

مدل سازی عددی ارتعاشات زمین در عملیات تراکم دینامیکی بر خاک‌های ماسه‌ای خشک

مجید پورجنابی^۱ و امیر حمیدی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: تراکم دینامیکی، مدل سازی عددی، ABAQUS، سرعت ذرات، ترانشه حائل.</p>	<p>تراکم دینامیکی روشی مفید برای بهسازی به‌ویژه در خاک‌های دانه‌ای است. در این روش، وزنه سنگین از ارتفاع مشخص سقوط کرده و باعث متراکم شدن خاک می‌گردد. عامل موثر در تراکم خاک انتشار امواج کالبدی و برشی است که موجب تغییر مکان ذرات و افزایش تراکم می‌شود. این پدیده، در صورت مجاورت سازه‌ها می‌تواند موجب بروز ترک و شکست در پی و گسیختگی احتمالی گردد. بدین منظور رعایت حداقل فاصله ایمن از سازه‌های مجاور جهت اجرای عملیات تراکم دینامیکی ضروری است. در تحقیق حاضر از مدل سازی عددی تراکم دینامیکی خاک‌های ماسه‌ای خشک توسط نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل سازی عددی از جمله تغییرات سرعت حداکثر ذرات با فاصله از مرکز کوبش با مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده در سایت مقایسه شده است. همچنین اثرات حفر ترانشه جهت ایزوله نمودن امواج ایجاد شده در پدیده تراکم دینامیکی بر دامنه تغییرات سرعت ذرات در فواصل مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در محدوده پارامترهای مورد مطالعه، حفر این ترانشه‌ها تاثیر عمده‌ای بر روند کاهش دامنه سرعت ذرات نخواهد گذاشت.</p>

۱- مقدمه

عوامل گوناگونی در بهسازی خاک به این روش دخیل هستند، از این جمله می‌توان به وزن و ارتفاع سقوط کوبه، نوع خاک، فواصل کوبش و سطح آب زیرزمینی اشاره نمود.

بعضی از محققین از روش المان محدود برای مدل سازی عددی پدیده تراکم دینامیکی در خاک‌های ماسه‌ای استفاده نموده‌اند [۱-۶]. تعدادی دیگر از محققین نیز به بررسی صحرایی عملیات تراکم دینامیکی و نتایج حاصل از آن پرداخته‌اند [۶-۱۵]. مرور متون فنی نشان می‌دهد که استفاده از مدل سازی فیزیکی برای عملیات تراکم

تراکم دینامیکی روشی مناسب برای بهسازی خاک‌های دانه‌ای است که در سال ۱۹۷۵ توسط منارد معرفی شد. اساس این روش بر سقوط وزنه سنگین ۵ تا ۴۰ تن از ارتفاع ۱۵ تا ۳۰ متر بروی سطح خاک سست است که تراکم و مقاومت برشی خاک را به حد مطلوب و مورد نیاز می‌رساند.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hamidi@khu.ac.ir

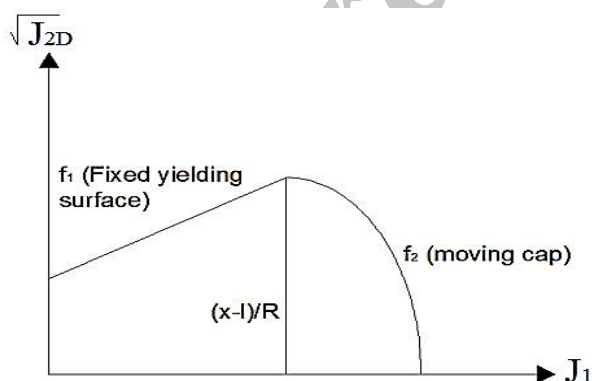
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

۲. دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران

مقایسه‌ای بین نتایج نرم‌افزار و اندازه‌گیری‌های فیزیکی گزارش شده در مقاله هوانگ و تو [۱۰] انجام گرفته است. وود [۲۴] و وود و همکاران [۲۵] راهکار استفاده از ترانسه‌های حائل را جهت کاهش دامنه سرعت ذرات خاک در پروسه ایزولاسیون فعال و غیرفعال پی ماشین‌آلات پیشنهاد و تاثیر آن‌ها در عدم آسیب به سازه‌های مجاور را مورد بررسی قرار داد. بدین ترتیب در تحقیق حاضر نیز راهکار فوق و تاثیر آن بر کاهش دامنه سرعت ذرات در پروسه عملیات تراکم دینامیکی به صورت عددی مدل‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل رفتاری

مدل رفتاری استفاده شده در مدل‌سازی عددی تراکم دینامیکی، مدل کلاهک‌دار^۱ است. این مدل دارای دو ضابطه متفاوت برای نشان دادن سطح تسلیم می‌باشد. براساس شکل ۱، ضابطه اول یک رابطه خطی براساس معیار گسیختگی دراکر-پراگر^۲ طبق فرمول (۱) و ضابطه دوم، کلاهک^۳ تعریف شده براساس رابطه (۲) به منظور بیان امکان تسلیم تحت تنش موثر ایزوتروپ می‌باشد.



شکل ۱- سطح تسلیم مدل کلاهک دار

^۱Cap Plasticity model

^۲Drucker-Prager

^۳Cap

دینامیکی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶]. به علاوه از روابط تحلیلی و مدل‌سازی فرضی توسط سیستم جرم و فنر نیز برای بررسی پارامترهای متفاوت این روش استفاده و روابطی ارائه شده است [۱۷-۲۰].

یکی از عوامل محدودکننده در اجرای عملیات تراکم دینامیکی، سرعت به وجود آمده در ذرات خاک می‌باشد. در صورتی که سرعت ذرات خاک برای سازه‌های مجاور از آستانه خاصی بیشتر شود باعث آسیب و یا کاهش کارایی می‌گردد. وزارت معادن آمریکا با در نظر گرفتن فرکانس ارتعاشات ایجاد شده، متناسب با نوع ساختمان معیاری را جهت تعیین سرعت مجاز تعیین نموده است [۲۱]. در تحقیقی دیگر، معیار سرعت مجاز در تراز پی ساختمان‌ها با در نظر گرفتن میزان حساسیت و درجه خسارات نیز ارائه شده است [۲۲]. همچنین لوکاس حداکثر سرعت مجاز ذرات در سایت‌های مجاور را ۷/۶ سانتی‌متر بر ثانیه اعلام نموده است که معیاری مناسب برای پروژه‌های صنعتی می‌باشد [۲۳].

هوانگ و تو [۱۰] با قراردادن سنسورهای ثبت سرعت در فواصل متفاوت از مرکز کوبش، سرعت ایجاد شده در زمین در اثر برخورد وزنه با خاک را برای سایتی صنعتی در تایوان که برای بهسازی خاک آن از روش تراکم دینامیکی استفاده می‌شد، ثبت نمودند. باتوجه به آن که معیار ارائه شده توسط لوکاس [۲۳] نیز جهت کاربرد در مناطق صنعتی توصیه شده است، در این تحقیق از معیار مذکور جهت ارزیابی سرعت مجاز ذرات حین عملیات تراکم دینامیکی استفاده شده است. عملیات تراکم دینامیکی در خاک‌های ماسه‌ای خشک، با استفاده از روش المان محدود توسط نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی گردیده است. تغییرات سرعت ذرات با فاصله از مرکز کوبش بررسی شده و تأکید عمده بر ملاحظات سرعت مجاز جهت جلوگیری از بروز خسارت در سازه‌های مجاور بوده است. جهت ارزیابی نتایج مدل‌سازی عددی،

پارامترهای جدول ۳ از صحت‌سنجی نتایج بر مبنای سرعت حداکثر تعیین شده است [۲۶].

$$f_1 = \sqrt{J_{2D}} - \alpha j_1 - \kappa = 0 \quad (1)$$

$$f_2 = (J_1 - 1)^2 + R^2 J_{2D} - (X - l)^2 = 0 \quad (2)$$

$$l = \frac{X - R \cdot \kappa}{1 + \alpha \cdot R} \quad (3)$$

جدول ۱- پارامترهای فیزیکی خاک

پارامتر	مقدار
زاویه اصطکاک داخلی	۲۸ درجه
چسبندگی	۰/۹۸ کیلوپاسکال
دانسیته خاک	۱۵/۷۹ کیلونیوتن بر مترمکعب
ضریب الاستیسیته	۱۰/۷۹ مگاپاسکال
نسبت پواسون	۰/۳
ضرایب میرایی η_1 و η_2	۰ و ۰/۰۱

در این روابط α و κ ثوابت پوش گسیختگی دراگر-پراگر هستند. X پارامتر سخت‌شوندگی، R ثابت ماده و l مقدار نامتغیر اول تنش (J_1) در محل برخورد دو سطح است. J_{2D} نیز نامتغیر دوم تانسور تنش انحرافی می‌باشد.

در مرحله سخت‌شوندگی کلاهدک مدل در هر مرحله از ازدیاد تنش، مطابق رابطه ذیل گسترش می‌یابد.

$$X = -\frac{1}{D} \ln \left(1 - \frac{\epsilon_v^p}{W} \right) + X_0 \quad (4)$$

در این رابطه D و W پارامترهای ماده و X_0 تنش اولیه ناشی از تحلیل گرانشی است. مدل مذکور در نرم‌افزار ABAQUS تعریف شده است.

جدول ۲- پارامترهای کوبه

پارامتر	مقدار
وزن	۲۵ تن
ارتفاع سقوط	۲۰ متر
سطح مقطع کوبه	۴/۵ مترمربع
تعداد ضربات	یک عدد در هر نقطه

جدول ۳- پارامترهای سخت‌شوندگی

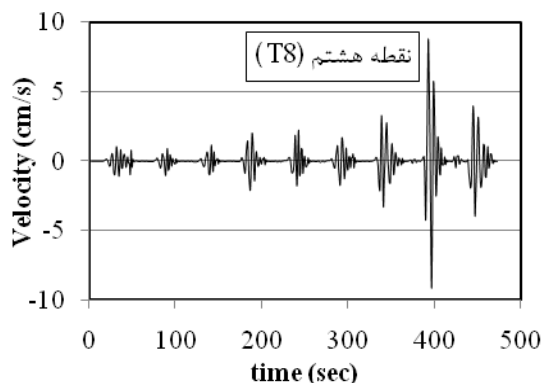
پارامتر	مقدار
R	۱/۱۴۸
W	۰/۵
D	5×10^{-7} (m/N)

۳-مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی سه‌بعدی عملیات تراکم دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. المان‌های هشت‌گره‌ای جهت پاره‌سازی محدوده مورد بررسی انتخاب شده است. ابعاد محدوده مدل‌سازی براساس آنالیز حساسیت به‌منظور تضمین عدم بازگشت امواج انتخاب گردیده است [۲۶]. شرایط تکیه‌گاهی در مرزهای جانبی به‌صورت مفصلی و در کف تکیه‌گاه گیردار تعریف شده‌اند. شکل ۲ نمایی از مدل و الگوی تراکم را نشان می‌دهد. کوبش با استفاده از وزنه ۲۵ تنی و ارتفاع سقوط ۲۰ متر انجام شده است (هوانگ و تو [۱۰]). تعداد ضربات در هر نقطه یک عدد می‌باشد. مشخصات خاک و کوبه و پارامترهای مدل کلاهدک‌دار در نظر گرفته شده در مدل‌سازی عددی به‌ترتیب براساس جداول ۱، ۲ و ۳ می‌باشد. پارامترهای جداول ۱ و ۲ از مطالعات هوانگ و تو [۱۰] و

شکل ۲ نمای سه‌بعدی مدل تعریف شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. تحلیل اولیه با آنالیز ثقلی صورت گرفته و پس از آن براساس الگوی نشان داده شده در شکل ۳ اعمال می‌گردد. مقادیر سرعت کوبش در فواصل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۶۵ متری از نقاط کوبش سرعت ثبت شده توسط هوانگ و تو [۱۰] مقایسه می‌گردد. میرایی اغلب در محدوده‌ی ۲ تا ۵ درصد میرایی بحرانی قرار می‌گیرد. در این تحقیق میرایی ۵ درصد میرایی بحرانی و فرکانس ۱۰ هرتز فرض شده است.

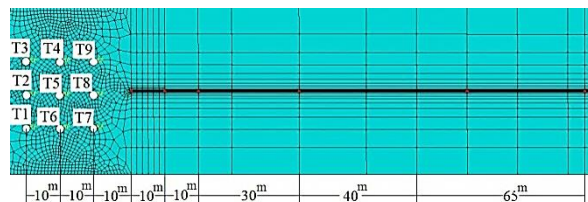
مدل‌سازی ایزوتروپ فرض شده است، بیشینه سرعت، در نزدیک‌ترین فاصله از مرکز کوبش یعنی ضربه هشتم مشاهده می‌شود.



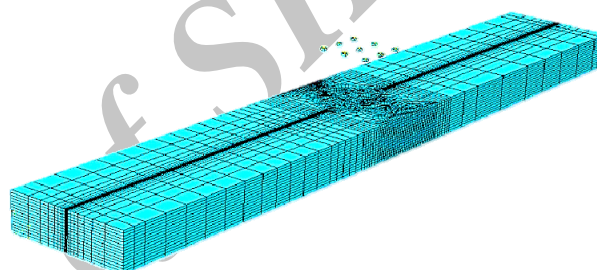
شکل ۴- تغییرات سرعت با زمان در اثر کوبش‌های متعدد در فاصله ۱۰ متری از آخرین نقطه کوبش

شکل ۵ مقایسه سرعت ثبت شده در سایت و سرعت به‌دست آمده از آنالیز عددی در فاصله ۱۰ متری از نقطه کوبش را ارائه می‌نماید. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار سرعت بیشینه عمودی ثبت شده در سایت با مقدار به‌دست آمده از نرم‌افزار، مطابقت قابل‌قبولی دارد. تغییرات سرعت در سایت در مدت حدود ۱ ثانیه رخ داده و از بین رفته است درحالی‌که این زمان در آنالیز عددی در حدود ۳ ثانیه به‌دست آمده است. این اختلاف را می‌توان به غیرایزوتروپ بودن رفتار واقعی خاک در سایت نسبت به مدل‌سازی عددی آن ارتباط داد. در جهت شعاعی نیز مقدار سرعت مثبت حداکثر به‌خوبی مدل شده است درحالی‌که حداکثر منفی در آنالیز عددی مقدار بیشتری به‌دست آمده است. سرعت در راستای عمودی و شعاعی به‌میزان قابل توجهی بزرگتر از سرعت در راستای مماسی است. همچنین مقدار بیشینه سرعت در سایت و مدل‌سازی عددی، در جهت عمودی ثبت شده است. باتوجه به این‌که در نرم‌افزار، خاک به‌صورت مصالحی ایزوتروپ مدل شده است، مقادیر بیشینه مثبت و منفی

کوبش با انتقال کوبه به ارتفاع ۲۰ متری و سقوط آن با شتاب ثقل ($g=9.81\text{m/s}^2$) مدل‌سازی شد. در رویه کوبه که با خاک برخورد می‌نماید، در نرم‌افزار المان حدواصل^۱ با ضریب اصطکاک ۰/۵ تعریف شده است.



شکل ۲- نمای سه‌بعدی مدل در نرم‌افزار ABAQUS



شکل ۳- پلان نقاط کوبش و فواصل ثبت سرعت

۴- نتایج آنالیز عددی

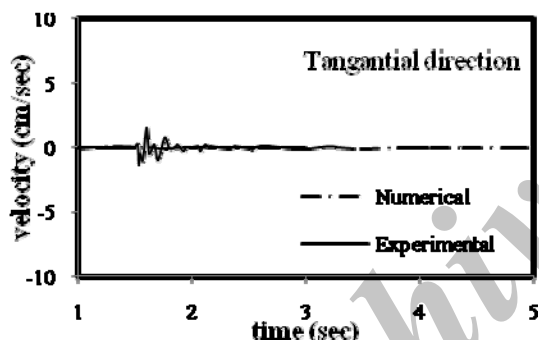
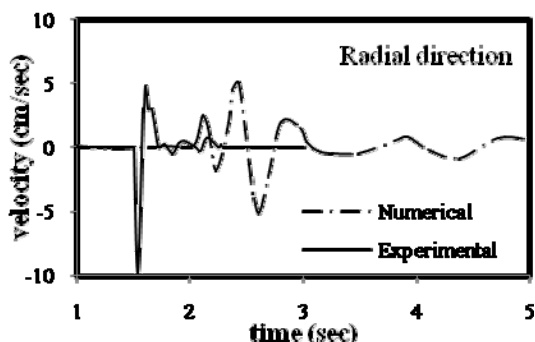
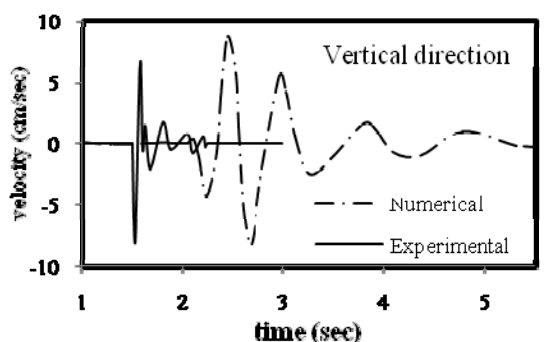
براساس مقادیر ارائه شده توسط هوانگ و تو [۱۰]، سرعت ذرات در سه جهت مماسی^۲ (عمود بر راستای سنسورها)، شعاعی^۳ (در راستای سنسورها) و عمودی^۴ (در راستای Z) ثبت شده است. شکل ۴ سرعت حاصله از مدل‌سازی عددی در فاصله ۱۰ متری از مرکز کوبه را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل می‌توان دریافت که به‌علت فاصله زمانی بین ضربات، سرعت به‌وجود آمده در هر ضربه، جدا از سایر ضربات است. همچنین به‌دلیل این‌که رفتار خاک در

^۱Interface element

^۲Tangential

^۳Radial

^۴Vertical



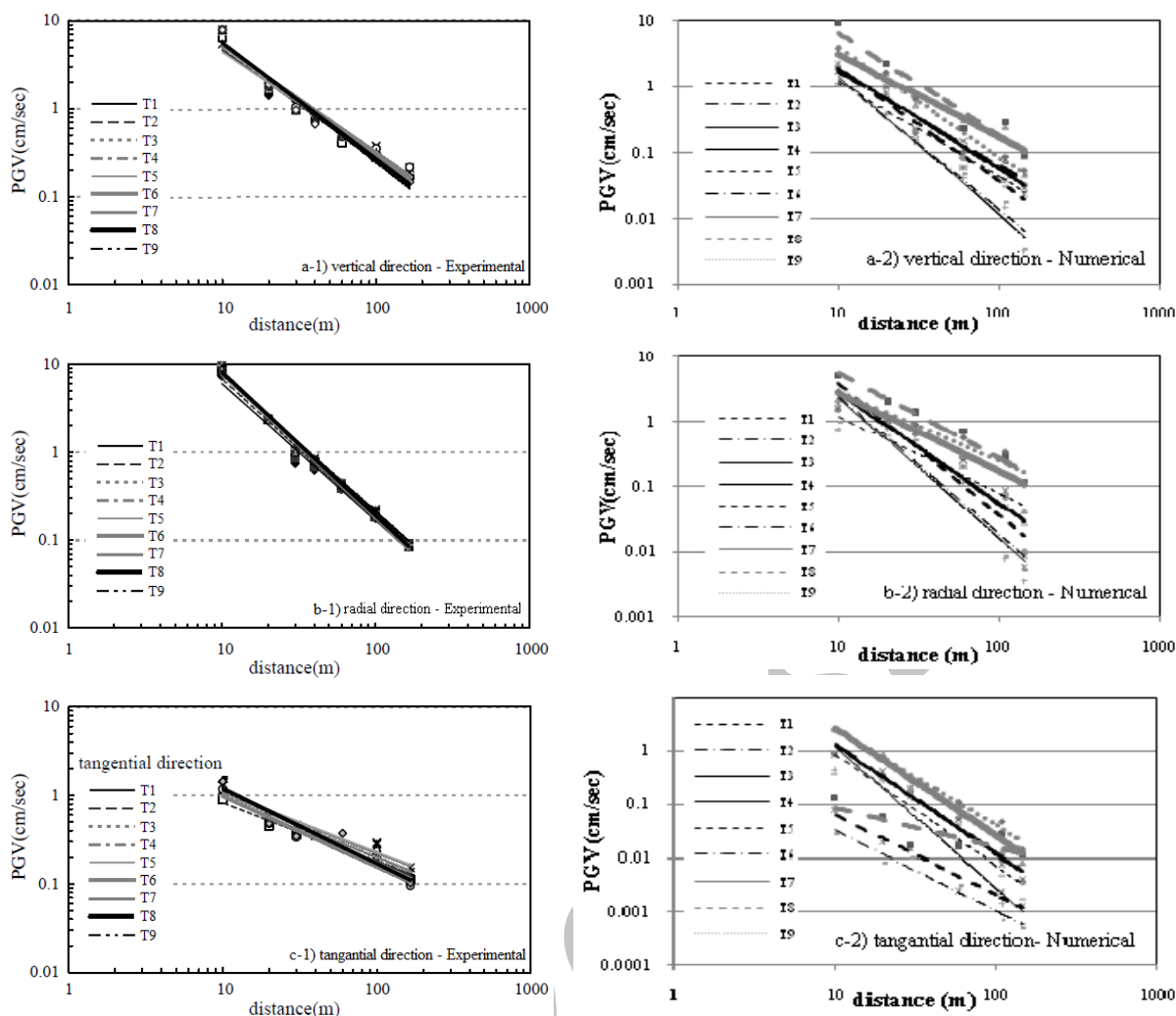
شکل ۵- مقایسه بین سرعت سه جهت در فاصله ۱۰ متری از نقاط کوبش برای کوبش واقعی (هوانگ و تو [۱۰]) و مدل‌سازی عددی در تحقیق حاضر

بررسی نتایج به دست آمده از ابزارگذاری در سایت و مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که بیشینه سرعت ذره که در این سایت رخ داده است نزدیک به ۸ سانتی‌متر بر ثانیه بوده و کمی از حد مجاز آیین‌نامه FHWA یعنی ۷/۶ سانتی‌متر بر ثانیه بیشتر است. لذا امکان استفاده از ترانشه حائل نیز برای ایزولاسیون فعال و غیرفعال عملیات تراکم دینامیکی و جلوگیری از آسیب به سازه‌های مجاور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

سرعت در جهت عمودی ثبت می‌شود درحالی‌که در مدل صحرایی که در آن رفتار واقعی خاک به‌عنوان مصالحی غیرایزوتروپ لحاظ می‌گردد، بیشینه سرعت مثبت در جهت عمودی و بیشینه سرعت منفی در جهت شعاعی ثبت شده است.

شکل ۶ تغییرات بیشینه سرعت ذرات خاک^۱ (PGV) نسبت به فاصله از نقطه کوبش را براساس مقادیر اندازه‌گیری شده در سایت و مدل‌سازی عددی در سه جهت عمودی، شعاعی و مماسی برای ۸ ضربه کوبش در نقاط متفاوت نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶-a تغییرات سرعت در راستای عمودی در سایت در محدوده ۰/۱ تا ۱۰ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. در مدل‌سازی عددی در ضربات نزدیک به محل ثبت سرعت، تغییرات PGV با فاصله با شیبی مشابه سایت کاهش می‌یابد اما با دور شدن نقاط ضربه، شیب خط برازش داده شده به نتایج مدل‌سازی عددی بیشتر می‌شود. این درحالی است که درخصوص داده‌های اندازه‌گیری شده در سایت، شیب تمامی خطوط تقریباً یکسان است. در راستای شعاعی تغییرات سرعت در محدوده ۰/۱ تا ۱۰ متر بر ثانیه است اما مطابق شکل ۶-b مدل‌سازی عددی، کمینه مقدار PGV در حدود ۰/۰۱ متر بر ثانیه است. این موضوع نشان می‌دهد که در کران بالای سرعت، مدل‌سازی عددی به‌خوبی عمل می‌کند درحالی‌که در کران پایین سرعت، مدل عددی سرعت را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. در نهایت مطابق شکل ۶-c کاهش PGV در راستای مماسی با ازدیاد فاصله مشابه کوبش واقعی، نامنظمی در نرخ کوبش در هر ضربه را نشان می‌دهد. تفاوت بین نتایج سایت و مدل‌سازی عددی برای مولفه مماسی سرعت در این است که روند تغییرات آن در کوبش واقعی با شیب کمتری نسبت به مدل‌سازی عددی رخ می‌دهد.

¹Peak ground velocity



شکل ۶- کاهش PGV نسبت به فاصله در کوبش واقعی (هوانگ و تو [۱۰]) و مدل‌سازی عددی برای (a) جهت عمودی (b) جهت شعاعی (c) جهت مماسی

۵- مدل‌سازی ترانشه حائل

تحلیل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده در سایت مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل ۷ هندسه آرایش‌های مختلف ترانشه‌های حائل را نشان می‌دهد.

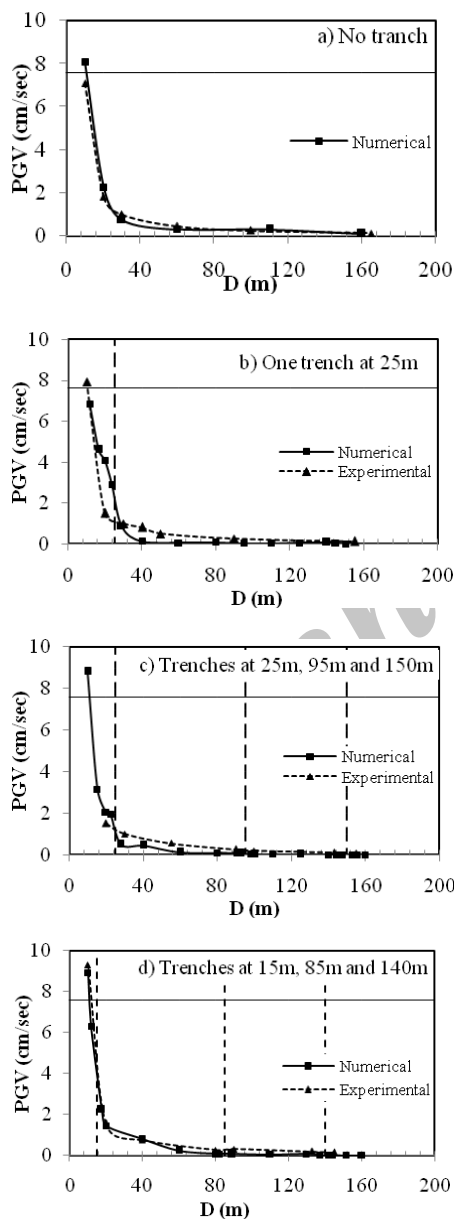
فواصل در نظر گرفته شده برای ترانشه‌ها از قرار زیر است:

- ۱- یک ترانشه در فاصله ۲۵ متری از نقاط کوبش
- ۲- سه ترانشه در فواصل ۲۵، ۹۵ و ۱۵۰ متری از نقاط کوبش
- ۳- سه ترانشه در فواصل ۱۵، ۸۵ و ۱۴۰ متری از نقاط کوبش

تمامی این ترانشه‌ها به عمق ۳ متر و با عرض ۱ متر حفر شده‌اند. همچنین طول نزدیک‌ترین ترانشه به نقاط کوبش

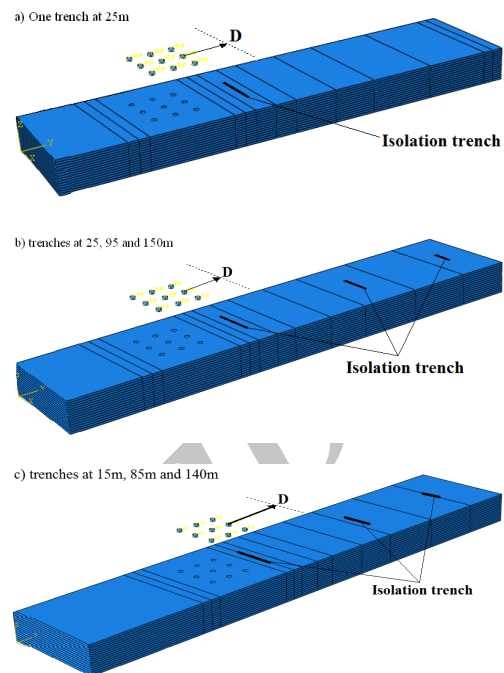
همان‌گونه که در قسمت پیش مطرح شد، در این سایت به‌علت تجاوز سرعت ذرات از حد مجاز آیین‌نامه نیاز انجام ایزولاسیون در محدوده عملیات تراکم دینامیکی می‌باشد. باتوجه به پیشنهاد وود [۲۴] و وود و همکاران [۲۵] درخصوص استفاده از ترانشه‌های حائل در ایزولاسیون پی ماشین‌آلات تحت اثر بارهای دینامیکی، هوانگ و تو [۱۰] نیز سه آرایش متفاوت از ترانشه حائل را در سایت موردنظر قرار داده و تاثیر آن‌ها بر کاهش دامنه سرعت ذرات خاک را اندازه‌گیری نمودند. در مقاله حاضر نیز، سه آرایش مذکور در مدل عددی در نظر گرفته شده و نتایج

چشم‌گیری سرعت ذرات را کاهش نمی‌دهند. این موضوع در تطابق کامل با نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط هوانگ و تو [۱۰] در سایت مذکور دارد. بنابراین حفاری ترانشه حائل برای ایزولاسیون عملیات تراکم دینامیکی در این سایت مناسب نیست و باید از سایر روش‌ها از جمله کم کردن انرژی کوبش با کاهش وزن و ارتفاع سقوط کوبه، افزایش فاصله سازه‌ها با محدوده عملیات تراکم دینامیکی و یا استفاده از سایر روش‌های بهسازی خاک استفاده نمود.



شکل ۸- کاهش میانگین سرعت حداکثر ذرات (PGV) با فاصله از مرکز کوبش
داده‌های کوبش واقعی براساس هوانگ و تو [۱۰]

۲۰ متر، طول ترانشه میانی ۱۵ متر و طول دورترین ترانشه ۱۰ متر می‌باشد.



شکل ۷- هندسه آرایش‌های متفاوت ترانشه‌های حائل

در شکل ۸-a مقایسه‌ای بین روند کاهش میانگین سرعت حداکثر ذرات (PGV) نسبت به فاصله از مرکز کوبش در حالتی که در سایت هیچ‌گونه ترانشه‌ای وجود ندارد را نشان می‌دهد. تطابق قابل قبولی بین نتایج کوبش واقعی و مدل‌سازی عددی مشاهده می‌شود. در این شکل بیشینه سرعت مجاز آیین‌نامه نیز با یک خط مشخص شده است. شکل ۸-b مقایسه کاهش PGV با فاصله از مرکز کوبش در حالتی که یک ترانشه در فاصله ۲۵ متری حفاری شده است را نمایش می‌دهد. در این شکل محل ترانشه نیز با خط‌چین نمایش داده شده است. شکل ۸-c همان مقایسه را در حالتی که سه ترانشه در فواصل ۲۵، ۹۵ و ۱۵۰ متری از مرکز نقاط کوبش حفاری شده را نشان‌دهنده و شکل ۸-d نتایج را برای مدلی از حفاری ترانشه در فواصل ۱۵، ۸۵ و ۱۴۰ متری از مرکز نقاط کوبش ارائه می‌کند. باتوجه به تمامی شکل‌ها، هم‌پوشانی قابل قبول بین نتایج اندازه‌گیری شده در سایت برای کوبش واقعی و مدل‌سازی عددی مشاهده می‌گردد. اما هیچکدام از ترانشه‌ها به‌طور

۶- نتیجه‌گیری

راستای شعاعی است و سرعت در این دو راستا به

مراتب بیشتر از سرعت در راستای مماسی می‌باشند.

۳- در سایت مورد مطالعه، به علت آن‌که سرعت بیشینه

از حد مجاز بیشتر شده است می‌توان از سیستم

حفاری ترانشه حائل بهره گرفت اما در سایت

موردنظر، ترانشه‌های حفر شده در روند کاهش سرعت

تغییر چشم‌گیری نداشته‌اند. لذا برای کم کردن دامنه

سرعت ذرات باید از روش‌هایی مانند کاهش وزن و

ارتفاع سقوط کوبه و یا دیگر روش‌های بهسازی خاک

استفاده نمود.

۴- باتوجه به تطابق قابل قبول سرعت بیشینه محاسبه

شده از تحلیل عددی و نتایج ابزارگذاری صحرائی،

برای یافتن فاصله ایمن به‌عنوان مرز مجاز عملیات

تراکم می‌توان از مدل‌سازی عددی بهره گرفت.

در این تحقیق، مدل‌سازی عددی عملیات تراکم دینامیکی

بر روی خاک ماسه‌ای خشک انجام گرفته و تغییرات

سرعت حداکثر ذرات در مدل‌سازی عددی با مقادیر واقعی

اندازه‌گیری شده در سایت در حالات بدون وجود ترانشه و

یا با استفاده از آرایش‌های متفاوت ترانشه‌های حائل

مقایسه شده و نتایج زیر حاصل گردیده است.

۱- به‌علت گام زمانی زیاد بین دو ضربه متوالی در تراکم

دینامیکی، سرعت ذرات در نقاط متفاوت خاک در هر

ضربه مستقل از ضربات پیش است و باتوجه به فرض

رفتار ایزوتروپ برای خاک، بیشترین سرعت ذرات در

نزدیکترین نقطه کوبش از نظر مکانی ثبت می‌شود.

۲- سرعت ذرات خاک در راستای عمودی بیشتر از

مراجع

- [1] Ghassemi, A., Pak, A., Shahir, H. (2010). "Numerical study of the coupled hydro-mechanical effects in dynamic compaction of saturated granular soils". *Computers and Geotechnics*, Vol. 37, pp. 10-24.
- [2] Jahangiri, Gh., Pak, A., Ghassemi, A. (2010). "A novel numerical method for determination of print spacing in dynamic compaction operation of dry sand". *Proceedings of the 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics*, Tehran, Paper No. 274.
- [3] Jia, M., Zhou, J. (2010). "Investigation of mechanical response induced in dynamic compaction of sandy soils with PFC2D". *Proceedings of the GeoShanghai 2010 International Conference*, pp. 261-268.
- [4] Pan, J.L., Selby, A.R. (2002). "Simulation of dynamic compaction of loose granular soils". *Advances in Engineering Software*, Vol. 33, pp. 631-640.
- [5] Li, W., Gu, Q., Su, L., Yang, B. (2011). "Finite element analysis of dynamic compaction in soft foundation". *Procedia Engineering*, Vol. 12, pp. 224-228.
- [6] Minaev, O.P. (2002). "Effective method for dynamic compaction of slightly choesivesaturatedsoils". *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 39, No. 6, pp. 208-213.
- [7] Arslan, H., Baykal, G., Ertas, O. (2007). "Influence of tamper weight shape on dynamic compaction". *Ground Improvement*, Vol. 11, No. 2, pp. 61-66.
- [8] Feng, S.J., Shui, W.H., Gao, W.H., He, L.J., Tan, K. (2010). "Field evaluation of dynamic compaction on granular deposits". *Performance of Constructed Facilities*, Vol. 25, No. 3, pp. 241-249.
- [9] Hua, L.J., Bo, Y.J., Hu, X., Wei, C. (2006). "Dynamic compaction treatment technology research of red clay soil embankment in southern mountains". *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 15, pp. 050-057.
- [10] Hwang, J.H., Tu, T.Y. (2006). "Ground vibration due to dynamic compaction". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 26, pp. 337-346.
- [11] Kopf, F., Paulmich, I., Adam, D. (2010). "Modelling and simulation of heavy tamping dynamic response of the ground". *From Research to Design in European Practice*, Bratislava, Slovak Republic.

- [12] Mayne, P.W., Jones, J.S. (1983). "Impact stresses during dynamic compaction". *Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 10, pp. 1342-1346.
- [13] Mayne, P.W., Jones, J.S., Dumas, J.C. (1984). "Ground response to dynamic compaction". *Geotechnical Engineering*, Vol. 110, No. 6, pp. 757-774.
- [14] Rollins, K.M., Kim, J. (2010). "Dynamic compaction of collapsible soils based on U.S. case histories". *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 9, pp.1178-1186.
- [15] Zou, W.L., Wang, Z., Yao, Z.F. (2005). "Effect of dynamic compaction on placement of high-road embankment". *Performance of Constructed Facilities*, Vol. 19, No. 4, pp. 316-323.
- [16] Jafarzadeh, F. (2006). "Dynamic compaction method in physical model test" *ScientiaIranica*, Vol. 13, No. 2, pp. 187-192.
- [17] Chow, Y.K., Yong, D.M., Yong, K.Y., Lee S.L. (1990). "Monitoring of dynamic compaction by deceleration measurements". *Computers and Geotechnics*, Vol. 10, No. 3, pp. 189-209.
- [18] Chow, Y.K., Yong, D.M., Yong, K.Y., Lee S.L. (1992). "Dynamic compaction analysis". *Geotechnical Engineering*, Vol. 118, No. 8, pp. 1141-1157.
- [19] Chow, Y.K., Yong, D.M., Yong, K.Y., Lee S.L. (1994). "Dynamic compaction of loose granular soils: effect of print spacing". *Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 7, pp. 1115-1133.
- [20] Roesset, J.M., Kausel, E., Cuellar, V., Monte, J.L., Valerio, J. (1994). "Impact of weight falling onto the ground". *Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 8, pp. 1394-1412.
- [21] Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W., Dowding, C.H. (1980). "Structural response and damage produced by ground vibration from surface blasting". Report of Investigations 8507, U.S. Bureau of Mines, Washington, D.C.
- [22] Slocombe, B.C. (1993). "Dynamic compaction". Chapter 2 of *Ground Improvement*, CRC Press Inc., Boca Raton, FL., pp. 21-39.
- [23] Lukas, R.G. (1995). "Geotechnical engineering circular No. 1- Dynamic compaction". FHWA-SA-95-037.
- [24] Woods, R.D. (1968). "Screening of surface waves in soils". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 94, No. SM4, pp. 951-979.
- [25] Woods, R.D., Barnett, N.E., Sagesser, R. (1974). "Holography- A new tool for soil dynamics". *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 100, No. GT11, pp. 1231-1247.
- [26] Pourjenabi, M. (2013). "Numerical modeling of dynamic compaction in dry sands considering minimum distance from adjacent structures". M.Sc. Thesis, Kharazmi University, Tehran, Iran.