانسیته نسبی، مدول کشسانی، میرایی مصالح، وزن مخصوص، زاویه اصطکاک داخلی خاک و ضریب پواسون در ارتعاشات ایجادشده در سطح زمین ناشی از کوبش شمع پرداخته شده است.

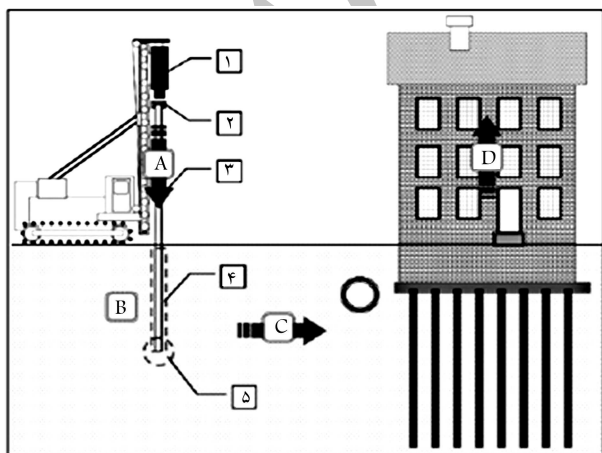
۲. انتقال ارتعاشات در زمین ناشی از فرایند شمع‌کوبی

هنگامی که چکش شمع‌کوب بر سر شمع ضربه وارد می‌کند، موج‌های تنش ایجاد می‌شوند که با بسامد و دامنه‌ی خاصی به سمت نوک شمع، خاک و سپس به سازه‌های مجاور انتشار می‌یابند. انتشار این امواج تنش در حین عملیات شمع‌کوبی، شامل ۴ مرحله‌ی اساسی است، که در شکل ۲ نشان داده شده است. بدون در نظر گرفتن کامل این زنجیره‌ی انتقال ارتعاشات، درک صحیح و کاملی از دلایل مشکلات ناشی از شمع‌کوبی میسر نخواهد شد. ۴ مرحله‌ی مذکور به این شرح است:

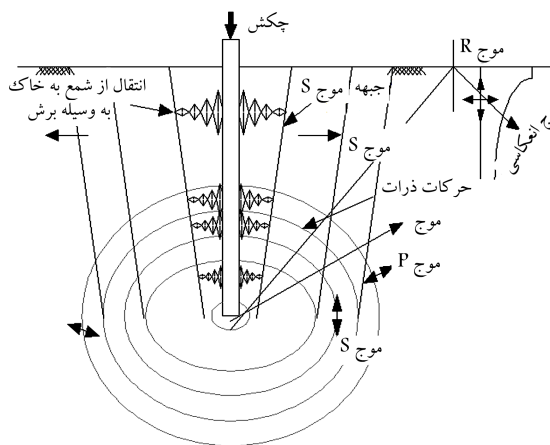
۱. انتشار موج در شمع، به این صورت که انرژی ایجادشده در اثر ضربه‌ی چکش در سر شمع و کلاهک شمع از طریق شمع به سمت نوک شمع منتقل می‌شود.
 ۲. اندرکنش خاک و شمع در طول جداری شمع و همچنین در نوک آن.
 ۳. انتشار موج در زمین، انتقال ارتعاشات از طریق لایه‌های خاک و آب زیرزمینی.
 ۴. اندرکنش دینامیکی خاک و سازه، عکس‌العمل دینامیکی پی‌ها، توسعه‌ی ارتعاشات در سازه‌ها.^[۱۱]
- سرعت بیشینه ذرات خاک به هنگام عبور امواج (PPV)، معیار اصلی سنجش ارتعاشات ایجادشده در زمین محسوب می‌شود. سرعت ذرات خاک در

در سطح زمین ایجاد می‌شود، امواج رابلی است که در مقایسه با سایر امواج سهم بیشتری در حمل انرژی حاصل از ارتعاش دارد. سرعت انتقال انرژی به خاک، در اثر ضربه به شمع بسیار بالاست و باعث ایجاد تغییرشکل‌های خمیری در میدان نزدیک می‌شود. در مورد میدان دور نیز نتایج نشان داده است که ارتعاشات ایجادشده باعث ایجاد تغییرشکل‌هایی در محدوده‌ی ارتجاعی می‌شود.^[۱] در تحلیل مسائل شمع‌کوبی سه نوع موج در زمین مد نظر قرار می‌گیرد. چنان که در شکل ۱ نشان داده شده است، این امواج شامل: ۱. امواج کروی که از نوک شمع ساطع می‌شوند؛ ۲. امواج استوانه‌یی که به صورت جانبی از جداری شمع منتشر می‌شوند؛ ۳. امواج سطحی که از انکسار امواج در سطح زمین و در فاصله‌یی بحرانی از شمع ایجاد می‌شوند، هستند.^[۱]

امروزه استفاده از روش‌های عددی اجزاء محدود و تفاضلات محدود به طور گسترده‌یی در مسائل ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از نرم‌افزارهایی که براساس اجزاء محدود عمل می‌کند، نرم‌افزار plaxis ۲D است. برای اولین بار، در سال ۱۹۹۴ یک مدل اجزاء محدود در تحلیل شمع‌کوبی مورد مطالعه قرار گرفته است، که در آن نتایج حاصل از کوبش یک شمع بتنی در خاک رسی عادی تحکیم‌یافته‌ی زهکشی نشده ارائه شده است.^[۲] همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۵ نتایج حاصل از کوبش یک شمع فازی با مدل اجزاء محدود نرم‌افزار Plaxis ۲D مقایسه شده است. در مدل مذکور، شمع و خاک اطراف آن به ترتیب به صورت ارتجاعی و کشسان‌خمیری مدل شده‌اند. شتاب قائم بیشینه ذرات خاک، حاصل از آنالیز عددی سازگاری خوبی با نتایج مدل آزمایشگاهی داشته است، اما شتاب افقی بیشینه ذرات خاک در حدود ۲۰٪ بیشتر از نتایج مدل آزمایشگاهی بوده است.^[۳] همچنین در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۰۸، مدل‌سازی‌های مشابه از آزمایش‌های دینامیکی شمع با استفاده از نرم‌افزار Plaxis ۲D انجام شده است.^[۴] پژوهشگران دیگری نیز در سال ۲۰۰۸، با استفاده از نرم‌افزار Plaxis ۲D به بررسی اثر ترانشه‌های پُر شده با بتن در کاهش سرعت ارتعاشات ذرات خاک، ناشی از کوبش شمع پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که ترانشه‌ی پُر شده با بتن با ابعاد ۳D×۴D در فاصله‌ی ۹D (که D برابر با قطر شمع است)، از محل کوبش شمع مؤثرترین حالت برای کاهش امواج قائم رابله است.^[۵] همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۱۱، با استفاده از نرم‌افزار Plaxis ۲D به بررسی برخی پارامترهای مؤثر در سرعت بیشینه ذرات از جمله: مدول کشسانی، میرایی و تعداد ضربات شمع‌کوب پرداخته شده و این نتیجه به دست آمده است که سرعت بیشینه ذرات با افزایش مدول کشسانی خاک و



شکل ۲. انتقال ارتعاشات از چکش تا سازه‌های مجاور از طریق خاک.^[۱]



شکل ۱. امواج ساطع شده در اثر فرایند شمع‌کوبی.

آئین‌نامه‌ی سوئد (SS ۰۲ ۵۲ ۱۱) که یکی از رایج‌ترین استانداردهای موجود در این زمینه است،^[۱۴] مقادیر مجاز ارتعاش را برای جلوگیری از آسیب به ساختمان‌ها ارائه کرده است، که در صورت بیشتر بودن سرعت ارتعاشات از این مقادیر، آسیب‌های جدی به ساختمان‌ها و پی آنها وارد خواهد شد. مطابق رابطه‌ی ۴، سرعت ارتعاشات در این آئین‌نامه به جنس خاکی که شمع در آن کوبیده می‌شود، جنس شمع، نوع ساختمان، مصالح ساختمان و نوع پی وابسته است:

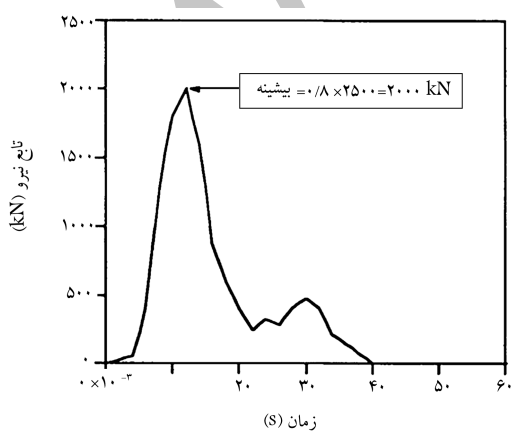
$$v = v_s F_b F_m F_g \quad (4)$$

در رابطه‌ی مذکور، v مؤلفه‌ی عمودی سرعت ارتعاش، v_s سرعت ارتعاشات با توجه به نوع خاک، F_b شاخص ساختمان است، که از ۰/۵ برای سازه‌های حساس تا ۱/۷ برای سازه‌های سنگین متغیر است. F_m شاخص مصالح ساختمان است، که از ۰/۶۵ برای مصالح آهکی تا ۱/۲ برای فولاد، بتن مسلح، و چوب متغیر است و F_g شاخص پی است که با توجه به نوع پی از ۰/۶ برای پی‌های گسترده تا ۱ برای پی‌های شمع‌ی با مقاومت نوک متغیر است.

۴. اعتبارسنجی مدل عددی

اعتبارسازی نرم‌افزار اجزاء محدود با نتایج حاصل از کوبش شمع که در پژوهشی در سال ۲۰۰۴ گزارش شده است،^[۱۵] انجام شده است. شمع موردنظر از جنس فولاد با ضخامت جداره‌ی ۲۵ میلی‌متر و طول و قطری به ترتیب برابر با ۱۵/۸ و ۰/۶ متر است، که با ضربه‌ی چکشی با ظرفیت ۴۱ کیلو نیوتن و ارتفاع سقوط ۲/۵ متر به تدریج در خاک ماسه‌ی فرو می‌رود. جهت شبیه‌سازی ضربات چکش بر سر شمع، بار نقطه‌ی بر سر شمع اعمال شده است. آنالیز دینامیکی مدل با بازه‌ی زمانی ۰/۱۰۰ و به مدت ۱ ثانیه انجام شده است. شکل ۳، نمودار نیرو - زمان اعمال‌شده بر سر شمع را نشان می‌دهد. خاک همگن و یکنواخت به عمق ۲۰ متر و بُعد جانبی ۴۰ متر مدل‌سازی شده است. مشخصات مورد نیاز شمع و خاک جهت انجام آنالیز عددی در جدول ۱ ارائه شده است.

شکل ۴، مقادیر بیشینه‌ی شتاب افقی ذرات خاک را در فاصله‌ی ۳ متری از محل کوبش در سطح زمین نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از آنالیز عددی سازگاری قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۳. نمودار نیرو - زمان اعمال‌شده بر سر شمع.^[۱۵]

هر لحظه شامل سه مؤلفه‌ی برداری عمود بر هم است، که توسط ژئوفون‌های سه محوری اندازه‌گیری می‌شود.

سه مؤلفه‌ی سرعت را می‌توان در یک مقدار برداری با در نظر گرفتن سرعت‌های شعاعی، عرضی، و قائم در هر لحظه‌ی زمانی با هم ترکیب کرد. از ترکیب آنها مقدار سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک PPV به دست می‌آید، که در رابطه‌ی ۱ نشان داده شده است:

$$PPV = \sqrt{(v_r^2 + v_t^2 + v_s^2)} \quad (1)$$

که در آن، v_r سرعت شعاعی، v_t سرعت عرضی و v_s سرعت در جهت قائم است.^[۱۱]

۳. مروری بر روابط موجود

اثرات دینامیکی شمع‌کوبی روی ساختمان‌های مجاور به پارامترهایی از جمله: سیستم شمع‌کوبی، نوع خاک، فاصله از منبع ارتعاش، برهم‌کنش خاک - سازه، شرایط ساختمان‌ها، نحوه‌ی انتشار امواج از طریق خاک و شاخص‌های دیگر بستگی دارد. در ابتدا تئوری‌هایی که در مورد ارتعاشات زمین ارائه شدند، مربوط به ارتعاشات زمین ناشی از انفجار سنگ بودند. اندازه‌گیری‌های صحرائی ارتعاشات ایجادشده در سطح زمین نشان می‌داد که بزرگی این ارتعاشات متناسب با انرژی آزاد شده در انفجار است. در پژوهشی در سال ۱۹۷۳، نتایج اندازه‌گیری ارتعاشات زمین در خاک‌های مختلف، که در آنها شمع‌کوبی صورت گرفته بود، تحلیل و رابطه‌ی بر مبنای انرژی پیشنهاد شد و به کمک آن سرعت ارتعاش (v) در فاصله‌ی r از منبع ارتعاش و براساس انرژی شمع تخمین زده شد (رابطه‌ی ۲).^[۱۲]

$$v = k \left(\sqrt{E/r} \right) \quad (2)$$

که در آن، v سرعت ارتعاش، E انرژی وارده از منبع، k یک ضریب تجربی برای ارتعاشات است؛ که از ۰/۳ تا ۴ متغیر است. با وجود این که رابطه‌ی مذکور هنوز توسط مهندسان در فعالیت‌های عمرانی به کار برده می‌شود، اما استفاده از رابطه‌ی ذکرشده و پیش‌بینی ارتعاشات زمین براساس آن با اشکالاتی همراه است. از جمله اینکه در آن جهت سرعت ارتعاشات (قائم، افقی، یا برآیند مؤلفه‌ها) مشخص نشده است و این رابطه مستقل از نوع و سختی خاک است. همچنین مشخص نیست که انرژی چکش مدنظر، انرژی اسمی چکش و یا مقدار انرژی منتقل‌شده به شمع است.

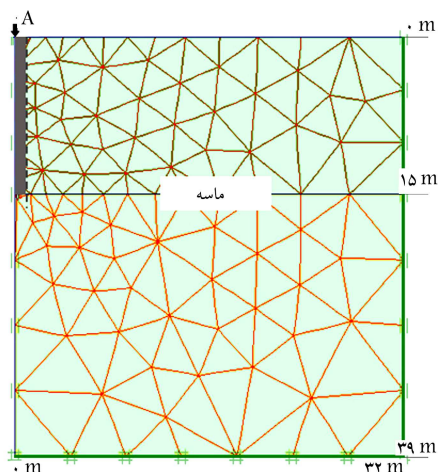
یکی دیگر از روابطی که در منابع ژئوتکنیکی به آن زیاد اشاره شده است، در پژوهشی در سال ۱۹۸۱ ارائه شده است.^[۱۳] این رابطه مشابه رابطه‌ی ۲ است و در آن سرعت بیشینه‌ی ذرات به صورت تابعی از فاصله از محل شمع‌کوبی بیان شده است (رابطه‌ی ۳):

$$v = K \left(D/\sqrt{E} \right)^{-n} \quad (3)$$

که در آن، v سرعت بیشینه‌ی ذرات، D فاصله از محل شمع‌کوب، E انرژی وارده از منبع و K یک ضریب تجربی برای ارتعاشات است. در رابطه‌ی ۳، مقدار n بین مقادیر ۱ تا ۲ است و معمولاً مقدار میانگین ۱/۵ برای آن در نظر گرفته می‌شود.^[۱۳] در صورتی که در رابطه‌ی ۳ مقدار ضریب n برابر ۱ در نظر گرفته شود، مقدار k و K در روابط ۲ و ۳ یکسان خواهند شد.

جدول ۱. مشخصات مورد نیاز خاک و شمع جهت اعتبارسازی نرم افزار. [۶]

پارامتر	ماسه	شمع
مدل	خاک سخت شونده	ارتجاعی خطی
وضعیت	زهکشی نشده	بدون تخلخل
وزن مخصوص (KN/m^3)	۱۷٫۹	۷۸٫۹
مدول کشسانی (KPa)	۲۹۰۰۰	$۲٫۱ \times ۱۰^۸$
چسبندگی (KPa)	۱	—
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۱	—
ضریب پواسون	۰٫۴	۰٫۳

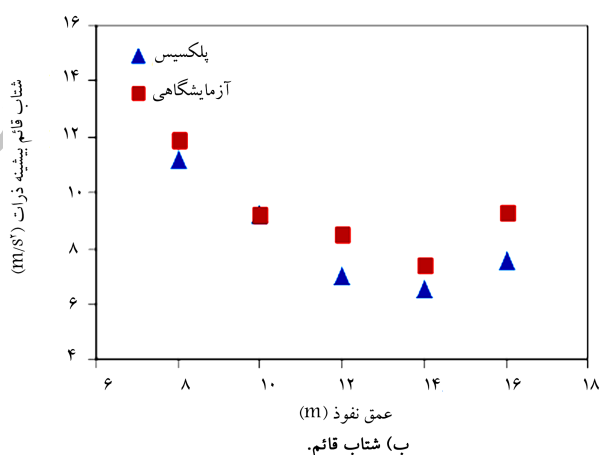
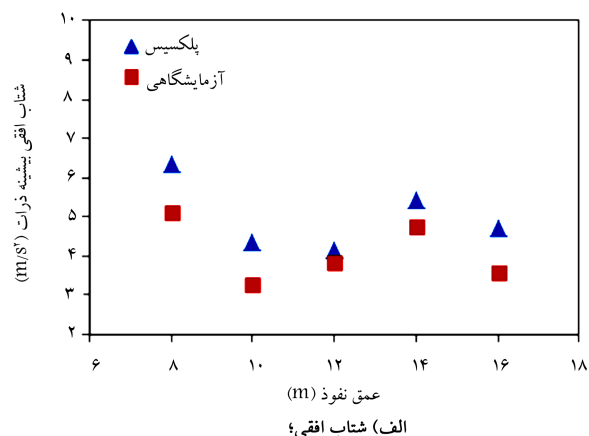


شکل ۵. مدل عددی کوبش شمع.

جدول ۲. مشخصات مورد نیاز خاک و شمع جهت انجام آنالیز

پارامتر	ماسه	شمع
مدل	خاک سخت شونده	ارتجاعی خطی
وضعیت	زهکشی نشده	بدون تخلخل
وزن مخصوص (KN/m^3)	۱۷	۲۴
مدول کشسانی (KPa)	۴۰	۳×۱۰^۴
چسبندگی (KPa)	۱	—
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۲	—
ضریب پواسون	۰٫۳	۰٫۲
ضریب کاهش سطح مشترک	۰٫۷	۱

است. شمع و خاک توسط المان‌های ۱۵ گره‌بی مدل‌سازی شده‌اند. برای شمع مدل رفتاری ارتجاعی خطی و غیرمتخلخل و برای خاک ماسه‌بی نیز مدل رفتاری خاک سخت شونده در نظر گرفته شده است. مشخصات خاک و شمع در جدول ۲ ارائه شده است. به منظور مدل‌کردن اندرکشی بین خاک - شمع از المان‌های حد واسط اطراف شمع استفاده شده است. المان‌های حد واسط در حدود ۰٫۵ متر در زیر نوک شمع گسترش یافته است، تا بتوان اندرکشی خاک و شمع را جهت در نظر گرفتن میرایی مصالح، که از لغزش خاک اطراف شمع در مدت تداخل ناشی می‌شود، به درستی شبیه‌سازی کرد.^[۸] مرزهای مدل به منظور جلوگیری از ایجاد بازتاب‌های نامطلوب ارتعاشات، از نوع مرزهای جاذب انرژی استاندارد در نظر گرفته شده است، که در پایین و سمت راست مدل امتداد یافته است. به منظور مدل‌کردن نیروی شمع‌کوب، بارگسترده در بالای شمع اعمال شده است. در انتها با اعمال شرایط اولیه، آنالیز دینامیکی مسئله شروع شده است. آنالیز مسئله شامل سه فاز محاسباتی بوده است. در فاز نخست شمع ساخته شده و مشخصات بتن به آن اختصاص داده شده است. در فاز دوم، بارگذاری نقطه‌یی مشابه بارگذاری بخش ۴ و با تابع نیرو زمان نشان داده شده در شکل ۳ به سر شمع اعمال شده است. در فاز سوم بار صفر نگه داشته شده و پاسخ دینامیکی خاک و شمع در اثر ضربه در مدت زمان ۱ ثانیه مونتور شده است. فازهای دوم و سوم شامل محاسبات دینامیکی بوده است.



شکل ۴. مقادیر بیشینه شتاب ذرات خاک در فاصله‌ی ۳ متری از محل کوبش در سطح زمین.

۵. فرایند مدل‌سازی عددی

شکل ۵، فرایند مدل‌سازی عددی کوبش یک شمع بتنی پیش‌ساخته با طول ۱۵ متر و قطر ۰٫۴ متر را در خاک ماسه‌بی نشان می‌دهد. به منظور ناچیزکردن اثرات مرزی در رفتار شمع، مدل ساخته شده به اندازه‌ی ۷۵D از اطراف شمع و به اندازه‌ی ۶۰D از زیر نوک شمع ادامه یافته است (D قطر شمع است). مدل‌سازی به علت تقارن هندسه و بارگذاری، به صورت تقارن محوری انجام شده است و همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، فقط نیمی از شمع و خاک اطراف آن مدل شده

۶. بررسی اثر پارامترهای مختلف خاک در سرعت

بیشینه‌ی ذرات

سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک به پارامترهای مهمی مانند: جنس خاک، جنس شمع، مشخصات شمع‌کوب، میرایی مصالح و اندرکنش خاک و شمع بستگی دارد. در این بخش به بررسی اثر پارامترهای خاک ماسه‌یی در سرعت بیشینه‌ی ذرات پرداخته شده است.

۱.۶. مدول کشسانی خاک

در این بخش با استفاده از آنالیز اجزاء محدود به بررسی اثر مقادیر مختلف مدول کشسانی خاک (با فرض ثابت بودن سایر پارامترها) در سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک در سطح زمین به علت ارتعاشات ایجادشده ناشی از شمع‌کوبی پرداخته شده است. بدین منظور مدل عددی ساخته شده در بخش ۵ برای مقادیر مختلف مدول کشسانی خاک در محدوده‌ی ۱۰ تا ۸۰ مگاپاسکال تحلیل شده است. سایر مشخصات شمع و خاک مطابق جدول ۲ است. شکل ۶، نتایج حاصل از تحلیل عددی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مذکور ملاحظه می‌شود، با افزایش مدول کشسانی خاک، سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک کاهش یافته است. با توجه به روابط موجود در منابع معتبر در زمینه‌ی گسترش تنش و امواج در محیط‌های ارتجاعی، سرعت بیشینه‌ی ذرات محیط در اثر عبور امواج تنشی در محیط‌های یک بعدی ارتجاعی از رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود: [۱۶]

$$V = \frac{\sigma}{\rho v_c} \frac{\sigma}{\sqrt{\rho E}} \quad (5)$$

که در آن، σ تنش فشاری، ρ جرم مخصوص محیط و v_c سرعت انتشار موج فشاری در محیط و E مدول ارتجاعی است. مطابق رابطه‌ی مذکور مشخص است که سرعت بیشینه‌ی ذرات با ریشه‌ی دوم مدول ارتجاعی خاک رابطه‌ی معکوس دارد و افزایش مدول ارتجاعی موجب کاهش سرعت بیشینه می‌شود.

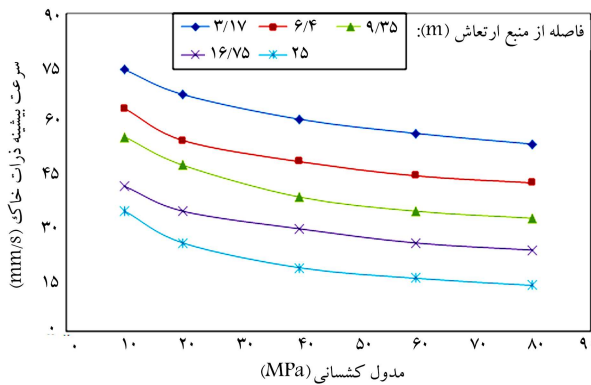
۲.۶. اثر ضریب پواسون خاک

در این بخش به بررسی تغییرات سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک، در اثر تغییرات ضریب پواسون خاک پرداخته شده است. شکل ۷، تغییرات سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک در برابر مقادیر مختلف ضریب پواسون را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش ضریب پواسون و تمایل خاک به سمت رفتار خمیری، دامنه‌ی حرکتی ذرات و در نتیجه، سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک نیز افزایش یافته است.

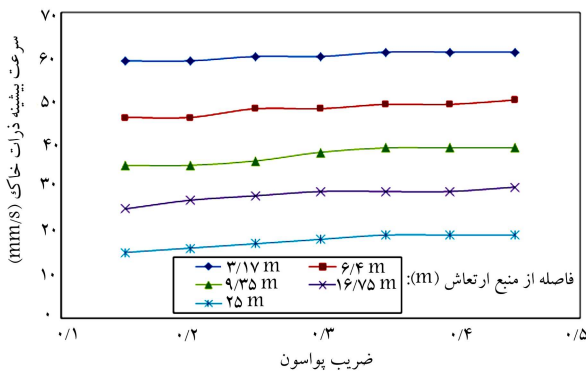
۳.۶. وزن مخصوص و زاویه‌ی اصطکاک خاک

در این بخش ابتدا خاک‌هایی با وزن‌های مخصوص برابر با ۱۳، ۱۵، ۱۷، ۱۹ و ۲۱ کیلو نیوتن بر مترمکعب مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۸ الف، نتایج مربوط به این متغیر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مذکور ملاحظه می‌شود، افزایش وزن مخصوص به‌طور بسیار نامحسوس موجب کاهش سرعت بیشینه‌ی ذرات شده است، به گونه‌یی که می‌توان از اثر این پارامتر صرف‌نظر کرد. مطابق رابطه‌ی ۵ نیز قابل درک است که تغییرات جزئی در مقادیر وزن مخصوص خاک نمی‌تواند تأثیر چشم‌گیری در مقدار سرعت بیشینه داشته باشد.

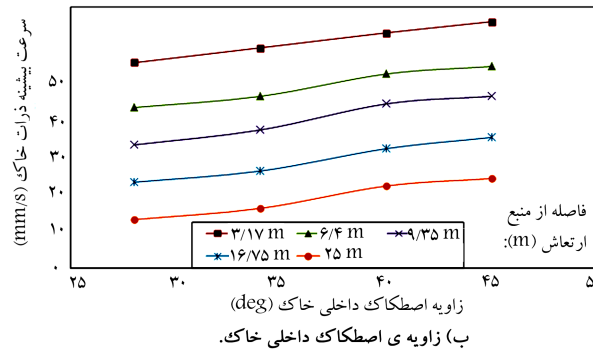
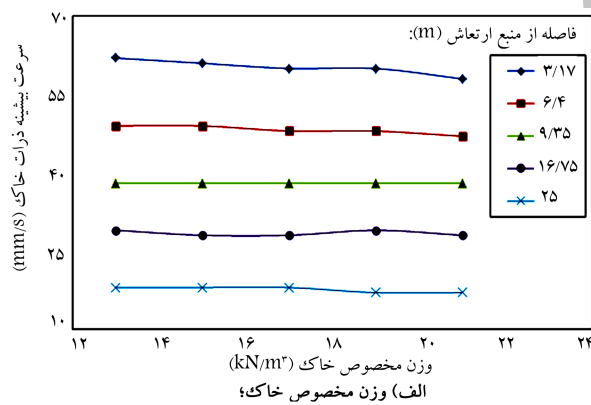
شکل ۸ ب، نیز اثر تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک برای مقادیر ۲۸،



شکل ۶. مقادیر سرعت بیشینه‌ی ذرات در برابر مدول کشسانی خاک در فواصل مختلف از شمع.



شکل ۷. مقادیر سرعت بیشینه‌ی ذرات در برابر ضریب پواسون خاک در فواصل مختلف از شمع.



شکل ۸. مقادیر سرعت بیشینه‌ی ذرات در فواصل مختلف از شمع.

۳۴، ۴۰ و ۴۵ درجه را نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور مشخص است که افزایش زاویه اصطکاک خاک موجب افزایش سرعت پیشینه‌ی خاک شده است.

۴.۶. دانسیته نسبی خاک

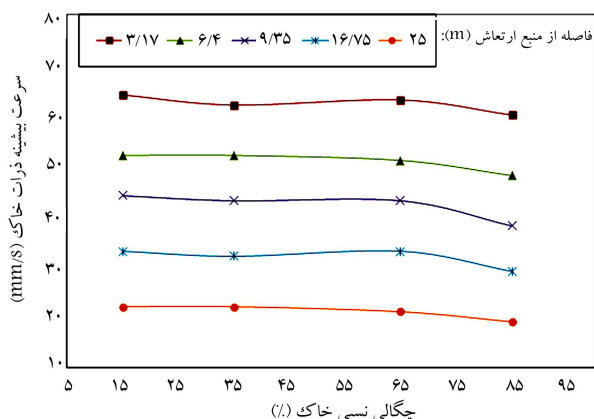
به منظور بررسی اثر دانسیته نسبی خاک در مقادیر سرعت پیشینه‌ی ارتعاشات خاک، تحلیل عددی بر روی خاک‌هایی با دانسیته نسبی ۱۵٪، ۳۵٪، ۶۵٪ و ۸۰٪ که به ترتیب بیانگر خاک شل، متوسط، متراکم، و خیلی متراکم است، انجام شده است. پارامترهای متناظر با دانسیته‌های نسبی مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. شکل ۹، مقادیر سرعت پیشینه‌ی ذرات خاک را در مقادیر مختلف تراکم خاک نشان می‌دهد. با توجه به شکل شاید بتوان گفت که سرعت پیشینه‌ی ذرات تقریباً مستقل از مقادیر دانسیته نسبی خاک است. علت این موضوع می‌تواند اثر متقابل زاویه اصطکاک داخلی خاک و مدول کشسانی خاک در سرعت پیشینه‌ی ذرات خاک باشد.

۵.۶. اثر نسبت میرایی خاک

میرایی خاک نقش مهمی در استهلاک انرژی امواج بازی می‌کند. تعیین نسبت میرایی به دلیل اینکه تحت تأثیر پارامترهایی همچون: سطح کرنش برشی و مشخصات خاک است، مشکل است، از این رو در ابتدا نحوه‌ی تعیین نسبت میرایی خاک توضیح داده می‌شود، سپس به بررسی تأثیر آن در ارتعاشات زمین با استفاده از تحلیل عددی پرداخته شده است. نسبت میرایی خاک ترکیبی از مؤلفه‌های چسبندگی و هیستریزس

جدول ۳. مشخصات خاک با دانسیته نسبی مختلف.

پارامتر	۱۵	۳۵	۶۵	۸۵
وزن مخصوص (KN/m ³)	۱۳	۱۶	۱۹۲	۲۱
مدول کشسانی (MPa)	۱۰	۲۰	۴۰	۸۰
چسبندگی (KPa)	۱	۱	۱	۱
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۲۶	۲۹	۳۵	۳۸
نسبت تخلخل	۰٫۷۸	۰٫۶۹	۰٫۵۶	۰٫۴۶



شکل ۹. مقادیر سرعت پیشینه‌ی ذرات در برابر دانسیته نسبی خاک در فواصل مختلف از شمع.

است. مؤلفه‌ی ویسکوز میرایی با نسبت میرایی اولیه بیان می‌شود و مستقل از مدول برشی خاک است و در معادله‌ی نسبت میرایی به صورت یک پارامتر ثابت فرض می‌شود. مؤلفه‌ی هیستریزس میرایی به سطح کرنش‌های برشی سیکلیک وابسته است. در این نوشتار از رابطه‌ی ۶ جهت تعیین نسبت میرایی استفاده شده است:

$$\xi = \xi_i + \xi_{\max} \left(\frac{\gamma}{\gamma + \gamma_r} \right) \quad (6)$$

که در آن، ξ_i نسبت میرایی اولیه، ξ_{\max} نسبت پیشینه‌ی میرایی هیستریزس، γ_r کرنش برشی مرجع خاک و γ کرنش برشی سیکلیک خاک است. [۱۷]

در پژوهشی در سال ۲۰۰۶، نیز نسبت میرایی اولیه و پیشینه‌ی میرایی هیستریزس به صورت روابط ۷ و ۸ معرفی شده است: [۱۷]

$$\xi_i (\%) = 1.5 + 0.3 PI (\%) \leq 5.8 \quad (7)$$

$$\xi_{\max} (\%) = 16 - 0.1 PI (\%) \geq 0.7 \quad (8)$$

در خاک ماسه‌یی به دلیل اینکه مقدار PI برابر صفر است، مقدار ξ_i برابر ۱٫۵٪ و مقدار ξ_{\max} برابر با ۱۶٪ خواهد شد. مقادیر کمینه و پیشینه‌ی ξ_i به ترتیب برابر با ۱٫۵٪ و ۱۷٫۵٪ است. در Plaxis نسبت میرایی مصالح به صورت رابطه‌ی رابلی مشخص و به صورت رابطه‌ی ۹ بیان شده است:

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (9)$$

که در آن، $[C]$ ماتریس میرایی، $[M]$ ماتریس جرم و $[K]$ ماتریس سختی است. α و β ضرایبی هستند که به ترتیب تأثیر جرم و سختی در میرایی را بیان می‌کنند. در Plaxis این دو پارامتر جهت لحاظ کردن میرایی مورد نیاز هستند. همچنین مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۰، رابطه‌ی ۱۰ جهت محاسبه‌ی ضرایب α و β پیشنهاد شده است: [۱۸]

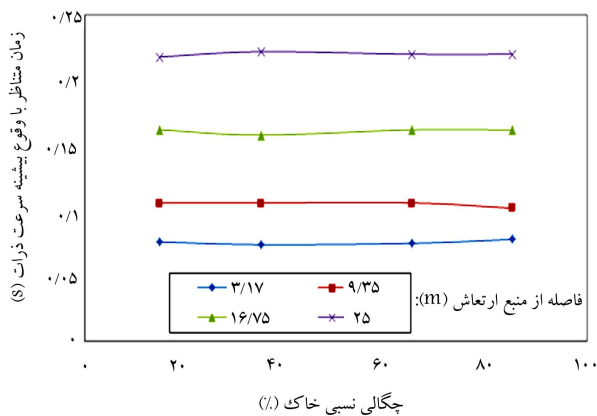
$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{\xi}{\pi(f_m + f_n)} \begin{bmatrix} 4\pi^2 f_m f_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

که در آن، m و n تعداد مد ارتعاشی و f_m و f_n بسامد طبیعی در مد ارتعاشی متناظر هستند، که از طریق رابطه‌ی ۱۱ به دست خواهند آمد. این تذکر لازم است که f_m بسامد طبیعی در مد اول است:

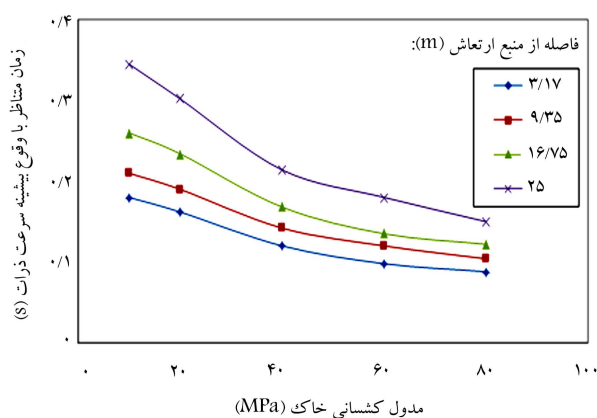
$$f_n = \frac{v_s}{4h(2i - 1)} \quad (11)$$

در رابطه‌ی اخیر، v_s برابر با سرعت موج برشی در خاک و h ضخامت لایه‌ی خاک است. معمولاً بسامد اول را در مد ارتعاشی اول و بسامدهای بعدی را در مدهای ارتعاشی بعدی انتخاب می‌کنند. در این آنالیز تعداد مدهای ارتعاشی برابر با ۱ در نظر گرفته شده است، بنابراین مقادیر f_m و f_n با هم برابر شده‌اند. پس از محاسبه‌ی نسبت میرایی با استفاده از روابط ذکر شده، به بررسی تأثیر آن در ارتعاش ذرات پرداخته شده است. بدین منظور ۵ مقدار مختلف نسبت میرایی در نظر گرفته شده و اثر آن در استهلاک امواج حاصله از کوبش شمع مورد بررسی قرار گرفته است. ضرایب α و β متناظر با نسبت میرایی‌های مختلف برای میرایی رایله، در جدول ۴ فهرست شده‌اند.

شکل ۱۰، نتایج حاصل از تحلیل را نشان می‌دهد. بر این اساس که با افزایش میرایی، به علت استهلاک انرژی امواج، سرعت پیشینه‌ی ذرات کاهش یافته است. با افزایش فاصله از منبع ارتعاش اثر نسبت میرایی در سرعت پیشینه‌ی



شکل ۱۱. تغییرات زمان متناظر با سرعت بیشینه‌ی ذرات در برابر مقادیر مختلف دانسیته نسبی در فواصل مختلف از منبع ارتعاش.



شکل ۱۲. تغییرات زمان متناظر با سرعت بیشینه‌ی ذرات در برابر مقادیر مختلف مدول کشسانی خاک در فواصل مختلف از منبع ارتعاش.

۳/۱۷ متری و ۲۵ متری از منبع ارتعاش، اختلاف زمانی وقوع سرعت بیشینه‌ی ذرات برای خاک با مدول کشسانی ۱۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب برابر ۰/۹۲ و ۰/۱۹۵ ثانیه است.

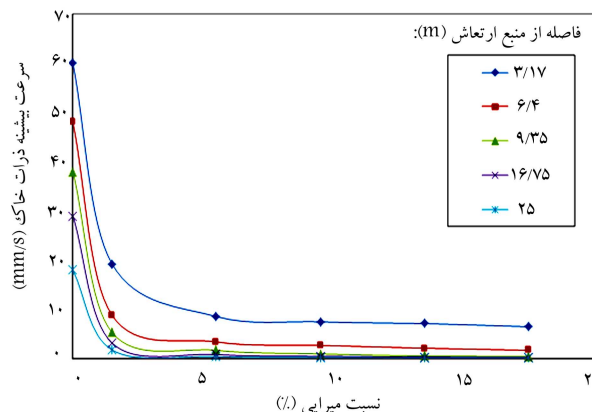
۸. نتیجه‌گیری

شمع‌کوبی یکی از روش‌های رایج در اجرای پی‌های عمیق است. در کنار مزایایی که استفاده از این روش دارد، اثرات نامطلوبی نیز وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها ارتعاشات ایجادشده در زمین است، که می‌تواند باعث آسیب به سازه‌های مجاور و تأسیسات حساس شود. رایج‌ترین شاخص برای سنجش میزان ارتعاشات ناشی از شمع‌کوبی، سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک (PPV) است. از این رو در این نوشتار با استفاده از آنالیز اجزاء محدود به بررسی اثر پارامترهای خاک در سرعت بیشینه‌ی ذرات پرداخته شده است. نتایج حاصل از آنالیز عددی را می‌توان به این صورت جمع‌بندی کرد:

- سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک با افزایش فاصله از محل کوبش شمع و به علت وجود میرایی هندسی در محیط کاهش می‌یابد.
- نتایج نشان داده است با افزایش مدول کشسانی خاک، سرعت بیشینه‌ی ذرات

جدول ۴. ضرایب α و β برای نسبت میرایی‌های مختلف.

نسبت میرایی (%)	α	β
۱/۵	۰/۱۵۳۵	۰/۰۱۵
۵/۵	۰/۵۶۲۸	۰/۰۰۵۳
۹/۵	۰/۹۷۲۰	۰/۰۰۹۲
۱۳/۵	۱/۳۸۰۰	۰/۰۱۳۱
۱۷/۵	۱/۷۹۰۰	۰/۰۱۷۱



شکل ۱۰. مقادیر سرعت بیشینه در برابر نسبت میرایی خاک در فواصل مختلف از شمع.

ذرات خاک به علت غالب شدن اثر میرایی هندسی کاهش یافته است. همچنین ملاحظه می‌شود در نسبت میرایی‌های بیشتر از ۵٪، سرعت بیشینه‌ی ذرات با تغییر نسبت میرایی تقریباً ثابت باقی مانده و تأثیر آن در فواصل دورتر نیز کمتر شده است.

۷. زمان متناظر با سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک

با بررسی تحلیل‌های صورت‌گرفته مشاهده شده است که با تغییر مشخصات خاک مانند: دانسیته نسبی، ضریب پواسون، زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص و نسبت میرایی، زمان متناظر با سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک برای تمامی مدل‌ها تقریباً ثابت و تغییر نیافته است. فقط در حالتی که مدول کشسانی خاک تغییر یافته، زمان متناظر با سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک نیز تغییر یافته است. علت این امر به دلیل تأثیر مدول کشسانی خاک در سرعت موج برشی و موج فشاری است. به‌عنوان نمونه، شکل ۱۱ تغییرات زمان متناظر با سرعت بیشینه‌ی ذرات را در برابر مقادیر مختلف دانسیته نسبی خاک نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک برای تمامی مقادیر دانسیته نسبی، تقریباً در یک زمان رخ داده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش مدول کشسانی خاک، زمان متناظر با رخ دادن سرعت بیشینه کاهش یافته است.

شکل ۱۲، تغییرات زمان متناظر با سرعت بیشینه‌ی ذرات را در برابر مقادیر مختلف مدول کشسانی خاک برای فواصل مختلف از منبع ارتعاش نشان می‌دهد. این اثر با افزایش فاصله از منبع ارتعاش افزایش یافته است، به‌طوری که در فاصله‌ی

-- با افزایش نسبت میرایی به علت استهلاك امواج، سرعت بیشینه‌ی ذرات کاهش می‌یابد و تأثیر این پارامتر در فواصل دورتر از منبع ارتعاش کم‌تر است و همچنین در نسبت میرایی‌های بزرگ‌تر از ۰.۵٪، سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

-- بررسی نتایج نشان داده است زمان متناظر با وقوع سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک، فقط با تغییرات مدول کشسانی خاک تغییر می‌کند و تغییر سایر پارامترهای خاک تأثیر محسوسی در تغییر زمان رخ دادن سرعت بیشینه ندارد.

خاک کاهش می‌یابد. همچنین افزایش وزن مخصوص ذرات خاک به طور نامحسوس موجب کاهش سرعت بیشینه می‌شود.

-- با افزایش ضریب پواسون و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک، سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک افزایش می‌یابد.

-- با توجه به بررسی نتایج به دست آمده ملاحظه شد که تغییرات دانسیته نسبی خاک، تأثیر محسوسی در سرعت بیشینه‌ی ذرات خاک ندارد.

پانویس

1. peak particle velocity

منابع (References)

- Massarsch, K.R. and Fellenius, B.H. "Ground vibrations induced by impact pile driving", *Proc. 6th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Arlington, Virginia, pp. 1-38 (2008).
- Masoumi, H.R. and Degrande, G. "Numerical modeling of free field vibrations due to pile driving using a dynamic soil-structure interaction formulation", *J. Computational and Applied Mathematics*, **215**(9), pp. 503-511 (2008).
- Mabsout, M.E., Reese, L.C. and Tassoulas, J.L. "Study of pile driving by finite-element method", *J. Geotechnical Eng.*, **121**(9), pp. 535-543 (1995).
- Madheswaran, C.K., Sundaravivelu, R., Boominathan, A. and Natarajan, K. "Response of ground during pile driving", *J. Institution of Engineers (India), Civil Engineering Division*, **86**(6), pp. 22-27 (2005).
- Pinto, P.L., Grazina, J.C. and Lourenco, J.C. "Evaluation of 1D and 2D numerical modelling techniques of dynamic pile testing", *Proc. of the 8th Int. Conf., On Application of Stress Wave Theory to Piles*, pp. 353-357 (2008).
- Madheswaran, C.K., Natarajan, K., Sundaravivelu, R. and Boominathan, A. "Effect of trenches on attenuation of ground vibration during pile driving", *Proc. in Physics, Vibration Problems ICOVP, Springer Science Proceedings*, **126**(8), pp. 231-238 (2008).
- Zhang, M. and Tao, M. "A parametric study on factors affecting ground vibrations during pile driving through finite element simulations", *J. GeoRisk., ASCE*, **224**(8), pp. 931-938 (2011).
- Khoubani, A. and Ahmadi, M.M. "Numerical study of ground vibration due to impact Pile Driving", *Proc. ICE, Geotechnical. Eng.*, **167**(1), pp. 28-39 (2012).
- PLAXIS 2D, *Finite Element Code for Soil and Rock Analysis*, BV Plaxis -AA Balkema, User's Manual, Version 8.0, Delft (2002).
- Madheswaran, C.K. and Thandavamoorthy, T.S. "Filed investigations on ground and structural vibrations during prototype pile driving", *Proc., 5th. Int. Con. on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York, Paper No. 4. 24. (CD format) (2004).
- Bull, J.W., *Numerical Analysis and Modelling in Geomechanics*, Computational Modelling of Ground Waves Due to Pile Driving, Spon Press, London, pp. 129-164 (2003).
- Attewell, P.B. and Farmer, I.W. "Attenuation of ground vibrations from pile driving", *Ground Engineering*, **3**(7), pp. 26-29 (1973).
- Wiss, J.F. "Construction vibrations: State of the art", *American Society of Civil Engineering, Journal of Geotechnical Engineering*, **107**(GT2), pp. 167-181 (1981).
- Swedish Standard "Vibration and shock- Guidance levels and measuring of vibrations in buildings originating from piling, sheet piling, excavating and packing to estimate permitted vibration levels", (In Swedish). SS 02 52 11, Swedish Institute for Standards, SIS. Stockholm 1999, 7 p. (1999).
- Goble, G.G., Rausche, F. and Lihs, G.E. "The analysis of pile driving- a state-of-the- art", *Int. Seminm. on Appl. Stress- Wave Theory on Piles*, Stockholm, pp. 131-161 (1980).
- Jimeno, E.L., Jimino, C.L. and Carcedo, A., *Drilling and Blasting of Rocks*, Taylor & Francis, Rev Upd Su edition (1995).
- Tsang, H.H., Chandler, A.M. and Lam, N.T.K. "Simple models for estimation period-shift and damping in soil", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **35**(15), pp. 1925-1947 (2006).
- Amorosi, A., Boldini, D. and Elia, G. "Parametric study on seismic ground response by finite element modelling", *J. Computers and Geotechnics*, **37**(4), pp. 515-528 (2010).