مدل‌سازی عددی ارتعاشات زمین ناشی از عملیات شمع‌کوبی ضربه‌ای با استفاده از روش المان محدود

آبتین فرشی همایون روز، امیر حمیدی*، مجید پورجنابی؛
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

تاریخ: دریافت ۹۲/۲/۳ پذیرش ۹۴/۱/۱۸

چکیده

کوبش متوالی چکش شمع‌کوب بر سر شمع پیش ساخته برای نصب شمع در زمین را شمع‌کوبی ضربه‌ای می‌نامند. امروزه کاربرد وسیع روش شمع‌کوبی ضربه‌ای در اجرای پی‌های عمیق (شمع‌ها) غیرقابل انکار است؛ به‌طوری‌که در میان منابع تولید کننده ارتعاشات در زمین، شمع‌کوبی متداول‌ترین منبع تولیدکننده ارتعاشات ساخت‌وساز است. این ارتعاشات زمین در حین شمع‌کوبی مهم‌ترین عامل محدودکننده به‌کارگیری این روش است، از این رو، برای جلوگیری از خرابی سازه‌ای و حفظ آرامش ساکنین پیش‌بینی قابل قبول از دامنهٔ ارتعاشات پیش از اجرای هر پروژه ضروری است. برای این منظور، بی‌تردید مدل‌سازی عددی سریع‌ترین، دقیق‌ترین و اقتصادی‌ترین گزینه است، اما تا به امروز مدل‌سازی روند صحیح نصب شمع یکی از مشکلات اصلی در مدل‌سازی عددی شمع‌کوبی بوده است. پژوهش حاضر تلاش دارد که با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی عددی عملیات شمع‌کوبی ضربه‌ای به‌طور موفقیت‌آمیز از سطح زمین تا عمق دلخواه بدون در نظرگیری فرضیات ساده‌کننده متداول محققان گذشته و با در نظرگیری جزئیات مشابه کارهای عملی، تطابق بهتر ارتعاشات نسبت به نتایج عددی گذشته با نتایج صحرایی بر حسب حداکثر سرعت ذره (PPV) نتیجه گردد.

واژه‌های کلیدی: شمع‌کوبی ضربه‌ای، ارتعاشات زمین، ABAQUS ، مدل‌سازی عددی، حداکثر سرعت ذره

* **نویسنده مسئول** amhamidi@gmail.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

مقدمه

استفاده از روش شمع‌کوبی برای اجرای پی‌های عمیق (شمع‌ها) به‌دلیل مزایای تأمل برانگیز آن نسبت به‌روش‌های دیگر بسیار متداول است [۱]، از طرفی، منابع اصلی تولیدکنندهٔ ارتعاشات در زمین شامل: انفجار، شمع‌کوبی، تراکم دینامیکی، گودبرداری و تخریب است که از میان این منابع، شمع‌کوبی ضربه‌ای که در آن شمع پیش ساخته است و با اعمال نیرو به شکل ضربه در خاک فرو می‌رود متداول‌ترین منبع تولیدکنندهٔ ارتعاشات ساخت‌وساز است [۲]. ارتعاشات زمین در حین عملیات شمع‌کوبی غیرقابل اجتناب است و از آن‌جا که امروزه کارهای ساخت‌وساز اغلب در مناطق شهری است و نگرانی‌های جامعه از اثرات زیست‌محیطی نیز افزایش یافته، از این رو، نیاز مبرم به پیش‌بینی ارتعاشات پیش از اجرای عملیات را آشکار می‌سازد. برای این منظور استفاده از مدل‌سازی عددی سبب کاهش هزینه و زمان به‌میزان قابل توجه شده و جواب دقیق‌تری نیز در پی خواهد داشت. یکی از مشکلات عمده در مدل‌سازی عددی شمع‌کوبی، مدل‌سازی صحیح روند نصب شمع است. در گذشته تقریباً در تمام موارد شمع در سوراخی از پیش حفاری شده در خاک قرار گرفته و تنها جابه‌جایی کوچکی اعمال شده است. نقطه ضعف آشکار این روش آن است که اثر تنش که به‌واسطهٔ نصب شمع تغییر می‌کند واضح نیست و با واقعیت مطابقت چندانی ندارد، زیرا که عملیات نفوذ شمع در خاک از سطح زمین انجام نشده است. اخیراً تعداد معدودی مدل‌سازی عددی شمع‌کوبی به‌طور پیوسته از سطح زمین یا از عمق مشخصی از خاک انجام گرفته است که سبب بهبود نتایج عددی برای تخمین ارتعاشات زمین شده است اما در نظرگیری فرضیات ساده‌کننده در آن‌ها سبب تطابق نداشتن قابل قبول با کارهای عملی شده است.

پژوهش‌ها در زمینه شمع‌کوبی و ارتعاشات حاصل از آن عمدتاً از سال ۱۹۶۰ میلادی آغاز شد. بسیاری از پژوهش‌گران معرفی روش «تحلیل یک بعدی معادله موج» به‌وسیلهٔ اسمیت[1] (۱۹۶۰) را شروع تحول در دینامیک شمع می‌دانند. او در اواخر سال ۱۹۶۰ میلادی برای تحلیل فرآیند شمع‌کوبی از مدلی ساده عددی بدون نیاز به محاسبات پیچیدهٔ ریاضی استفاده کرد. او در

1. Smith

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

این تحقیق مقاومت خاک در تمام طول شمع را با تعدادی فنر و میراگر موازی با آن مدل کرد که رفتار فنرها به‌صورت الاستوپلاستیک کامل در نظر گرفته شده بود [۳].

ویس[1] در سال ۱۹٦۷، نخستین تحقیقات برای تخمین میزان حداکثر سرعت ذرات خاک (PPV[2]، حداکثر سرعتی که یک ذره در طی ساخت‌وساز تجربه می‌کند) را با استفاده از اندازه گیری‌های سرعت ذرات انجام داد. تمام این مقادیر از موارد ناشی شده از انفجار معادن به‌دست آمده بود که براساس آن رابطه‌ای تجربی بر مبنای انرژی آزاد شده در اثر انفجار ارائه شده بود [٤].

بورجا[3] (۱۹۸۸) فرآیند شمع‌کوبی را براساس تئوری یک‌بعدی موج با استفاده از روش اجزای محدود مدل کرد. او در این مقاله پیشنهاد کرد که منحنی نیروی ضربه-زمان به‌جای سرعت چکش لحاظ شود تا اندرکنش شمع- چکش در طی روند نصب شمع با واقعیت مطابقت بیش‌تری داشته باشد. او تحلیل خود را روی مثالی فرضی انجام داد و متأسفانه هیچ مورد واقعی برای مقایسه نتایج عددی با نتایج واقعی فراهم نشد [۵].

تانداوامورسی[4] (۲۰۰٤) نتایج کوبش یک شمع لوله‌ای انتها بسته در درون خاک ماسه‌ای در کشور هند را گزارش کرد. کار او از این جهت حائز اهمیت است که تغییرات سرعت و شتاب سطح زمین را برحسب عمق نفوذ شمع ثبت کرده است. او نشان داد که دامنهٔ ارتعاشات سطح زمین لزوماً زمانی که نوک شمع بر سطح زمین قرار گرفته بیشینهٔ مقدار را دارا نیست. او هم‌چنین تاریخچهٔ زمانی سرعت و شتاب سطح زمین و فرکانس حاکم بر هر یک از آن‌ها را گزارش کرد و نشان داد که فرکانس ارتعاش زمین ناشی از کوبش شمع در محدودهٔ فرکانس طبیعی ساختمان است و امکان وقوع پدیدهٔ تشدید برای ساختمان‌های مجاور وجود دارد [٦].

شنگ[5] و همکاران (۲۰۰۵) به مدل‌سازی عددی شمع‌کوبی با تکنیک مش‌بندی انطباقی لاگرانژی-اویلری اختیاری در نرم‌افزار ABAQUS پرداخت. او در تحلیل المان محدود، راندن شمع با انتهای تخت را ممکن ندانست و با بررسی زوایای مختلف نوک مخروطی شکل شمع نتیجه گرفت که درنظرگیری زاویه مخروط بیش از °۹۰ سبب بروز خطا و نفوذ نداشتن به

1. Peak Particle Velocity 2. Wiss 3. Borja 4. Thandavamoorthy 5. Sheng

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

درون خاک می‌شود و برای کم‌تر از °۶۰ نیز نیاز به گام‌های زمانی خیلی زیاد است و منجر به زمان‌بر شدن تحلیل‌ها می‌شود، از این رو، زاویهٔ نوک مخروطی شکل شمع را °۶۰ در نظر گرفت [۷].

معصومی و همکاران (۲۰۰۹) به مدل‌سازی عددی شمع‌کوبی ضربه‌ای با استفاده از روش المان مرزی-المان محدود (FE-BE)[1] وابسته غیرخطی پرداختند. آن‌ها با استفاده از نمودار نیرو-زمان اعمالی بر سر شمع حداکثر سرعت ذره نقاط واقع در سطح زمین و اعماق خاک را زمانی‌که شمع فقط در سه عمق متفاوت کاشته شده و ضربه اعمال می‌شود به‌دست آوردند و با نتایج صحرایی مقایسه کردند[۸].

فرشی همایون روز و حمیدی (۱۳۹٤) در گام اول به گردآوری روابط متداول استفاده شده تا به امروز برای تخمین ارتعاشات و سپس ارزیابی این روابط پرداختند. در گام دوم مقادیر حداکثر سرعت مجاز ذره در استانداردهای معتبر جهان را برای ارتعاشات گذرا (که از منابعی مانند شمع‌کوبی، تراکم دینامیکی، انفجار و غیره حاصل می‌شود) برای جلوگیری از *خرابی سازه* و *پاسخ انسان* (برای حفظ آسایش ساکنین) به‌طور جداگانه گردآوری کردند [۱].

در این مقاله برای درک بهتر مسئله ابتدا به معرفی مراحل عملیات شمع‌کوبی ضربه‌ای و انتقال ارتعاشات به سازه‌های مجاور پرداخته شده و سپس با مدل‌سازی عددی عملیات شمع‌کوبی ضربه‌ای شمع بتنی مدور ته بسته در خاک رس‌ماسه‌دار در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS نتایج با مقادیر صحرایی صحت‌سنجی شده و با نتایج گذشته عددی نیز مقایسه شده است. در پایان نتیجه‌گیری از مباحث مطرح شده ارائه شده است.

مراحل انتقال ارتعاشات در عملیات شمع‌کوبی ضربه‌ای

بدیهی است که کوبش شمع ارتعاشات و جابه‌جایی‌هایی در خاک ایجاد می‌کند که به‌دلیل پتانسیل بالای خرابی ناشی شده از ارتعاشات زمین در حین عملیات شمع‌کوبی به‌سبب نزدیکی به ساختمان‌های مسکونی و خصوصا سازه‌های حساسی مانند: موزه، آزمایشگاه، کتابخانه، کارخانه، تأسیسات برق، تأسیسات بزرگراه‌ها یا بیمارستان که اتاق عمل در آن بسیار حساس است اثرات

1. Finite Element-Boundary Element

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

نامطلوب و خسارات کوچک تا بزرگ برگشت‌ناپذیری به دنبال دارند، یا حتی در سطوح پایین‌تر موجب ناراحتی و شکایت ساکنین مجاور محل شمع‌کوبی شوند. بنابراین، ارتعاشات زمین در حین کوبش شمع مهم‌ترین عامل محدودکننده به‌کارگیری این روش است، از این رو، برای جلوگیری از آسیب های سازه‌ای و حفظ آسایش ساکنین در مجاورت محل کوبش شمع لازم است قبل از اجرای هر پروژه، پیش‌بینی قابل قبولی از دامنه ارتعاشات زمین انجام گیرد. بنابراین، درک این مسئله بسیار مهم است که تحت چه شرایطی ارتعاشات خرابی به بار می‌آورند و در چه شرایطی بی‌خطر هستند. از این رو دانستن زنجیرهٔ کامل انتقال ارتعاشات در زمین به درک مسئله کمک شایانی می‌کند. مطابق شکل ۱، مراحل انتشار امواج در شمع‌کوبی ضربه‌ای را می‌توان به چهار بخش اصلی تقسیم کرد:

۱. **کوبش شمع**: انتشار موج در کلاهک شمع، سر شمع و درون شمع
۲. **اندرکنش شمع–خاک**: اندرکنش خاک به‌طور جداگانه با جداره شمع و پنجه شمع
۳. **انتشار امواج در خاک**: انتقال ارتعاشات به لایه‌های خاک و آب زیرزمینی
٤. **اندرکنش خاک–سازه**: پاسخ دینامیکی پی ساختمان یا تونل و احتمال تقویت ارتعاشات در سازه

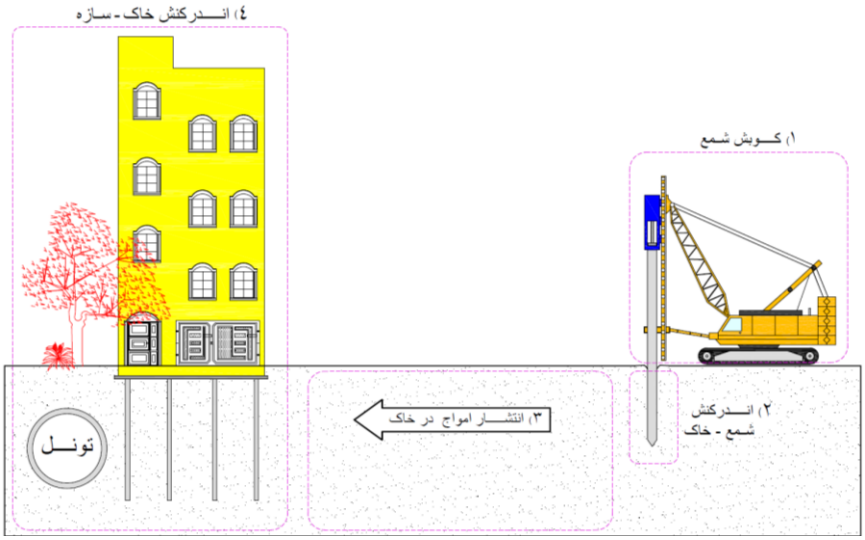
علیرغم اهمیت زیاد مراحل ۲ و ٤، متأسفانه تا به امروز در ارزیابی ارتعاشات حاصل از شمع‌کوبی اکثر تحقیقات تنها متمرکز بر مرحلهٔ ۱ و ۳ بوده است و در تعداد معدودی مرحلهٔ ٤ نیز در نظرگرفته شده است. در این تحقیق، هدف عمده بازتولید واقعی‌تر مرحلهٔ ۲ یعنی اندرکنش شمع–خاک از طریق مدل‌سازی عددی شمع‌کوبی پیوسته از سطح زمین تا عمق دلخواه و با حذف فرضیات ساده‌کننده متداول تا به امروز است تا تطابق بهتر نتایج نهایی مدل‌سازی عددی با نتایج صحرایی حاصل شود.

مدل‌سازی عددی

در این مقاله، برای مدل‌سازی روند نصب شمع در زمین با روش شمع‌کوبی ضربه‌ای از روش اجزای محدود ABAQUS استفاده شده است. نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]



شکل ۱. مراحل انتقال ارتعاشات از چکش به درون شمع، خاک اطراف و سازه‌های مجاور

بر اساس مسائل غیرخطی بنا نهاده شده و توانایی زیادی برای شبیه‌سازی جهان واقعی را دارد. این نرم‌افزار به کاربر توانایی مدل کردن پیچیده‌ترین پدیده‌ها را با در نظرگرفتن اثرات بسیار ظریف آن‌ها می‌دهد، از این رو، برای مدل‌سازی عددی عملیات شمع‌کوبی ضربه‌ای در این تحقیق از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده شده و به‌دلیل تقارن مسئله، محیط به‌صورت دوبعدی و حالت تقارن محوری[1] انتخاب شده است. محیط دارای دو درجهٔ آزادی است (درجات آزادی انتقالی در راستای افقی و قائم)، برای شمع رفتار الاستیک و برای خاک رفتار الاستوپلاستیک موهر-کولمب استفاده شده است. برای تماس شمع با خاک رفتار مماسی و نرمال تعریف شده که برای رفتار مماسی سطح مشترک خاک–شمع از مدل گسیختگی کولمب با امکان تغییرشکل بزرگ بین دو جسم توپر (لغزش شمع بر خاک) استفاده شده است. پارامترهای مفروض در این مدل‌سازی عددی همان مقادیر صحرایی ویس (۱۹۸۱) است که در پژوهش معصومی و همکاران (۲۰۰۹) نیز موجود است که در آن شمع بتنی مدور ته‌بسته است و زاویهٔ نوک مخروطی شکل آن براساس توصیهٔ شنگ و همکاران (۲۰۰۵) برابر ۶۰° در نظر گرفته شده است و سایر مشخصات شمع مطابق جدول ۱ است. خاک محیط رس‌ماسه‌دار است و مشخصات آن نیز مطابق جدول ۲ است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

جدول ۱. مشخصات شمع برای مدل‌سازی عددی

نوع شمع	قطر (m)	طول (m)	ضریب پوآسون	مدول الاستیسیته (MPa)	دانسیته (kg/m^3)
بتنی	0.5 m	10 m	0.25	40000	2500

جدول ۲. مشخصات خاک برای مدل‌سازی عددی

نوع خاک	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	ضریب پوآسون	مدول الاستیسیته (MPa)	دانسیته (kg/m^3)
رس ماسه دار	15	25	0.4	80	2000

برای تماس دو سطح با جنس متفاوت (رس‌ماسه‌دار و بتن) و از عهدهٔ تغییرشکل‌های بزرگ برآمدن که در طول فرآیند نفوذ شمع رخ می‌دهد یعنی لغزش این دو مصالح مختلف از روش تماس پنالتی[۲] استفاده شد. این فرمول‌سازی براساس اصل مستر–اِسلِیو[۳] موجود در آباکوس است که در این فرمول‌سازی هیچ المان تماسی استفاده نمی‌شود به‌طورکه برای مسائل با تغییرشکل‌های بزرگ به‌خوبی مناسب است.

ضریب اصطکاک میان شمع و خاک با توجه به نوع خاک که رس ماسه‌دار و جنس شمع که بتنی است در محدوده ۰/۲ تا ۰/٤ است که در مدل‌سازی عددی در این‌جا برابر ۰/۳۵ در نظر گرفته شده و برای میرایی خاک از میرایی رایلی با مقدار ۷٪ استفاده شده است.

در کارهای دینامیکی شرایط مرزی اهمیت به‌سزایی دارد که در این‌جا برای مرز پایینِ خاک، عمق تا جایی ادامه پیدا کرده که ارتعاشات با میرایی خود خاک مستهلک شوند و ارتعاشات در مرز پایین تقریباً صفر یا ناچیز باشند و به محیط برنگردند ولی برای شرایط مرزی در سمت راست از مرزهای مصنوعی[٤] تعریف شده توسط لیو و کوئک جری[٥] (۲۰۰۳) استفاده شده که در این نوع از مرز مطابق شکل ۲ نواحی انتهایی مرز به چند ناحیه تقسیم می‌شوند و تمام مشخصات این نواحی مشابه با خاک است به‌جز میرایی که باید به تدریج با حرکت به‌سمت مرز

1. Axisymmetric 2. Penalty contact method 3. Master-Slave 4. Artificial Boundary
5. Liu and Quek Jerry

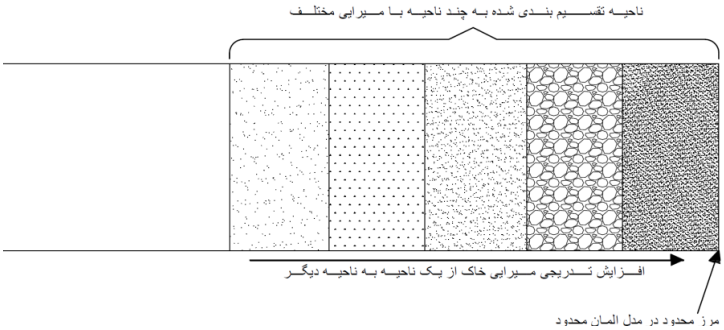
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

افزایش یابد. در مدل‌سازی عددی در اینجا پنج ستون آخر المان‌ها در مرز راست مدل برای مرزهای مصنوعی است که میرایی آن‌ها به‌ترتیب ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵ و ۱۷/۵ درصد است. دو نکته بسیار مهم که باید در این روش رعایت شوند عبارتند از:

الف) میرایی به اندازه کافی باشد که اثر مرز در بازگشت امواج ناچیز گردد.

ب) میرایی به اندازه کافی تدریجی باشد تا امواج با ورود به ناحیه با میرایی متفاوت بازنگردند.



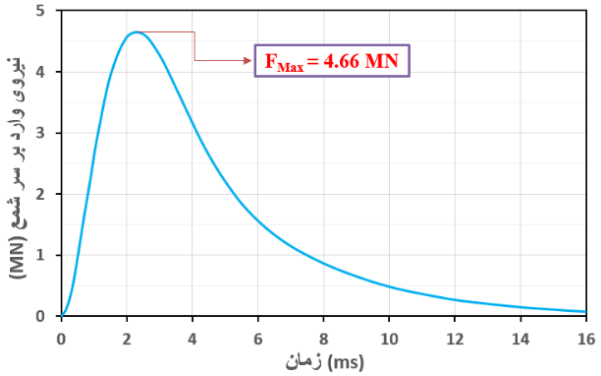
شکل ۲. تقسیم‌بندی نواحی مرزی در مرز مصنوعی

فرآیند کوبش شمع در این پژوهش به‌طور کامل و با درنظرگیری جزئیات مدل‌سازی شده است. بدین‌ترتیب که برای مدل‌سازی عددی عملیات شمع‌کوبی ابتدا تنش‌های اولیه در خاک و شمع ایجاد شدند و سپس مطابق واقعیت شمع روی خاک قرار گرفته و در ابتدا به شمع ۰/۲۵ ثانیه زمان داده شده تا تحت وزن خودش در خاک نفوذ کند، سپس با اعمال ضربات متوالی چکش BSP 357 مطابق شکل ۳ ارائه شده به‌وسیلهٔ دیکس[1] و راندولف[2] (۱۹۹۳) نیرو بر سر شمع وارد آمده و شمع به درون خاک رانده می‌شود [۱۱]. البته باید دقت شود که برای اعمال ضربه چکش شمع‌کوب در مدل‌سازی عددی ضروری است که نیرو به تنش تبدیل شود که از این رو مقدار تنش اعمالی بر سر شمع برابر $۲۳/۷۳\times۱۰^{۶}$ نیوتن بر متر مربع محاسبه شده است. زمان در نظرگرفته شده برای هر ضربه نیز مطابق کارهای عملی و مدل‌سازی‌های عددی گذشته یک ثانیه است چون پس از آن ارتعاشات میرا شده و می‌توان ضربه بعدی را وارد کرد و ادغام ارتعاشات صورت نمی‌گیرد.

1. Deeks 2. Randolph

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]



شکل ۳. نیروی چکش BSP 357 وارد بر سر شمع در عملیات شمع‌کوبی ضربه‌ای

مدل‌سازی شمع‌کوبی از سطح زمین بدون استفاده از مش‌بندی انطباقی لاگرانژی-اویلری اختیاری[1] به‌دلیل اعوجاج[2] شدید المان‌های خاک در تماس با شمع و ظاهر شدن خطا از سوی نرم‌افزار ممکن نیست. به‌عبارتی بهتر، بدون تخصیص این تکنیک برای خاک در تماس با شمع امکان کنار زدن خاک وجود ندارد. این قابلیت در نرم‌افزار آباکوس و فقط در روش حل از نوع صریح[3] وجود دارد. بنابراین، از روش حل صریح برای مدل‌سازی شمع‌کوبی استفاده شده که در این روش حل از روش انتگرال‌گیری تفاضل مرکزی استفاده می‌شود. مطابق شکل ٤، برای ناحیه‌ای از خاک که امکان تغییرات پلاستیک وجود دارد یعنی تا فاصلهٔ 6D (D : قطر شمع) از محور مرکزی شمع از مش‌بندی انطباقی لاگرانژی-اویلری اختیاری بهره گرفته شد و برای خاک طول ٦٠ متر در نظر گرفته شده که ١٠متر از طول انتهایی مرز در سمت راست خاک ٥ ستون انتهایی المان خاک در مرز راست مطابق شکل ٥ مربوط به شرایط مرزی از نوع مرزهای مصنوعی برای استهلاک انرژی امواج است. عمق در نظرگرفته شده برای خاک نیز برابر ٣٠ متر است.

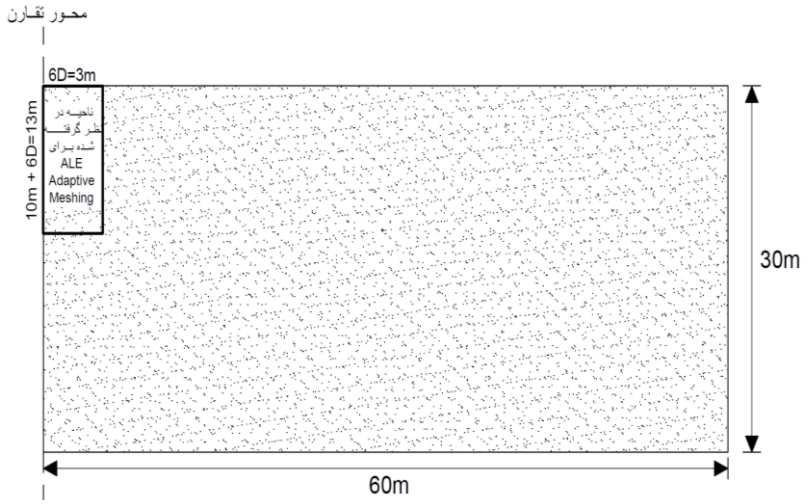
مش‌بندی خاک و شمع مطابق شکل ٥ است که المان‌های به‌کار رفته در این مش‌بندی از نوع چهار ضلعی چهارگرهی منظم، به‌صورت تنش متقارن و از مرتبه هندسی خطی است (CAX4R). اندازه المان‌های شمع ٠/٥× ٠/٢٥ متر و به تعداد ٢٠ عدد است. اندازه المان‌های

2.Arbitrary Lagrangian-Eulerian Adaptive Meshing 3. Distortion 4. Explict

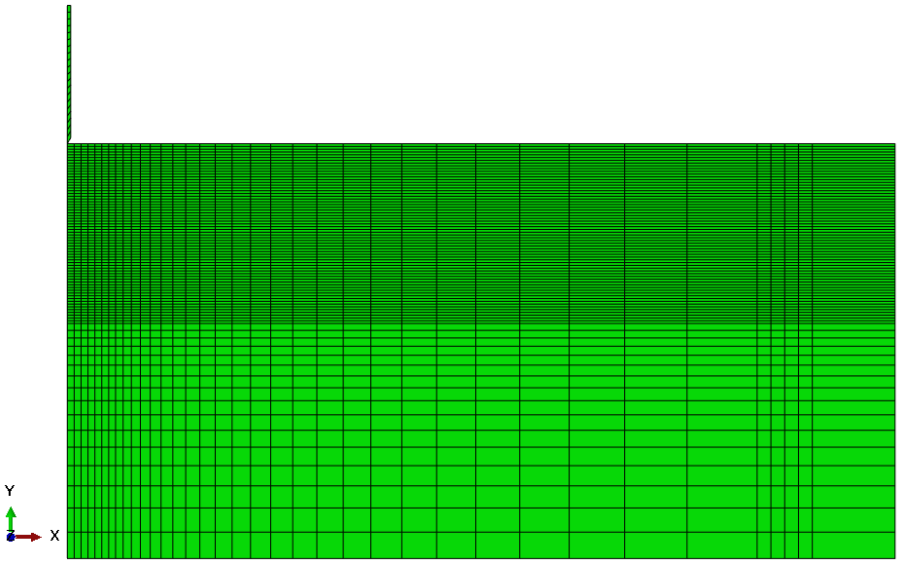
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

خاک نیز به‌گونه‌ای است که در زیر شمع کوچک‌ترین مقدار است و با افزایش فاصله در طول (بـه‌جـز ناحیه مرزیِ راست) و هم در عمق افزایش می‌یابد. کوچک‌ترین انـدازهٔ المـان خـاک ۰/۵× ۰/۲ متـر و بزرگ‌ترین ۵ × ۲ متر است و به تعداد ۲۹۱٦ عدد المان است.



شکل ٤. ابعاد خاک مسئله و ناحیه در نظر گرفته شده برای مش‌بندی انطباقیِ لاگرانژی-اویلری اختیاری

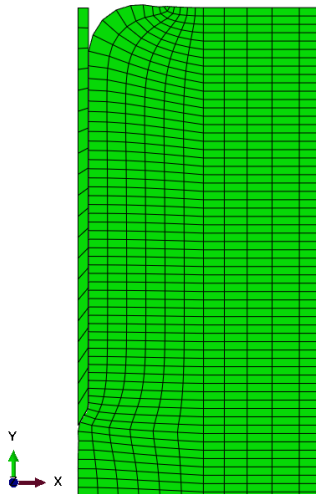


شکل ۵. مش‌بندی شمع و خاک برای عملیات شمع‌کوبی در نرم‌افزار ABAQUS

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

برای انجام صحیح مکانیزم نفوذ شمع به درون خاک برخلاف محققان گذشته که از فرضیات ساده کننده‌ای مانند درنظرگیری شرایط صلب برای شمع، قرار دادن لوله‌ای با ضخامت کم در نوک شمع یا لغزش شمع روی لوله‌ای با قطر خیلی کم برای انجام شدن مکانیزم نفوذ استفاده کردند و یا به خاک فاصله‌ای تا محور مرکزی شمع دادند؛ در این تحقیق طبق واقعیت خاک دقیقاً در زیر شمع بوده است و هیچ لوله‌ای نیز استفاده نشده است. درنظر گرفتن فرضیاتی از این دست سبب می‌شود تماس المان‌ها، تنش و کرنش‌های المان‌های نزدیک شمع و حتی ارتعاشات حاصل با واقعیت انطباق چندانی نداشته باشد. شکل ٦ مش در پایان عملیات شمع‌کوبی پس از ۱۰ متر نفوذ موفقیت‌آمیز شمع به درون خاک را نشان می‌دهد که تورم سطح زمین در نزدیکی محل شمع‌کوبی نیز به مانند کارهای عملی واضح است.



شکل ٦. وضعیت مش در پایان عملیات شمع‌کوبی در نرم‌افزار ABAQUS

صحت‌سنجی مدل عددی

ذرهٔ خاک در مجاورت محل شمع‌کوبی در اثر امواج ارتعاش حاصل از شمع‌کوبی دارای سه مؤلفه سرعت متعامد است: قائم[1]، طولی[2] و عرضی[3]. در آزمایش‌های در محل اندازه‌گیری این مؤلفه‌ها در هر سه جهت به‌دلیل ماهیت امواج انتشار یافته با ژئوفون ضروری است تا بتوان تفسیر رضایت بخشی از ارتعاشات داشت.

1. Vertical 2. Longitudinal 3. Transverse

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

به‌طور معمول ترکیب مؤلفه‌های سرعت ذره به برآیند سرعت بسیار مفید است که از آن به‌عنوان حداکثر سرعت ذره (PPV) نامبرده می‌شود که بردار برآیند تمام مؤلفه‌ها در زمانی یک‌سان است و سرعت یک ذره خاک در هر لحظه را به‌دست می‌دهد:

$$PPV = \sqrt{{V_x}^2 + {V_y}^2 + {V_z}^2} \quad (۱)$$

که در آن V_x ، V_y و V_z به‌ترتیب سرعت ذره در راستای طولی، قائم و عرضی است. در اکثر استانداردها و بررسی‌های محققان نیز برای سنجش آغاز خرابی از پارامتر حداکثر سرعت ذره (PPV) استفاده کرده‌اند؛ چون مطابقت خیلی بهتری نسبت به شتاب و تغییرمکان داشته است. بنابراین، در این مدل‌سازی نیز برای صحت‌سنجی با نتایج صحرایی ویس (۱۹۸۱) از PPV با محاسبه از رابطهٔ ۱ استفاده شد.

حداکثر سرعت ذرات خاک با امواج رایلی در سطح زمین رخ می‌دهد، به‌همین دلیل مؤلفه‌های سرعت برداشت شده در پروژه‌ها متعلق به گره‌های واقع در سطح زمین است. در شکل ۷ نتایج مدل‌سازی عددی در اینجا با نتایج صحرایی ویس (۱۹۸۱) صحت‌سنجی شده که مطابقت بسیار عالی با نتایج صحرایی دارد. ارتعاشات برداشت شده شامل گره‌های واقع بر سطح زمین در فاصله نزدیک حدود ۱/۵ متر تا فاصله بسیار دورتر یعنی حدود ٤٥ متر است که به‌دلیل زیاد بودن حداکثر سرعت ذرات در نواحی نزدیک به محل شمع‌کوبی نمودار به شکل لگاریتمی است.

وضعیت نفوذ شمع بر حسب زمان در شکل ۸ به تصویر کشیده شده است. لازم به ذکر است که در ضربه ۳۵۳ است که شمع به عمق ۱۰ متر رسیده و نفوذ کامل می‌شود. با دقت در شکل ۸ می‌توان دریافت که شیب نفوذ رفته رفته کم می‌شود، به‌عبارتی با نفوذ به اعماق پایین‌تر به تعداد ضربات بیش‌تری برای یک میزان تغییرمکان مشخص نیاز است که این به‌دلیل افزایش سطح تماس شمع با خاک و در نتیجه افزایش اصطکاک قابل انتظار است.

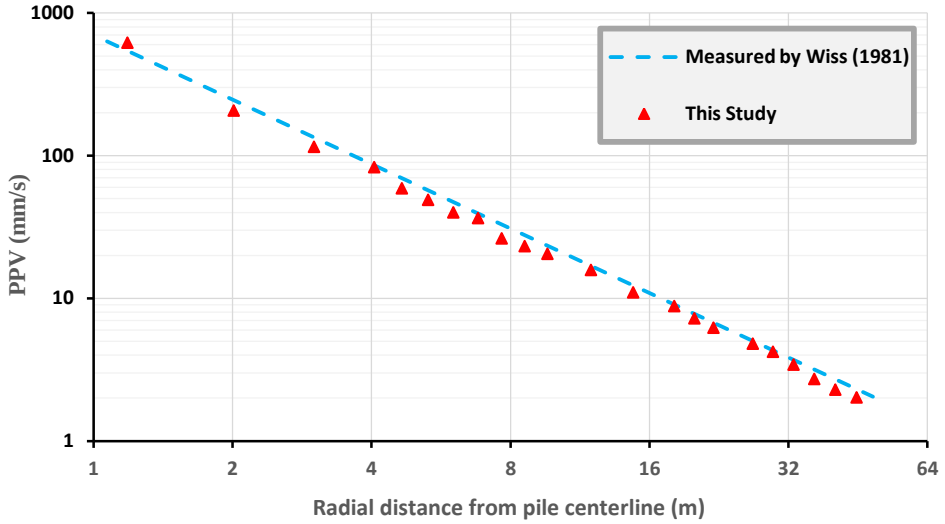
ارزیابی با نتایج عددی گذشته

با توجه به نتایج عددی موجود پیرامون عملیات شمع‌کوبی بررسی شده یک‌سان در پژوهش معصومی و همکاران (۲۰۰۹) و خوبانی و احمدی (۲۰۱٤) نتایج حاصل از مدل‌سازی

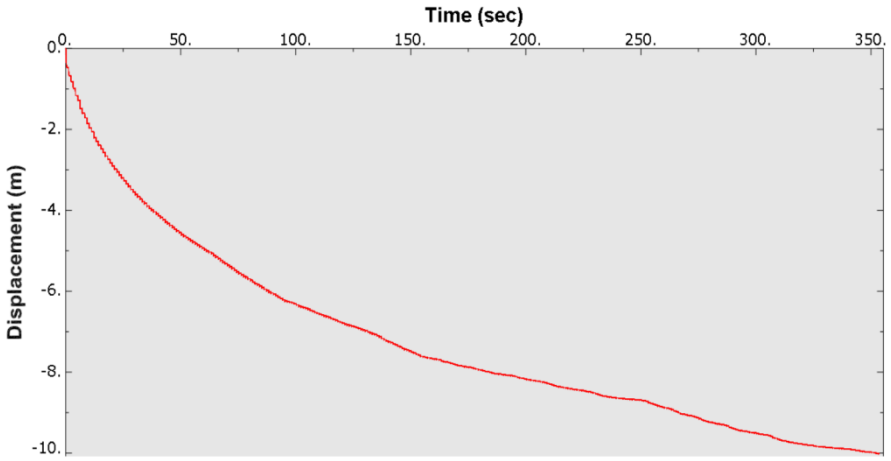
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

حاضر ارتعاشات در سطح زمین و در اعماق خاک با آن‌ها مقایسه شده است تا میزان مطابقت هر یک با نتایج صحرایی ارزیابی شود. لازم به ذکر است که صحت‌سنجی هر دو این مدل‌سازی های عددی با نتایج صحرایی ویس (۱۹۸۱) بوده است و به‌صورت دوبعدی و حالت تقارن محوری است.



شکل ۷. مقایسه حداکثر سرعت ذره حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج صحرایی Wiss (1981) برای ذرات در سطح زمین با فواصل افقی مختلف در عملیات شمع‌کوبی ضربه‌ای



شکل ۸. تغییرمکان (نفوذ) شمع بر حسب زمان در نرم‌افزار ABAQUS

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

۱. ارتعاشات در سطح زمین

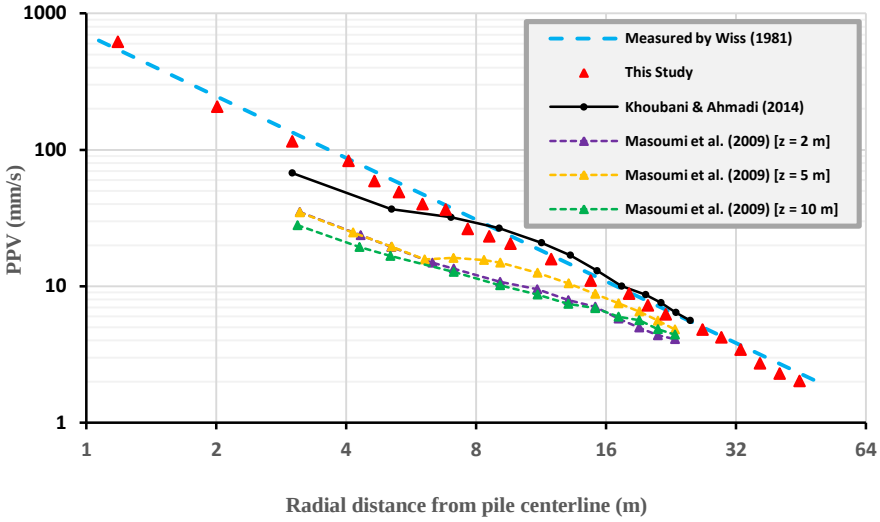
برای مقایسهٔ میزان مطابقت تحلیل‌های عددی گذشته و مدل‌سازی عددی در این تحقیق با نتایج صحرایی، حداکثر سرعت ذرات ناشی از عملیات شمع‌کوبی در مدل‌سازی حاضر با نتایج عددی موجود سایر محققان شامل معصومی و همکاران (۲۰۰۹) و خوبانی و احمدی (۲۰۱٤) مقایسه شده است.

تفاوت عمدهٔ پژوهش معصومی و همکاران (۲۰۰۹) با تحقیق حاضر عبارت است از: اعمال نیروی ضربه چکش شمع‌کوب به‌شمع به‌صورت نیروی محوری متمرکز در راستای محور تقارن مسئله، برداشت سرعت فقط با قرارگیری نوک شمع در سه عمق ۲، ۵ و ۱۰ متری (شمع‌کوبی غیرپیوسته و فقط در سه عمق)، صلب در نظرگرفتن شمع، شرایط مرزی به‌صورت المان مرزی–المان محدود و میرایی متفاوت ۵٪ برای خاک در تماس با شمع و ۲/۵٪ برای سایر قسمت‌های خاک است و برداشت حداکثر سرعت ذره در محدوده فواصل کم‌تری از محل شمع‌کوبی (۳ تا ۲۳ متر) نسبت به مدل‌سازی عددی در این‌جا بوده است. تفاوت عمدهٔ خوبانی و احمدی (۲۰۱٤) با این تحقیق نیز عبارتند از: اعمال نیروی ضربهٔ چکش شمع‌کوب به شمع به‌صورت نیروی محوری متمرکز در راستای محور تقارن مسئله، صلب در نظرگرفتن شمع، شرایط مرزی به‌صورت المان نامحدود[1] (نیمه‌بی‌نهایت) و در نظرگیری میرایی متفاوت ۱۰٪ برای خاک، دادن فاصله به خاک از محور مرکزی شمع به میزان ۱۰ میلی‌متر، تابع نیرو– ضربه متفاوت وارد بر سر شمع، ضریب اصطکاک برابر ۰/۸ و برداشت حداکثر سرعت ذره در محدودهٔ فواصل کم‌تر از محل شمع‌کوبی (۳ تا ۲۵ متر). در شکل ۹، نتایج مدل‌سازی عددی شمع‌کوبی در این تحقیق با دو مورد عددی گذشته مقایسه شده که مطابق این شکل واضح است که نتایج عددی در این پژوهش انطباق بسیار بهتری با نتایج صحرایی نسبت به دو بررسی دیگر دارد. از جمله دلایل بهبود نتایج این تحقیق نسبت به‌کارهای گذشته را می‌توان شمع‌کوبی پیوسته از سطح زمین، حذف فرضیات ساده‌کننده مدل‌سازی‌های عددی گذشته و در نظرگیری جزئیات مطابق کارهای عملی نام برد.

1. Infinite Elements

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]



شکل ۹. مقایسه حداکثر سرعت ذره برای ذرات در سطح زمین با فواصل افقی مختلف با نتایج شمع‌کوبی غیرپیوسته (معصومی و همکاران ۲۰۰۹) فقط در سه عمق (۲، ۵ و ۱۰) و شمع‌کوبی پیوسته (خوبانی و احمدی ۲۰۱٤)

نتایج حداکثر سرعت ذرات در مدل‌سازی تحقیق حاضر برای سطح زمین در شکل ۱۰ با نتایج معصومی و همکاران (۲۰۰۹) زمانی‌که نوک شمع در عمق ۲ متری قرار گرفته و در شکل ۱۱ نیز نتایج مدل‌سازی عددی حاضر برای ذرات در سطح زمین با نتایج عددی موجود در معصومی و همکاران (۲۰۰۹) و خوبانی و احمدی (۲۰۱٤) زمانی‌که نوک شمع در عمق ۵ متری قرار دارد مقایسه شده که مطابق این شکل‌ها نتایج مدل‌سازی در این‌جا به‌دلیل انجام شمع‌کوبی پیوسته، حذف فرضیات ساده‌کننده و درنظرگیری جزئیات مطابق کارهای عملی سبب شکل‌گیری تماس و اندرکنش بهتر بین شمع و خاک شده از این رو، حداکثر سرعت ذرات را خصوصاً در فواصل افقی نزدیکتر بیش‌تر از نتایج دو مدل‌سازی دیگر به‌دست می‌دهد.

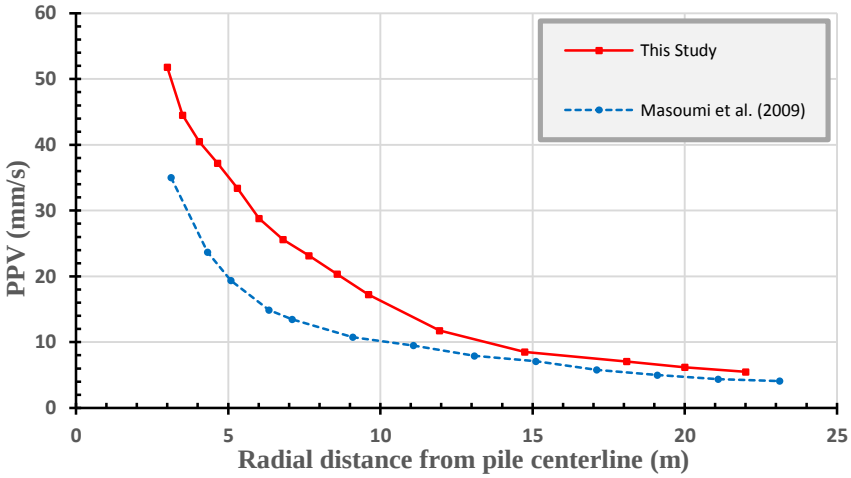
۲. ارتعاشات در اعماق زمین

اگرچه در عملیات شمع‌کوبی حداکثر انرژی امواج انتشار یافته با امواج رایلی در نزدیکی سطح زمین رخ می‌دهد؛ اما برای ارزیابی شدت ارتعاشات رسیده به سازه‌های مدفون در خاک مانند: تونل، پی ساختمان‌ها، لوله‌ها و تأسیسات برق نیاز است که از صحت نتایج به‌دست آمده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

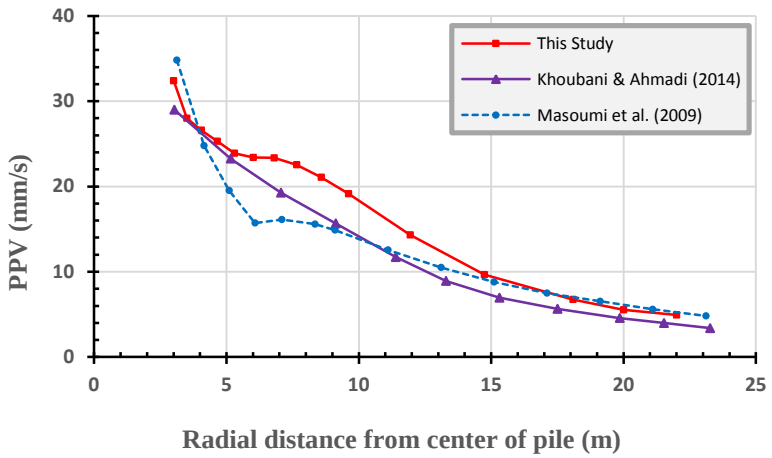
از مدل‌سازی در نرم‌افزار برای اعماق زمین مطمئن باشیم ولی متأسفانه با وجود اهمیت زیاد این موضوع مقادیر ارتعاش اندازه‌گیری شده در اعماق زمین در غالب PPV در منابع کم‌تر یافت می‌شود. مورد بررسی شده در این‌جا نیز فاقد نتایج صحرایی PPV ذرات خاک در اعماق زمین است و به‌همین دلیل، به‌ناچار در شکل ۱۲ مقادیر PPV در فاصلهٔ افقی ۲۰ متری از شمع‌کوبی در اعماق صفر تا ۲۰ متر هنگامی‌که نوک شمع در عمق ۱۰ متر است فقط با نتایج عددی معصومی و همکاران (۲۰۰۹) مقایسه شده است. طبق شکل ۱۲ واضح است که مانند حداکثر سرعت ذرات در سطح زمین، در اعماق زمین نیز انجام شمع‌کوبی پیوسته، حذف فرضیات ساده‌کننده و درنظرگیری جزئیات مطابق کارهای عملی در مدل‌سازی این تحقیق سبب شکل‌گیری تماس و اندرکنش بهتر بین شمع و خاک شده، از این رو، حداکثر سرعت ذرات را بیش‌تر از نتایج معصومی و همکاران (۲۰۰۹) به‌دست می دهد.



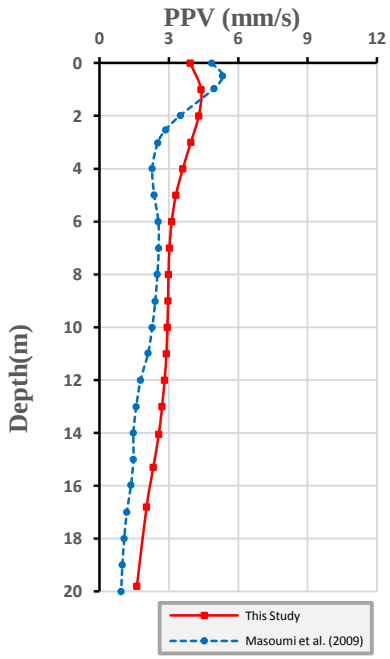
شکل ۱۰. مقایسه PPV ذرات سطح زمین برای شمع‌کوبی در لحظه قرارگیری نوک شمع در عمق ۲ متری با نتایج معصومی و همکاران (۲۰۰۹)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]



شکل ۱۱. مقایسه **PPV** برای ذرات سطح زمین برای شمع‌کوبی در لحظه قرارگیری نوک شمع در عمق ۵ متری با نتایج معصومی و همکاران (۲۰۰۹) و خوبانی و احمدی (۲۰۱٤)



شکل ۱۲. مقایسه **PPV** در مدل‌سازی تحقیق حاضر با معصومی و همکارن (۲۰۰۹) برای ذرات در اعماق زمین در فاصله افقی ۲۰ متر از محور مرکزی شمع هنگامی‌که نوک شمع در عمق ۱۰ متری است

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

نتیجه‌گیری

امروزه کاربرد وسیع پی‌های عمیق (شمع ها) غیرقابل انکار است که استفاده فراوان از این پی‌ها تا به امروز گواه بر همین امر است. برای اجرای شمع‌ها، روش شمع‌کوبی به‌دلیل مزایای فراوان آن نسبت به سایر روش‌ها بسیار شاخص است، اما در محیط شهری به‌دلیل نزدیکی سازه‌ها به محل کوبش شمع در برابر ارتعاشات زمین آسیب‌پذیر هستند. این ارتعاشات زمین ناشی از عملیات شمع‌کوبی تنها عامل محدودکننده این روش است چون پتانسیل بالایی برای خرابی سازه‌های مجاور اعم از جزئی تا کلی را داراست. بنابراین، ضروری است که سطح ارتعاشات پیش از آغاز هر پروژه شمع‌کوبی ارزیابی شود.

در این تحقیق عملیات شمع‌کوبی و مراحل انتشار امواج به تفکیک به‌نمایش درآمده است. مدل‌سازی عددی عملیات شمع‌کوبی در تحقیق حاضر بدون فرضیات ساده کننده متداول و مطابق کارهای عملی از سطح زمین تا نفوذ کامل شمع انجام شده و نتایج حاصل در غالب PPV که به گفته منابع و استانداردها بهترین پارامتر برای سنجش شروع خرابی سازه است با مقادیر صحرایی مقایسه گشته که از مطابقت بسیار عالی برخوردار بود. بنابراین، به‌دلیل موفقیت‌آمیز بودن مدل‌سازی صحیح روند نصب شمع در تحقیق حاضر برای تخمین ارتعاشات زمین در حین شمع‌کوبی بی‌تردید مدل‌سازی عددی روش جای‌گزین سریع‌تر و اقتصادی‌تری نسبت به آزمایش‌های واقعی است. از مقایسه این نتایج با پژوهش‌های محققان گذشته نیز می‌توان دریافت که حذف فرضیات ساده‌سازی رایج در پژوهش کنونی نسبت به تحقیقات گذشته سبب تخمین صحیح‌تر نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی گردیده است. متأسفانه به‌منظور کنترل حداکثر سرعت ذرات خاک حاصل از مدل‌سازی‌های عددی کمبود بررسی‌های صحرایی خصوصاً اندازه‌گیری حداکثر سرعت ذرات در اعماق زمین در فواصل مختلف از محل کوبش شمع در منابع موجود به‌چشم می‌خورد، از این رو، اندازه‌گیری‌های بیش‌تر در محل می‌تواند بسیار مفید باشد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

منابع

۱. فرشی‌همایون‌روز آبتین، حمیدی امیر، *ارزیابی ارتعاشات زمین ناشی از عملیات شمع‌کوبی*، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، تبریز، ایران، ۱۵ تا ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹٤.

2. Karlsson Å-B., "Tillsätt haverikommission för att utreda byggmisstag", Debate article from Dagens Nyheter's web paper DN.se. Published online (2013) 01-11, http://www.dn.se/debatt/tillsatt-haverikommission-forattutreda-byggmisstag/.
3. Smith E.A.L., "Pile Driving Analysis by the Wave Equation", J. Soil Mech. Found. Div., A.S.C.E, Vol. 86, No. 4 (1960) 35-61.
4. Wiss J.F., "Damage Effects of Pile Driving Vibration", Pages 14-20 in Structural Construction: Five Reports, (Highway Research Record 155). Washington, DC (1967).
5. Borja R.I., "Dynamics of Pile Driving by the Finite Element Method", Computers and Geotechnics, Vol. 5 (1988) 39-49.
6. Thandavamoorthy T.S., "Piling in fine and medium sand-A case study of ground and pile vibration", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 24, No. 4 (2004) 295-304.
7. Sheng D., Eigenbrod K.D., Wriggers P., "Finite Element Analysis of Pile Installation Using Large-Slip Frictional Contact", Computers and Geotechnics, Vol. 32, No. 1 (2005) 17-26.
8. Masoumi H.R., Francois S., Degrande G., "A Non-Linear Coupled Finite Element-Boundary Element Model for the Prediction of Vibrations due to

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]

Vibratory and Impact Pile Driving", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.33, No.2 (2009) 245-274.

9. Wiss, J.F., "Construction Vibrations: State-of-the-art." Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol. 107, No. 2 (1981) pp.167-181.
10. Liu G.R., Quek Jerry, S.S., "A Non-reflecting Boundary for Analyzing Wave Propagation Using the Finite Element Method", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 39, No. 5-6 (2003) 403-417.
11. Deeks A.J., Randolph M.F., "Analytical Modeling of Hammer Impact for Pile Driving", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 17, No. 5 (1993) 279-302.
12. Khoubani A., Ahmadi M.M., "Numerical Study of Ground Vibration due to Impact Pile Driving", Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering, Vol. 167, No. 1 (2014) 28-39.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.6.4]