

بررسی عملکرد شمع فولادی در خاک ماسه‌ای سست و متراکم تحت بار انفجاری

رضا خدابخشی^۱، امین جعفرنیا^۲، محمد فیاض^{۳*}، سعید محمد^۴

۱ و ۲- پژوهشگر، ۳ و ۴- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ وصول: ۹۹/۰۳/۲۰، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۷/۱۹)

چکیده

در طول سال‌های اخیر با افزایش حملات تروریستی و انفجارهای رخ داده در سازه‌ها، مطالعات گسترده‌ای بر روی عملکرد سازه‌ها و عکس‌العمل آن‌ها تحت بار انفجاری صورت گرفته است. با توجه به اهمیت شمع در انتقال بار سازه‌های گوناگون نظیر اسکله، سکوه‌های نفتی و پل‌ها بررسی رفتار این عضو از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. در این تحقیق به منظور به حداقل رساندن آسیب‌های وارده تحت بار انفجاری و امواج ناشی از انفجار رفتار شمع فولادی در دو نوع خاک سست و متراکم ماسه‌ای در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. شمع مدل‌سازی شده تحت بارهای مختلف انفجار در دو فاصله ۵ متری از نوک شمع (در سطح خاک) و انتهای شمع (در عمق خاک) قرار داده شده و پاسخ لنگر خمشی، اتلاف انرژی پلاستیک و جابه‌جایی افقی شمع تحت بار انفجاری در شرایط مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در انتها مشاهده شد که لنگر خمشی شمع در خاک ماسه‌ای متراکم به مراتب بیشتر از لنگر خمشی شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای سست است، همچنین با افزایش شدت بار انفجاری پاسخ‌های لنگر خمشی شمع و اتلاف انرژی شمع افزایش یافت. جابه‌جایی افقی سر شمع هنگامی که انفجار در سطح خاک اتفاق افتاد به مراتب بیشتر از جابه‌جایی سر شمع تحت بار انفجاری رخ داده در عمق خاک است.

واژه‌های کلیدی: شمع، انفجار، آباکوس، خاک ماسه‌ای، لنگر خمشی.

Investigation of Steel Pile Performance in Loose and Dense Sandy Soil under Blast Load

R. Khodabakhshi, A. Jafarnia, M. Fayyaz, M. Saeid

Imam Hossein Comprehensive University

(Received: 06/09/2020, Accepted: 10/10/2020)

Abstract

In recent years, with the increasing number of terrorist attacks and explosions in structures, extensive studies have been carried out on the performance of structures and their reactions under blast load. Due to the importance of the pile in the load transfer of various structures such as wharves, oil platform and bridges it is essential to study the behavior of this member. In this research, to minimize the damage caused by the blast load and the waves caused by the blast, the behavior of steel piles in two types of loose and dense sandy soil was investigated by Abaqus. The modeled pile is placed under different blast loads at 5 m distance from the pile head (at the soil surface) and the end of the pile (at the soil depth) has been studied. Finally, it was observed that the bending moment pile in dense sandy soil was significantly more than bending moment pile in loose sandy soil. The horizontal displacement of the pile head when the blast occurred at the soil surface is far greater than the displacement of the pile head under the blast load.

Keywords: Pile, Blast, Abaqus, Sandy Soil, Bending Moment, Wharf.

۱- مقدمه

از ظهور دانش مربوط به بارهای انفجاری، پژوهش‌های نظری و آزمایشگاهی بسیاری توسط مهندسان و دانشمندان بر روی مصالح و بارهای انفجاری انجام شده است. امروزه با گسترش حملات تروریستی، تحلیل و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار نیز توسعه یافته است و آیین‌نامه‌های متعددی همچون [۱]UFC 3-340 و [۲]TM5-855-1 برای تحلیل و طراحی انفجاری ارائه شده است. شمع سازه‌ها رایج‌ترین نوع فونداسیون عمیق هستند که به‌عنوان جزء اصلی انتقال بار سازه محسوب می‌شوند. فونداسیون شمعی اعضایی از جنس فولاد، بتن، بتن مسلح و چوب هستند که در صورت مناسب نبودن ظرفیت باربری زمین برای استفاده از شالوده‌های سطحی، از آن‌ها برای ساخت شالوده‌های شمعی استفاده می‌شود.

از جمله تحقیقاتی که در زمینه بررسی رفتار شمع انجام شده است می‌توان به تحقیق فین و همکارانش [۳] اشاره کرد. در این تحقیق به بررسی رفتار شمع در مقابل لرزش به همراه افزایش فشار آب حفرهای در خاک روان گرا پرداختند و نشان دادند که خرابی شمع در مناطق بحرانی مثل سر شمع و در مرز بین خاک روان گرا و غیرقابل روان گرا اتفاق می‌افتد. همچنین تنگ و لینگ [۴] رفتار دینامیکی گروه شمع در خاک روان گرا را با استفاده از آزمایش میز لرزه بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که قطر شمع و نسبت سختی اولیه خاک و شمع به‌طور قابل توجهی بر لنگر خمشی بیشینه شمع اثر می‌گذارد اما جرم سازه تقریباً اثری بر روی لنگر خمشی بیشینه شمع ندارد. چاکرابورتی و کومار [۵] به بررسی ظرفیت باربری شمع در خاک‌های رسی نرم زهکشی نشده پرداختند. در این بررسی پارامترهای ظرفیت باربری شمع نظیر شمع‌های تحت بار محوری محاسبه نموده است. نتایج این مقاله برای نسبت‌های مختلف طول به قطر شمع و پارامترهای مقاومت برشی خاک ارائه شده است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که پارامتر ظرفیت باربری شمع با افزایش L/D و اصطکاک داخلی خاک افزایش می‌یابد. ژان و همکاران [۶] اثر ظرفیت باربری قائم شمع تحت بار متمرکز قائم را تحت بررسی قرار دادند. پس از بررسی به این نتیجه رسیدند که مدل رفتاری موهر کلوب با تماس سخت مدلی سازگار برای مدل‌سازی شمع و خاک است. همچنین طبق مدل‌سازی رفتاری آن‌ها نتایج تجربی با نتایج مدل‌سازی در ظرفیت باربری شمع در نیروی متحمل شده توسط شمع تفاوت دارد و یکسان نیست. قاسم‌زاده و همکاران [۷] شبیه‌سازی عددی گروه شمع‌های مایل و تعیین اندرکنش بین شمع‌ها را مورد بررسی خود قرار دادند. بارگذاری‌ها در این پروژه به‌صورت محوری و جانبی (عمود بر محور) و در قالب اعمال تنش به سر شمع انجام پذیرفت، همچنین در آنالیز دینامیکی بارگذاری‌ها به‌صورت هارمونیک و در فرکانس‌های مختلف به سر شمع اعمال شده است. پس از بررسی تأثیرات تأثیر زاویه تمایل شمع، اثر نسبت لاغری شمع‌ها، تأثیر سختی نسبی شمع و خاک، تأثیر زاویه تمایل شمع‌ها در

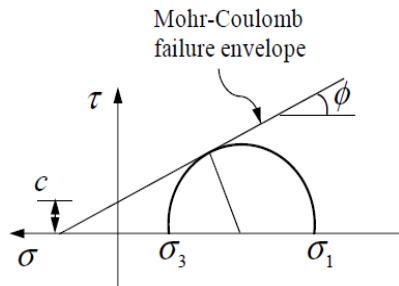
گروه شمع، فاصله بین شمع‌ها کم بوده و شمع‌ها در محدوده تأثیر یکدیگر قرار گرفته و اندرکنش بین شمع‌ها وجود دارد، در این مقاله به‌طور خاص به تعیین ضریب اندرکنش شمع - خاک - شمع در حالت شمع مایل تحت بار محوری و جانبی استاتیکی و دینامیکی پرداخته شده است. از آنجاکه در این پژوهش شمع مرجع و دریافت‌کننده به‌صورت مایل هستند، نشست محوری شمع مرجع، باعث تغییر مکان جانبی شمع دریافت‌کننده و نشست جانبی شمع مایل نیز باعث تغییر مکان محوری شمع مرجع می‌شود. مجید قیومی و همکاران [۸] رفتار لرزه‌ای شمع قرار گرفته‌شده در خاک ماسه‌ای اشباع‌نشده را در آزمایشگاه مورد بررسی خود قرار دادند. در این آزمایش از دو شمع فولادی و آلومینیومی استفاده شد. شمع تحت تاریخچه زمانی مختلف قرار داده شد و مشاهده شد که بیش‌ترین تغییر شکل جانبی شمع در شمع گیردار شده و خاک با لرزش آزاد صورت گرفت.

در زمینه تأثیر انفجار بر شمع سازه‌ها شیم [۹] به بررسی رفتار شمع آلومینیومی در آزمایشگاه در خاک شن اشباع تحت اثر منابع انفجاری پرداخت و تأثیر انفجار در فواصل مختلف بر شمع را مورد بررسی قرار داد. جایاسینگ [۱۰] با استفاده از مدل اجزاء محدود ۳ بعدی شمع و خاک اطراف آن یافته‌های خود را با شیم مورد بررسی قرار داد و مشاهده شد که بین پارامترهای مؤثر بر مقاومت شمع پارامتر فاصله شمع از منبع تأثیر زیادی بر میزان تنش وارده بر طول شمع دارد و بیش‌ترین جابه‌جایی افقی در طول شمع بین ۴ تا ۵ متری از طول آن رخ می‌دهد. در سال ۲۰۱۴ نیز جایاسینگ [۱۱] به بررسی پاسخ انفجاری و آنالیزهای شکست شمع‌های فونداسیون تحت بار انفجار سطحی پرداخته‌اند. در این بررسی شمع‌ها تحت بار انفجار در حالتی که سر شمع‌ها آزاد و بسته است مورد بررسی قرار گرفته‌اند. طبق این تحقیقات جابه‌جایی افقی طول شمع در شمع‌های با سربسته بیشتر از شمع‌های با سر باز است و در انتهای شمع این جابه‌جایی بیش‌ترین مقدار خود را دارد. رای و همکاران [۱۲] ارتعاشات شمع مدفون شده در خاک را تحت انفجار مورد بررسی خود قرار دادند. مطالعه انفجار زیرزمینی نشان می‌دهد که فشار موج انفجار هنگامی که بر روی دیوار منعکس می‌شود، افزایش می‌یابد و موج انفجار بیشتر به دیوار بتنی نفوذ و پس‌از آن با نفوذ به حالت جامد خاک دمپ می‌شود. تحت تأثیر موج انفجاری، محفظه بتنی دارای تنش‌های زیادی را تجربه کرد و تمام عناصر بتنی کاملاً به یک مرحله پلاستیک منتهی می‌شد. همچنین یاسر و ماروا [۱۳] بر روی تأثیر انفجار بر شمع بتنی تحت بار انفجاری واقع بر سطح زمین در نرم‌افزار آباکوس مطالعات خود را انجام دادند. شمع‌های مدل‌سازی شده دارای ارتفاع ۲۰ متر و قطر ۰/۶ متر بودند و خاک مدل‌سازی شده دارای رفتار دراکر - پراکر [۱۴] بوده است. انفجار با استفاده از ماده TNT در فاصله ۵ متری از شمع انجام و بررسی شد. مشاهده شد که با افزایش مقدار ماده انفجاری TNT اتلاف انرژی در پلاستیک در شمع افزایش پیدا کرده است. همچنین تنش‌های افقی در تغییر شکل شمع‌های افقی با نزدیک‌تر شدن شمع به بار انفجاری

۳۰ درجه و زاویه اتساع ۱۰ درجه است. همچنین مقدار چسبندگی ناچیز ۱ نیوتون بر مترمربع برای جلوگیری از واگرایی در آنالیز برای خاک در نظر گرفته شده است. المان مورد استفاده از نوع المان یکپارچه باقابلیت دگر دیس پذیر است [۱۸].

جدول ۱- مشخصات خاک مدل صحت سنجی.

چگالی جرمی خاک	۱۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب
مدول الاستیسیته	۴۵*۱۰ ^۶ نیوتون بر مترمربع
ضریب پواسن	۰/۳۵



شکل ۱- معیار شکست موهر کولومب.

شمع استوانه‌ای مدل‌سازی شده دارای ۴ متر طول و قطر ۲۰ سانتی‌متر است. شمع فولادی دارای مدول الاستیسیته ۲۵ گیگا پاسکال و ضریب پواسن ۰/۳ است. همچنین چگالی شمع مدل‌سازی شده ۱۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است.

تحلیل مدل موردنظر در دو گام انجام شد. ابتدا سازه تحت وزن شمع و خاک تحت بار درجا و سپس بار متمرکز اعمالی بر نوک شمع با بررسی رفتار غیرخطی اعمال و بررسی شد. همچنین زاویه اصطکاک بین شمع و خاک به مقدار ۰/۴۲ ذکر شده است لحاظ گردید. رفتار اتصالی در سطح شمع و خاک شامل دو نوع رفتار نرمال و تانژانت مستقیم است. نیروی نرمال تنها وقتی که شمع و خاک در تماس هستند برقرار می‌شود در غیر این صورت صفر است. رفتار تماسی نرمال از نوع اتصال سخت^۱ در آباکوس مدل‌سازی شده است. رفتار تانژانتی در آباکوس به صورت اصطکاک کولمب اندرکنش بین شمع و خاک را به تصویر می‌کشد. کف خاک مدل‌سازی شده بر روی سنگ بستر قرار داشته و به صورت گیردار مدل‌سازی شده و شرایط مرزی اطراف خاک به صورتی غلنتکی در راستای عمود بر محور موردنظر مدل‌سازی شده است. برای صحت سنجی جابه‌جایی قائم شمع مدل‌سازی شده بارهای مختلف محوری مطابق نمودار ارائه شده توسط یون گنگ ژوان به سر شمع مدل‌سازی شده اعمال و جابه‌جایی قائم شمع مدل‌سازی بر روی نمودار شمع مقاله موردنظر اعمال و در شکل (۲) آورده شده است [۶].

افزایش پیدا کرد. همچنین جابجایی و همکاران [۱۵] یکسری آزمایش در سنگاپور در محلی دارای سنگ گرانیته مطالعات خود را بر روی تأثیر انفجار بر روی شمع انجام دادند. در این آزمایش‌ها از ۳ شمع با قطر ۶۰ سانتی‌متر استفاده شد. کرنش‌سنج‌هایی برای اندازه‌گیری لنگر خمشی و نیروی محوری در طول شمع استفاده شد. مقادیر مختلف بار انفجاری در فاصله‌های مختلف از شمع رخ داد و در اکثر شمع‌ها حداکثر لنگر خمشی در سر شمع گیردار رخ داد. بیش‌ترین نیروی محوری و لنگر خمشی رخ داده در شمع به ترتیب ۱۵۰ کیلو نیوتون و ۲۹ کیلو نیوتون متر رخ داد. در نهایت پس از انفجارهای رخ داده نیرو و لنگر وارد شده به شمع کمتر از ظرفیت شمع بوده که باعث ایمن ماندن وضعیت شمع در مقابل بار انفجاری بوده است. مهدی خدپرست و سید حسن حسینی [۱۶] در زمینه تأثیر فاصله بین شمع‌ها در گروه شمع تحت بارگذاری انفجاری تحقیقات خود را انجام دادند. در این تحقیق از یک گروه شمع متشکل از چهار شمع با فواصل مختلف از یکدیگر استفاده شد. انفجار رخ داده در فاصله ۴ متری از سر شمع و در سطح زمین مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت مشاهده شد که افزایش فاصله طولی و عرضی بین شمع‌ها موجب کاهش تغییر شکل جانبی شمع‌ها می‌شود. همچنین افزایش فاصله باعث کاهش تنش در سر شمع و تنش جانبی رخ داده در شمع‌ها می‌گردد.

اگرچه تحقیقات متعددی بر روی رفتار شمع در برابر بارهای استاتیکی و برخی دینامیک انجام گردیده ولی رفتار آن در نرخ‌های بالای کرنش کمتر مورد توجه بوده است. در این تحقیق تأثیر انفجار بر روی رفتار شمع در دو نوع خاک ماسه‌ای متراکم و سست بررسی شده است. همچنین به منظور ارزیابی تأثیر عمق انفجار در فاصله ۵ متری از نوک شمع در سطح خاک و انتهای شمع در عمق خاک با مقادیر مختلف بار TNT، رفتار لنگر خمشی و اتلاف انرژی پلاستیک و جابه‌جایی افقی سر شمع فولادی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج تحقیق در دو نوع خاک ماسه‌ای سست و متراکم ارائه شده است.

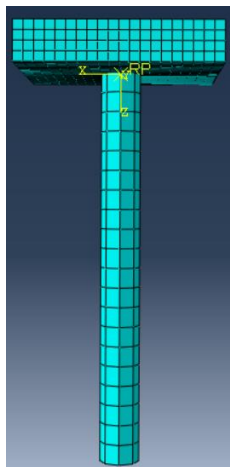
۲- صحت سنجی رفتار شمع

به منظور صحت سنجی رفتار شمع قرار گرفته در خاک، مدل شمع ساخته شده توسط یون گنگ ژوان و همکاران [۶] مدل‌سازی و صحت سنجی شد. برای مدل‌سازی شمع و خاک از مدل ۳ بعدی که شمع تحت بار متمرکز با مقادیر متفاوتی قرار گرفته شده استفاده شد و نتایج جابه‌جایی قائم شمع صحت سنجی و بررسی شده است. خاک ماسه‌ای مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس [۱۷] دارای ارتفاع ۶ متر و عرض ۴/۲ است. مشخصات خاک در جدول (۱) آورده شده است.

خاک مدل‌سازی شده دارای رفتار الاستوپلاستیک موهر کولومب که در شکل (۱) نشان داده شده است و دارای زاویه اصطکاک داخلی

1- Solid
2- Deformable
3- Hard Contact

در رابطه (۱)، c ضریب چسبندگی و ϕ زاویه اصطکاک داخلی است. خاک مدل‌سازی شده در دو نوع ماسه‌ای سست و متراکم مدل‌سازی شده است که خصوصیات مصالح این خاک از مشخصات خاک ماسه‌ای ارائه شده توسط الگامل در سایت OpensSees دانشگاه برکلی استفاده شده است. چگالی خاک ماسه‌ای سست و متراکم به ترتیب ۱۹۰۰ و ۲۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است [۲۰]. مدول یانگ خاک مدل‌سازی شده ۲۴۰۰۰۰ مگا پاسکال و ضریب پواسن خاک ۰/۳۳ است. خصوصیات خاک در جدول (۲) آورده شده است.

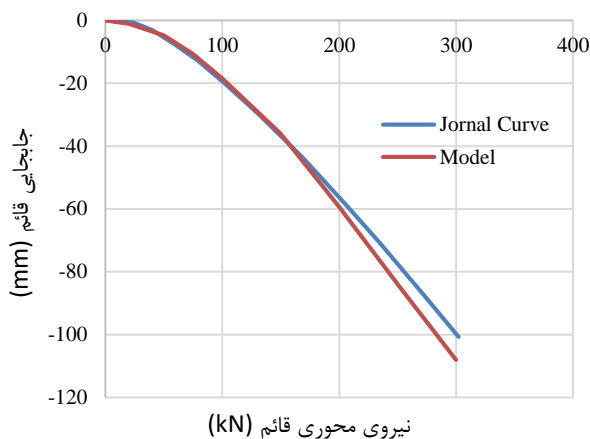


شکل ۳- شمع مدل‌سازی شده در آباکوس.

جدول ۲- مشخصات خاک مدل‌سازی شده.

پارامترها	خاک نرم و سست	خاک سفت و متراکم
چگالی جرمی خاک	۱/۹ ton/m ³	۲/۱ ton/m ³
مدول برشی	۷۵۰۰۰ kPa	۱۳۰۰۰۰ kPa
مدول بالک	۲۰۰۰۰۰ kPa	۳۹۰۰۰۰ kPa
زاویه اصطکاک	۳۳	۴۰

برای در نظر گرفتن اندرکنش شمع و خاک رفتار تماسی برای انتقال بار در دو نوع رفتار نرمال و تانژانت در نظر گرفته شده است. نیروی نرمال تنها هنگامی که تماس خاک و شمع زیاد باشد منتقل می‌شود. این نوع رفتار با استفاده از تماس سخت در آباکوس لحاظ شده است. رفتار تماس می‌تواند از تماس سخت و بدون لغزش نسبی بین خاک و شمع تا شرایط اصطکاک لغزشی در امتداد شمع ایجاد شود. برای اندرکنش بین شمع و خاک زاویه اصطکاک بین خاک و فونداسیون با رفتار تانژانتی به مقدار ۰/۴۲ تعریف شده و رفتار نرمال خاک از نوع تماس سخت مطابق مقاله صحت سنجی شده اعمال گردید. در انتها برای در نظر گرفتن شرایط مرزی شرایط تکیه‌گاهی خاک مطابق مدل یون گنگ ژوان در کف خاک سنگ بستر وجود داشته و باید به صورت گیردار مدل‌سازی شده است و اطراف خاک را به صورت غلتکی در جهت عمود بر محور در نظر گرفته شده است [۶].



شکل ۲- مقایسه نمودار جابه‌جایی قائم شمع مدل‌سازی شده با نتایج شمع مدل‌سازی شده توسط یون گنگ ژوان.

همان‌طور که از نمودار شکل (۲) مشاهده می‌شود جواب‌های استخراج‌شده تا مقدار تقریباً ۲۰۰ کیلو نیوتون کاملاً مطابق بر داده‌های ارائه شده توسط یون گنگ ژوان بوده و در مقادیر بیشتر نیز جواب‌ها کمتر از ۲ درصد اختلاف را نشان می‌دهد که حاکی از دقت بالای مدل‌سازی شمع مورد نظر است.

۳- مدل اجزاء محدود اندرکنش شمع و خاک

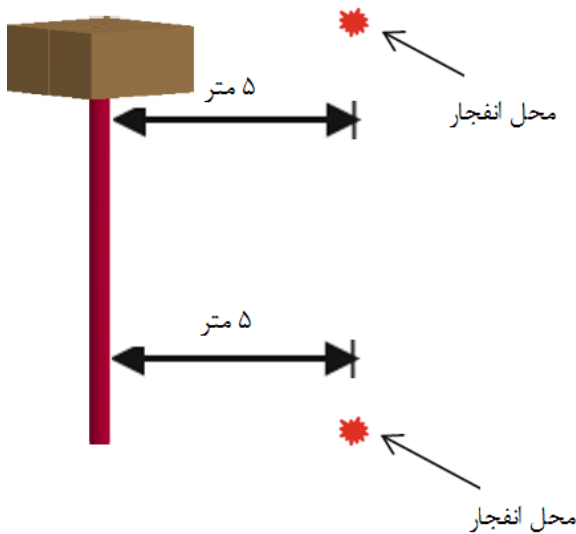
۳-۱- مشخصات شمع مدل‌سازی شده

برای بررسی رفتار شمع تحت بار انفجاری در این مقاله از شمع فولادی استوانه‌ای شکل با قطر ۱ متر و ارتفاع ۱۰ متر استفاده شده است و همچنین کلاهکی به ابعاد ۵ متر و ضخامت ۱ متر بر روی شمع مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس قرار دارد که در شکل (۳) نمایش داده شده است. مصالح شمع فولادی از مصالح مدل شمع مهتی استفاده شده است [۱۹]. چگالی شمع مدل‌سازی شده ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضریب پواسن ۰/۳ لحاظ شده است. شمع فولادی دارای مصالح فولادی A572 با مدول الاستیسیته شمع مدل‌سازی شده ۲۰۰,۰۰۰ مگا پاسکال و تنش تسلیم ۳۴۵ مگا پاسکال است.

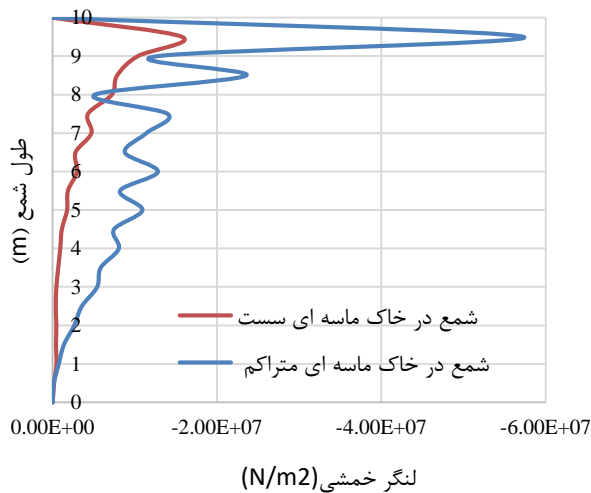
۳-۲- مشخصات خاک اطراف شمع و اندرکنش شمع و خاک

ابعاد خاک مدل‌سازی شده در این پروژه ۱۰ برابر بزرگ‌ترین بعد سازه که در این مدل کلاهک شمع با طول ۵ متر است در نظر گرفته شده است. خاک مدل‌سازی شده در این پروژه دارای ۵۰ متر در ۵۰ متر طول و ارتفاع ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری خاک الاستوپلاستیک مدل‌سازی شده بر اساس رفتار موه‌رکولمب مدل‌سازی شده است. گسترش شکست در این روش، وابسته به تنش‌های اصلی و جزئی (σ_3, σ_1) است که در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi - c \cos \phi = 0 \quad (1)$$



شکل ۵- وضعیت انفجار رخ داده در اطراف شمع.

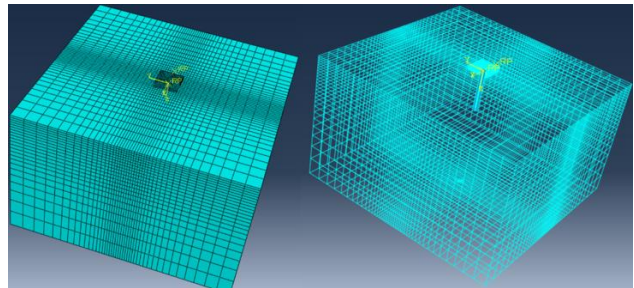


لنگر خمشی (N/m²)

شکل ۶- لنگر خمشی شمع تحت بار انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرم رخ داده در سطح خاک.

همان طور که از لنگر وارد شده به شمع مشخص است، شمع قرار گرفته در خاک متراکم به مراتب لنگر بیشتری از شمع قرار گرفته در خاک سست متحمل شده است. همچنین لنگر خمشی رخ داده در طول شمع تحت بار انفجاری ناشی از ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT در سطح خاک در دو نوع خاک ماسه‌ای سست و متراکم در شکل (۷) آورده شده است. همان طور که از شکل (۷) نیز مشخص است در این وضعیت نیز لنگر خمشی ایجاد شده در شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای متراکم به مراتب بیشتر از شمع فولادی قرار گرفته در خاک ماسه‌ای سست است. همچنین در مقایسه لنگر ایجاد شده در شمع فولادی تحت بار انفجاری ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم مقدار لنگر ایجاد شده در شمع تحت بار انفجاری ۲۰۰۰ کیلوگرم به بیشتر است.

برای مش‌بندی خاک مدل‌سازی شده خاک در اطراف شمع به دلیل حساسیت بیشتر رفتاری و دقت بالای مدل‌سازی دارای مش‌های ریز در اطراف شمع و کلاهک شمع بوده است و با فاصله گرفتن از محیط اطراف شمع جهت کاهش زمان آنالیز و تحلیل مدل، ابعاد مش افزایش داده شده است. مش‌بندی شمع و خاک مدل‌سازی شده با در نظر گرفتن استقلال مش در شکل (۴) نمایش داده شده است.



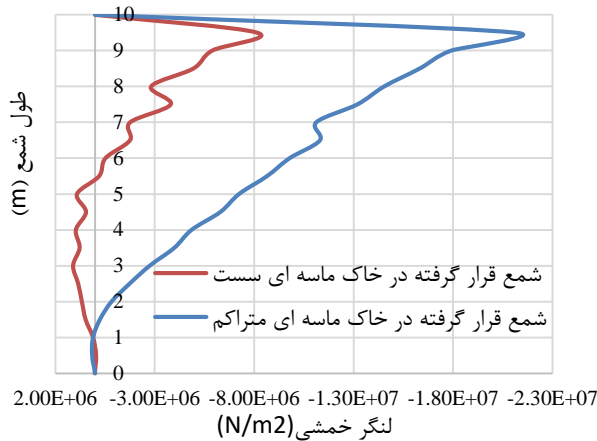
شکل ۴- مدل مش‌بندی شده اندرکنش شمع و خاک.

۴- نحوه اعمال بار انفجاری و به شمع مدل‌سازی شده

انفجار در هوا و انفجار بر روی سطح زمین از پرکاربردترین انواع رخدادها هستند. انفجار در هوا ناشی از انفجار یک هواپیما یا موشک در هوا در مقابل یک سازه بلند بوده و در انفجار بر روی شمع مدل‌سازی شده درون خاک کاربرد چندانی ندارد. در این مقاله انفجار از نوع بر روی سطح زمین که ناشی از انفجار یک خودرو یا حملات تروریستی رخ داده مدل‌سازی شده است. بار انفجاری مدل‌سازی شده در فاصله ۵ متری از مرکز ثقل شمع و در ۲ عمق مورد بررسی قرار گرفت. اولیه بر روی سطح خاک و در فاصله ۵ متری از سر شمع و عمق ثانویه در فاصله ۵ متری از انتهای شمع مدل‌سازی شده بررسی شده است. برای بار انفجاری مدل‌سازی شده از ماده انفجاری TNT با مقدار ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم در نقاط ذکر شده در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است. برای بار ثقلی استاتیکی در نظر گرفته شده بر روی شمع ناشی از وزن اسکله مورد نظر به میزان ۳۰۰ کیلو نیوتون بار به صورت متمرکز بر روی شمع مطابق مقاله مهتی در نظر گرفته شده است [۱۹]. محل انفجار در دو وضعیت در شکل (۵) نشان داده شده است.

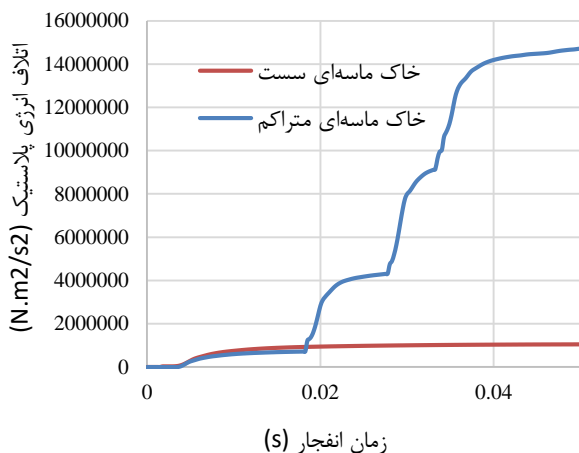
۵- بررسی نتایج عددی ناشی از انفجار

در این مقاله نتایج ناشی از جابه‌جایی قائم و لنگر خمشی شمع فولادی تحت بار انفجاری در خاک ماسه‌ای سست و متراکم ارائه و بررسی شده است. لنگر خمشی وارد شده به شمع ناشی از بار انفجاری TNT با مقدار ۱۵۰۰ کیلوگرم وارد شده به سر شمع در دو نوع خاک ماسه‌ای سست و متراکم در شکل (۶) آورده شده است.



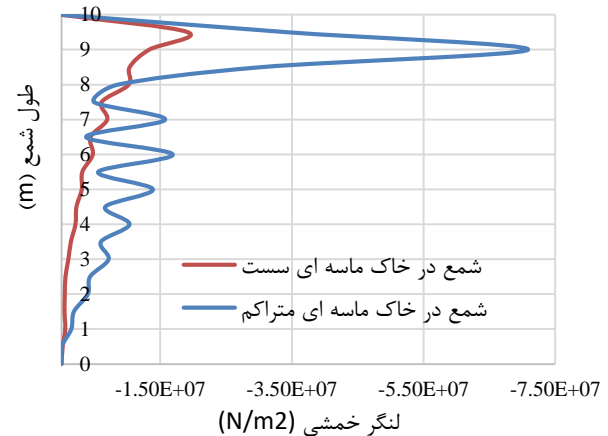
شکل ۹- لنگر خمشی شمع تحت بار انفجاری ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT رخ داده در انتهای شمع.

در گام بعدی اتلاف انرژی پلاستیک مورد بررسی قرار گرفته شده است. همان‌طور که از شکل (۱۰ و ۱۱) مشاهده می‌شود شمع قرار گرفته در خاک متراکم در طول انفجار رخ داده در سطح خاک در هر دو مقدار بار ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT اتلاف انرژی پلاستیک به مراتب بیشتری نسبت به شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای سست دارند. همچنین اتلاف انرژی شمع تحت بار انفجاری ۲۰۰۰ کیلوگرم به مراتب بیشتر از بار انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT است.



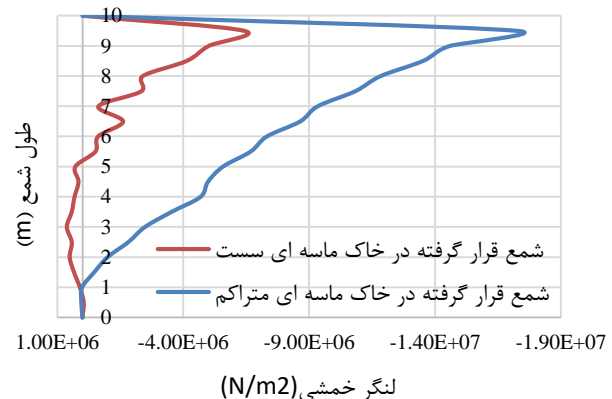
شکل ۱۰- اتلاف انرژی پلاستیک مدل تحت بار انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT در سطح خاک.

در مورد اتلاف انرژی پلاستیک شمع تحت بار انفجاری رخ داده در عمق خاک تحت بار ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT همان‌طور که در شکل‌های (۱۲ و ۱۳) مشاهده می‌شود برعکس انفجار رخ داده در سطح خاک در این نوع انفجار شمع قرار گرفته در خاک سست به مراتب اتلاف انرژی پلاستیک بیشتری نسبت به شمع قرار گرفته در خاک متراکم از خود نشان داده که دلیل آن تأثیر مستقیم میرایی خاک بر شمع قرار گرفته در خاک سست تحت بار انفجاری است.



شکل ۷- لنگر خمشی شمع تحت بار انفجاری ۲۰۰۰ کیلوگرم رخ داده در سطح خاک.

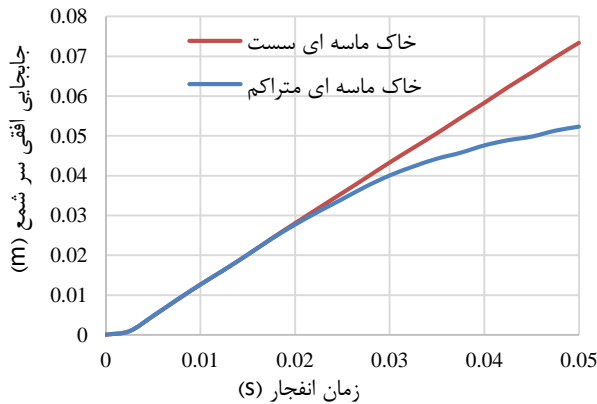
در مورد لنگر خمشی ایجاد شده در شمع فولادی در انفجار رخ داده در انتهای شمع تحت بار انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود لنگر خمشی شمع هنگامی که شمع در خاک ماسه‌ای متراکم قرار گرفته به مراتب بیشتر از زمانی است که شمع در خاک ماسه‌ای سست قرار گرفته است. این در حالی است که لنگر خمشی ایجاد شده در شمع هنگامی که انفجار در سطح خاک رخ داده است به مراتب بیشتر از زمانی است که انفجار در عمق خاک و در انتهای شمع رخ داده است.



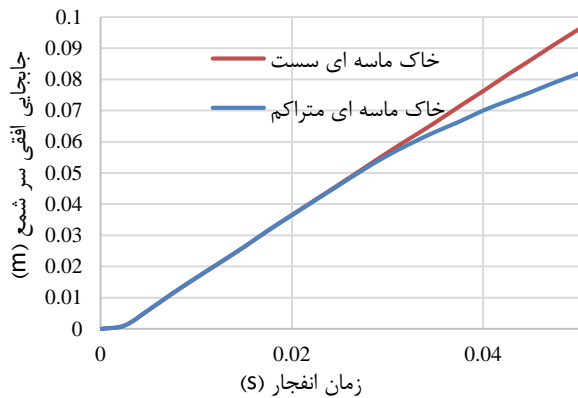
شکل ۸- لنگر خمشی شمع تحت بار انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT رخ داده در انتهای شمع.

همچنین لنگر خمشی ایجاد شده در شمع تحت بار ۲۰۰۰ کیلوگرمی TNT درون خاک و در انتهای شمع همان‌طور که از شکل (۹) مشاهده می‌شود لنگر ایجاد شده نسبت به بار ۱۵۰۰ کیلوگرمی به مراتب بیشتر است و همچنین لنگر ایجاد شده تحت بار ۲۰۰۰ کیلوگرمی TNT در دو حالت روی سطح خاک و درون عمق خاک همان‌طور که از مقایسه شکل‌های (۷ و ۹) مشاهده می‌شود، لنگر ایجاد شده در شمع تحت بار انفجاری رخ داده در سطح خاک به مراتب بیشتر از انفجار رخ داده درون عمق خاک است.

جابه‌جایی افقی رخ داده در سر شمع ناشی از باری انفجاری در سطح خاک همان‌طور که در (۱۴ و ۱۵) برای بارهای ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT مشاهده می‌شود جابه‌جایی افقی رخ داده در شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای سست بیشتر از شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای متراکم است که این مقدار در حدود ۷/۳ سانتی‌متر برای شمع قرار گرفته در خاک سست و برای شمع قرار گرفته در خاک متراکم ۵/۲ سانتی‌متر تحت بار ۱۵۰۰ کیلوگرم و برای بار ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT مقدار جابه‌جایی افقی سر شمع در خاک ماسه‌ای سست ۹/۶ سانتی‌متر و برای شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای متراکم ۸/۲ سانتی‌متر است.

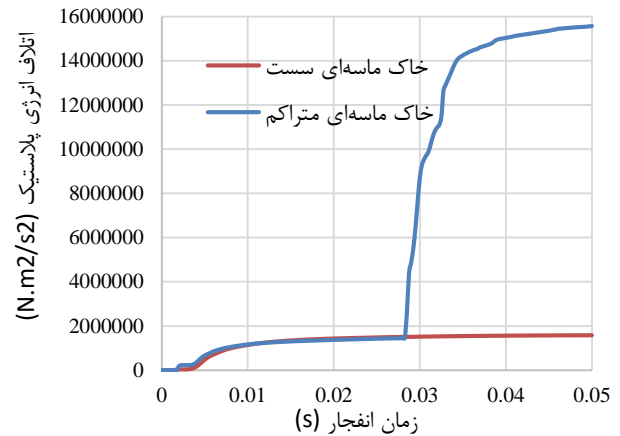


شکل ۱۴- جابه‌جایی افقی سر شمع تحت بار انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT در سطح خاک.

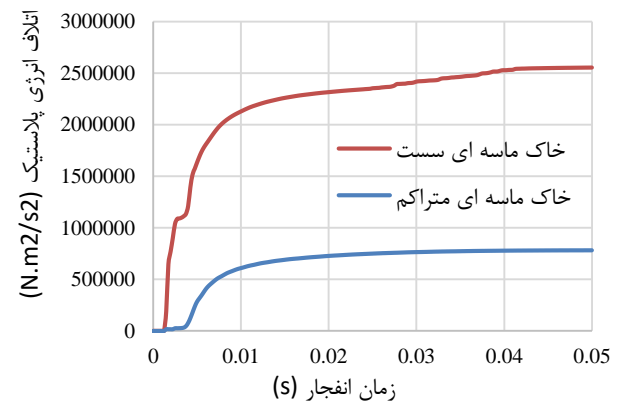


شکل ۱۵- جابه‌جایی افقی سر شمع تحت بار انفجاری ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT در سطح خاک.

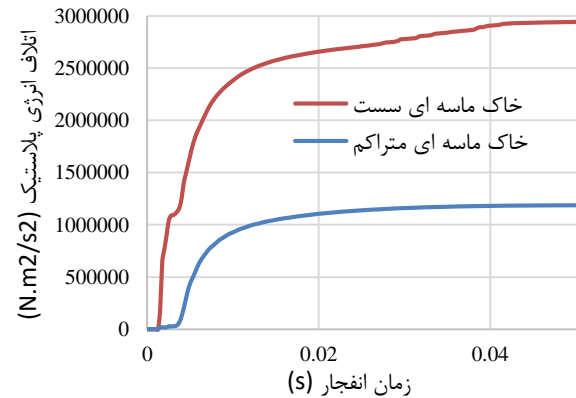
زمانی که انفجار رخ داده در عمق خاک و در فاصله ۵ متری از انتهای شمع رخ داده است همان‌طور که در شکل‌های (۱۶ و ۱۷) نشان داده شده است مقادیر جابه‌جایی افقی سر شمع به مراتب کاهش یافته و برای شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای سست در حدود ۱ میلی‌متر و برای شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای متراکم در حدود ۲ میلی‌متر اتفاق افتاده است که به مراتب کمتر از انفجار رخ داده در سطح خاک است.



شکل ۱۱- اتلاف انرژی پلاستیک مدل تحت بار انفجاری ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT در سطح خاک.



شکل ۱۲- انرژی پلاستیک مدل تحت بار انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT در عمق خاک (انتهای شمع).



شکل ۱۳- انرژی پلاستیک مدل تحت بار انفجاری ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT در عمق خاک (انتهای شمع).

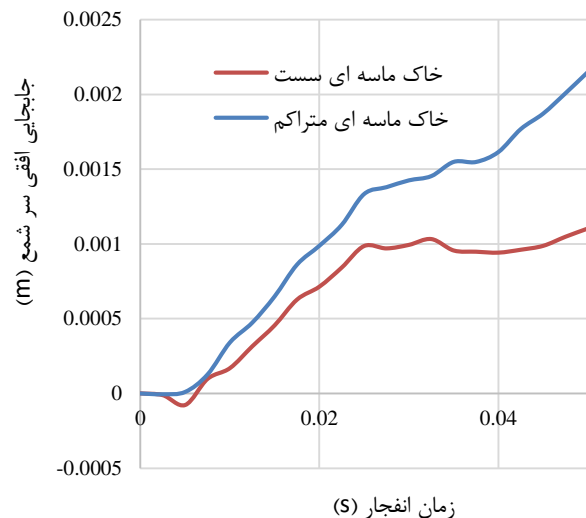
همچنین اتلاف انرژی پلاستیک شمع قرار گرفته در خاک سست هنگامی که انفجار در عمق خاک رخ داده از اتلاف انرژی پلاستیک شمع هنگامی که انفجار در سطح خاک رخ داده بیشتر بوده در صورتی که شمع قرار گرفته در خاک متراکم اتلاف انرژی بیشتری تحت انفجار رخ داده در سطح خاک از خود نشان داد.

فولادی افزایش یافت. همچنین لنگر خمشی شمع فولادی در شرایطی که انفجار در سطح خاک اتفاق افتاد به مراتب بیشتر از انفجار رخ داده در عمق خاک بوده است. دلیل این افزایش لنگر خمشی در خاک متراکم خاصیت میرایی خاک سست نسبت به خاک متراکم ماسه‌ای و کاهش لنگر اعمال شده به شمع بوده است و همچنین کاهش لنگر شمع در انفجار رخ داده در عمق خاک به دلیل دمپ شدن انرژی انفجار به دلیل خاصیت میرایی خاک است.

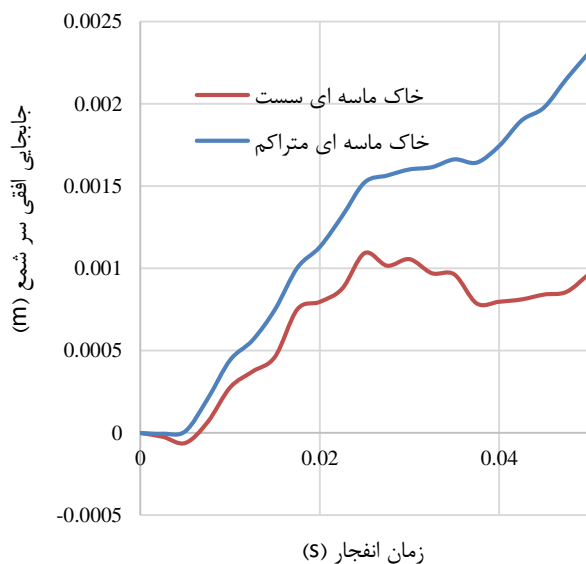
در زمینه اتلاف انرژی پلاستیک شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای متراکم تحت انفجار رخ داده در سطح خاک اتلاف انرژی به مراتب بیشتری نسبت به شمع فولادی قرار گرفته در خاک ماسه‌ای سست از خود نشان داد. همچنین با افزایش بار انفجاری این اتلاف انرژی افزایش یافت. در حالتی که شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای سست تحت انفجار رخ داده در عمق خاک اتلاف انرژی بیشتری نسبت به شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای متراکم از خود نشان داد که تأثیر مستقیم میرایی خاک سست بر انفجار رخ داده در عمق خاک را نشان می‌دهد. در مقایسه اتلاف انرژی پلاستیک شمع در دو وضعیت انفجار در سطح و عمق نیز شمع در خاک ماسه‌ای سست در وضعیت شمع تحت انفجار رخ داده در عمق خاک بیشتر از زمانی که انفجار در سطح خاک بوده است. این در حالی است که انفجار رخ داده در سطح خاک در خاک ماسه‌ای متراکم اتلاف انرژی به مراتب بیشتری نسبت به انفجار رخ داده در عمق خاک از خود نشان داد که دلیل این اتفاق میرایی بیشتر مصالح خاک ماسه‌ای سست نسبت به میرایی مصالح خاک ماسه‌ای متراکم است.

جابه‌جایی افقی شمع تحت بار انفجاری هنگامی که بار انفجاری در سطح خاک رخ داد شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای سست به دلیل سستی بیشتر و انسجام کمتر خاک اطراف شمع جابه‌جایی افقی بیشتری نسبت به شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای متراکم داشت. در حالی که وقتی انفجار در عمق خاک اتفاق افتاد جابه‌جایی افقی شمع به مراتب از وضعیتی که انفجار در سطح خاک رخ داد کمتر بود. همچنین جابه‌جایی افقی شمع نیز در خاک ماسه‌ای متراکم نسبت به خاک ماسه‌ای سست کاهش پیدا کرد که دلیل آن تأثیر میرایی خاک ماسه‌ای سست بر انفجار رخ داده در عمق خاک بوده است. همچنین مشاهده شد که با افزایش شدت بار انفجاری مقدار جابه‌جایی سر شمع افزایش یافته است.

همان‌طور که از بررسی‌های انجام شده مشاهده شد تأثیر انفجار بر رفتار شمع در شرایط مختلف لنگر خمشی و اتلاف انرژی پلاستیک و جابه‌جایی‌های شمع متفاوت بوده و حاکی از اهمیت بررسی رفتار شمع در خاک‌های مختلف و انفجار رخ داده در نقاط مختلف از عمق خاک را دارد که افزایش شدت انفجار باعث تشدید پاسخ‌ها و همچنین تغییر خاک ماسه‌ای از سست به متراکم باعث تغییر پاسخ‌های شمع در شرایط مختلف شد.



شکل ۱۶- جابه‌جایی افقی سر شمع تحت بار انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT در عمق خاک (انتهای شمع).



شکل ۱۷- جابه‌جایی افقی سر شمع تحت بار انفجاری ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT در عمق خاک (انتهای شمع).

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار شمع فولادی تحت بار انفجاری رخ داده در فاصله ۵ متری در دو حالت سطح خاک و عمق خاک و در انتهای شمع در دو نوع خاک ماسه‌ای سست و متراکم مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله لنگر خمشی شمع، اتلاف انرژی پلاستیک شمع و همچنین جابه‌جایی افقی شمع تحت بار انفجاری در حالات مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. همان‌طور که مشاهده شد لنگر خمشی شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای متراکم به مراتب بیشتر از لنگر رخ داده در شمع فولادی قرار گرفته در خاک ماسه‌ای سست بود. همچنین مشاهده شد که با افزایش مقدار بار انفجاری لنگر خمشی ایجاد شده در شمع

مراجع

- [11] Jayasinghe, L. B.; Thambiratnam, D. P.; Perera, N.; Jayasooriya, J. H. A. R. "Blast Response and Failure Analysis of Pile Foundations Subjected to Surface Explosion"; Eng. Fail Anal. 2014, 39, 41-54.
- [12] Ray, M. N.; Belhe, R.; Srivastava, S. "Vibration Response in Pile Foundation Embedded in Soil Due to Under Ground Explosion"; 24th Conf. on Structural Mechanics in Reactor Tech. 2017, 20-25.
- [13] Ibrahim, Y. E.; Nabil, M. "Finite Element Analysis of Pile Foundations under Surface Blast Loads"; Springer in Proc. of the 13th Int. Conf. Damage Assessment of Structures, 2020, 446-460
- [14] Drucker, D. C.; Prager, W. "Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design"; Appl. Math. 1952, 10, 157-65.
- [15] Jayasinghe, L. B.; Zhao, Z. Y.; Goh, A. T. C.; Zhou, H. Y.; Gui, Y. L.; Tao, M. "A Field Study on Pile Response to Blast-Induced Ground Motion"; Soil Dynam. Earthq. Eng. 2018, 114, 568-575.
- [16] Khodaparast, M.; Hosseini, S. "Effect of Pile Space in Pile Group under Explosive Loading"; J. Adv. Defence Sci. Technol. 2019, 4, 393-404.
- [17] Hibbitt, K.; Sorensen "ABAQUS Explicit"; Hibbitt, K & Sorenson Incorporated., 1996.
- [18] Labuz, J. F.; Zang, A. "Mohr-Coulomb Failure Criterion"; Rock Mech. Rock Eng. 2012, 45, 975-979.
- [19] Abdel-Mohti, A.; Khodair, Y. "Analytical Investigation of Pile-Soil Interaction in Sand under Axial and Lateral Loads"; Int. J. Adv. Struct. Eng. 2014, 6, 54.
- [20] Elgamal, A.; Yang, Z. "Geotechnical Seismic Simulation Using OpenSees"; Annual Meeting Research Digest. 2002.
- [1] Dod, U. "UFC 3-340-02, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US DoD, Washington, DC, USA, 2008.
- [2] Station, U. A. E. W. E. "TM5-855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons"; US Army, Navy and Air Force, US Government Printing Office, Washington DC, 1986.
- [3] Finn, W. D.; Fujita, N. "Piles in Liquefiable Soils: Seismic Analysis and Design Issues"; Soil Dynam. Earthq. Eng. 2002, 22, 731-42.
- [4] Tang, L.; Ling, X. "Response of a RC Pile Group in Liquefiable Soil: A Shake-table Investigation"; Soil Dynam. Earthq. Eng. 2014, 67, 301-315.
- [5] Chakraborty, D.; Kumar, J. "Bearing Capacity of Piles in Soft Clay Underlaid by Cohesive Frictional Soil"; Int. J. Geomech. 2012, 13, 311-317.
- [6] Zhan, Y. G.; Wang, H.; Liu, F. C. "Modeling Vertical Bearing Capacity of Pile Foundation by Using ABAQUS"; Electron. J. Geotech. Eng. 2012, 17, 1855-1865.
- [7] Ghasemzadeh, H.; Tarzaban, M.; Hajitaheriha, M. M. "Numerical Analysis of Pile-Soil-Pile Interaction in Pile Groups with Batter Piles"; Geotech. Geol. Eng. 2018, 36, 2189-2215.
- [8] Ghayoomi, M.; Ghadirianniari, S.; Khosravi, A.; Mirshekari, M. "Seismic Behavior of Pile-Supported Systems in Unsaturated Sand"; Soil Dynam. Earthq. Eng. 2018, 112, 162-173.
- [9] Shim, H. "Response of Piles in Saturated Soil under Blast Loading"; Appl. Mech. 1997, 7, 544-2494.
- [10] Jayasinghe, L. B.; Thambiratnam, D. P.; Perera, N.; Jayasooriya, J. H. A. R. "Computer Simulation of Underground Blast Response of Pile in Saturated Soil"; Comput Struct. 2013, 120, 86-95.