

### چکیده

یکی از روش‌های اجرای شمع، استفاده از روش کوبش برای نصب شمع‌های بتنی پیش ساخته به کمک ابزار خاص می‌باشد. نحوه کوبش و کنترل این فرآیند یکی از جنبه‌های مهم اجرایی این شمع‌ها بوده، به طوری که عدم دقت کافی به این مسئله، علاوه بر کاهش راندمان عملیات کوبش، خاک و محیط اطراف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مقاله، به بررسی رفتار شمع‌های توخالی استوانه‌ای و مخروطی شکل در فرآیند کوبش به کمک آزمایش واقعی در سایت و تحلیل عددی پرداخته شده است. برای این منظور، با استفاده از انجام آزمایش‌های واقعی و روش تفاضل محدود و معیار گسیختگی موهر-کولمب، رفتار شمع و خاک هنگام کوبش مدلسازی شده و شرایط استفاده و کاربرد این گونه شمع‌ها در عملیات کوبش مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. اطلاعات و نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان در مراحل مختلف طراحی و اجرای شمع‌های کوبیدنی و همچنین برای بهینه‌سازی آنها استفاده نمود. با مقایسه نتایج به دست آمده از بررسی رفتار شمع‌های با هندسه مختلف در آزمایش‌های واقعی و تحلیل عددی، نتیجه‌گیری می‌شود که هندسه و شکل شمع در رفتار کوبشی آنها تأثیر مستقیم داشته و با استفاده از این گونه شمع‌ها در عملیات شمع کوبی، علاوه بر کاهش مصرف انرژی به میزان بین 25 تا 60 درصد، افزایش راندمان و بهره‌وری عملیات کوبش نیز فراهم می‌گردد. همچنین شرایط باز یا بسته بودن نوک شمع تأثیر بسیار زیادی در فرآیند کوبش دارد و در شرایط اعمال انرژی یکسان در حین عملیات کوبش، شمع ته‌باز عملکرد بهتری نسبت به شمع ته‌بسته داشته و در مجموع شمع مخروطی ته‌باز عملکرد بهتری نسبت به سایر شمع‌ها با هندسه‌ی مختلف دارد.

**کلمات کلیدی:** کوبش شمع، شمع مخروطی، شمع توخالی، شمع ته‌باز، آزمایش میدانی، روش تفاضل محدود

## تحلیل رفتار شمع‌های توخالی با مقاطع غیریکنواخت در فرآیند کوبش

امید توسلی (نویسنده مسؤل)

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران گرایش خاک و پی،

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

Email: [o.tavasoli@srbiau.ac.ir](mailto:o.tavasoli@srbiau.ac.ir)

محمود قضاوی

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی،

تهران

### 1- مقدمه

به دو گروه آزمایش‌های دینامیکی کرنش بزرگ و آزمایش‌های دینامیکی کرنش کوچک تقسیم می‌شوند. روش آزمایش‌های دینامیکی کرنش بزرگ مانند آزمایش PDA، یک تکنیک عمومی پذیرفته شده برای آزمایش بر روی شمع‌های کوبیده شده است. در این روش، ظرفیت استاتیکی شمع‌های کوبشی فلزی و بتنی را می‌توان با استفاده از دو رویکرد فرمول‌های کوبش شمع و یا تحلیل معادله موج پیش‌بینی کرد.

در سال 1960، اسمیت [1] اثر پژوهشی بسیار مفیدی در زمینه کاربرد معادله موج به منظور تحلیل عملیات کوبش شمع

به طور کلی، انجام آزمایش بر روی شمع‌ها در مقیاس واقعی منجر به شناخت بهتر رفتار شمع در حین اجرا و پس از آن می‌شود. آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی، روشی برای آزمایش پی‌های عمیق به منظور کسب اطلاعات در مورد ظرفیت باربری و پیوستگی آنها و در برخی موارد رصد و کنترل آنها در طول کوبش است. صرف نظر از روش نصب شمع، آزمایش‌های دینامیکی را در صورتی که در زمان نصب شمع انجام شود، کنترل دینامیکی شمع و در صورتی که بعد از نصب شمع انجام شود، آزمایش بارگذاری دینامیکی می‌نامند. آزمایش‌های دینامیکی

نشست در شمع استوانه‌ای از همه کمتر و جابجایی شمع با مقطع کاملاً غیر استوانه‌ای از همه بیشتر است و شمع‌های دارای مقطع ترکیبی استوانه‌ای - مخروطی در بین این دو مقدار قرار دارند.

هدف اصلی این پژوهش، بررسی رفتار شمع‌های توخالی با مقاطع غیر یکنواخت در فرآیند کوبش به کمک آزمایش واقعی و تحلیل عددی می‌باشد؛ به گونه‌ای که بتوان به شکلی منطقی رفتار شمع‌های توخالی و خاک را در هنگام کوبش مدلسازی و بررسی نموده و از اطلاعات و نتایج حاصل از آن در مراحل مختلف طراحی و اجرای شمع‌ها استفاده نمود.

## 2- آزمایش کوبش شمع‌های با مقطع غیر یکنواخت ته‌بسته در خاکریز ماسه‌ای

در این قسمت، به بررسی رفتار شمع‌های استوانه‌ای و مخروطی تحت کوبش که توسط دستگاه شمع کوب در خاکریز ماسه‌ای با تراکم نسبی متوسط کوبیده می‌شوند، پرداخته شده است. دو نوع شمع با هندسه‌های متفاوت برای این هدف در نظر گرفته شده؛ یکی شمع استوانه‌ای (C) که دارای مقطع یکنواخت و قطر خارجی 162 میلی‌متر است و دیگری شمع مخروطی (T)، که دارای مقطع غیر یکنواخت کوچک‌شونده و قطر خارجی سر شمع 212 میلی‌متر و قطر خارجی نوک 115 میلی‌متر است. همه شمع‌ها، از جنس فلزی با سطح مقطع دایره‌ای و به صورت توخالی به ضخامت 5 میلی‌متر و طول 250 سانتیمتر بوده و از ورق‌های فولادی ST37 ساخت کارخانه ذوب آهن اصفهان جهت برش، خم و نورد آنها استفاده شده است. ابعاد هندسی شمع‌ها طوری طراحی شده‌اند که همواره نسبت قطر به طول آنها بزرگ‌تر از 10 بوده و عملکرد آنها در محدوده‌ی پی‌های عمیق قرار گرفته تا بتوان نتایج به‌دست آمده را برای شمع‌های واقعی با ابعاد مختلف تعمیم داد. همچنین تمامی شمع‌ها دارای طول و حجم یکسان بوده و به منظور تسهیل در کوبش و نفوذ بهتر آنها در خاک، 15 سانتیمتر انتهایی به صورت نوک تیز در آورده شده است. همچنین تمامی شمع‌ها تا 50 سانتیمتر در خاک مدفون شده و سپس تحت بار ضربه چکش 300 کیلوگرمی که از

منتشر ساخت. اولین راه‌حل در شمع کوبی با روش اجزاء محدود نیز به چاو [2] نسبت داده شده است. رفتار خاک در این مدل به صورت الاستو پلاستیک فرض شده و معیار تسلیم ون می‌سز برای شمع در نظر گرفته شده است. چاو و اسمیت [3] تحلیل معادله موج یک‌بعدی بر اساس مدل اسمیت [1] را با روش اجزاء محدود با تقارن محوری مقایسه نمودند. بنا بر نتایج ارائه شده توسط آنها، نوسان کمتری در نتایج به‌دست آمده از روش اجزاء محدود نسبت به روش معادله موج دیده شد. تحلیل اجزاء محدود با تقارن محوری کوبش شمع به وسیله مبسوط و همکاران [4-5] نیز انجام شده است. آنها به بررسی عددی کوبش شمع بتنی در خاک چسبنده همگن اشباع که بر پایه تئوری حالت بحرانی مکانیک خاک است پرداختند. این مدل قادر به مدل کردن تغییر مکان‌های بزرگ است که به وسیله خاک در مجاورت شمع در حال کوبش تجربه می‌شوند. تحلیل کوبش شمع‌های بتنی استوانه‌ای و مخروطی که با لایه‌ای از FRP پوشانده شده، در پژوهش ساکر و همکاران [6] به صورت تست آزمایشگاهی در خاک ماسه‌ای خیلی متراکم مورد بررسی قرار گرفته است. ایشان نتیجه گرفتند که شمع مخروطی دارای عملکرد بهتری نسبت به شمع استوانه‌ای می‌باشد. قضاوی و توسلی [7] به بررسی رفتار شمع‌های با مقاطع متغیر در حین کوبش پرداختند. آنها با مدلسازی شمع و خاک به کمک تفاضل محدود و مقایسه نتایج حاصله با نتایج تحقیقات گذشته، صحت عملکرد مدلسازی فرآیند کوبش شمع را با نرم‌افزار سه‌بعدی FLAC مورد بررسی قرار داده و سپس رفتار شمع‌های بتنی توپر با مقاطع متغیر تحت کوبش را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج تحقیقات ایشان با بررسی رفتار شمع‌های استوانه‌ای در مقایسه با رفتار شمع‌های غیر استوانه‌ای هم‌حجم معادل آن تحت کوبش، نشان می‌دهد که هر چه زاویه‌ی جداره شمع افزایش یابد، سرعت و نشست نهایی شمع نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه جداره شمع، مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا سرعت کاهش یابد. همچنین میزان نشست نهایی و سرعت با توجه به تغییر هندسه مقطع شمع متفاوت می‌باشد، به طوری که

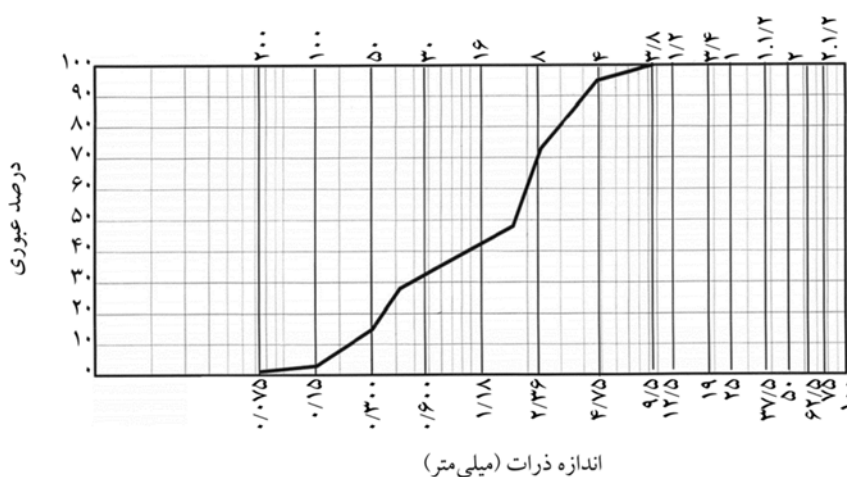
آزمایش‌ها، مطالعات لازم برای شناخت مشخصات خاک نیز انجام شده که هدف از آنها، تعیین مشخصات و پارامترهای خاک شامل دانه‌بندی، طبقه‌بندی، درصد رطوبت، تراکم نسبی، پارامترهای مقاومت برشی و غیره بوده تا بتوان رفتار شمع را به منطقی‌ترین نحو ممکن در این خاک‌ها تفسیر نمود. نام خاک بر اساس روش طبقه‌بندی یونیفاید، ماسه بدانه‌بندی شده بوده و کاملاً خشک می‌باشد. نتایج پارامترهای اندازه‌گیری شده برای خاک محل انجام آزمایش در جدول (1) آورده شده است.

ارتفاع نیم متری رها می‌شود، قرار گرفته‌اند.

به منظور ایجاد خاکریز ماسه‌ای با تراکم متوسط مطابق شکل (1)، بستری از ماسه شکسته به ارتفاع سه متر از مصالح درشت‌دانه معادن منطقه شهریار تهران ساخته شد. برای ایجاد تراکم متوسط برای این خاکریز، ماسه با تراکم طبیعی خود هنگام تخلیه از کامیون، در نظر گرفته شده و جهت ایجاد سطحی هموار با استفاده از لودر رگلاژ گردید. نمودار دانه‌بندی خاک خاکریز ماسه‌ای در شکل (2) نمایش داده شده است. قبل از شروع



شکل (1): خاکریز ماسه‌ای با تراکم متوسط

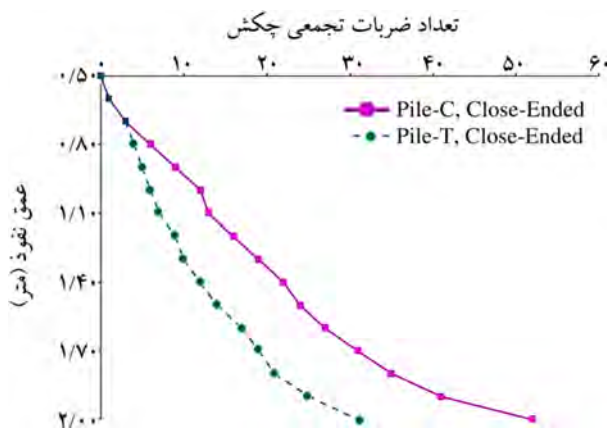


شکل (2): نمودار دانه‌بندی خاکریز ماسه‌ای

جدول (1): مشخصات خاک محل انجام آزمایش‌ها

موقعیت	رطوبت (درصد)	وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	تراکم نسبی (درصد)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
خاکریز ماسه	0	16/2	62	0	24

ثبت داده‌ها با استفاده از دستگاه PDA انجام شده که شامل تعداد ضربات کوبش، سرعت و نیروی شمع می‌باشد. دقت ثبت نتایج توسط دستگاه در حد هزارم میلی‌متر بوده و پس از برداشت نتایج و انجام تحلیل‌ها و کنترل‌های لازم، نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی شمع‌های مخروطی و استوانه‌ای با در نظر گرفتن تکرارپذیری حاصل شده است. میزان انرژی کوبشی اعمال شده به شمع‌ها در تمامی آزمایش‌ها یکسان بوده و با توجه به اینکه قطر سر شمع‌ها متفاوت می‌باشد، لذا میزان تنش وارده به آنها در اثر ضربه دارای مقادیر مختلف است و این مسئله در رفتار آنها نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. رفتار شمع با توجه به هندسه آن، در کاربری و قابلیت استفاده از آنها نیز حائز اهمیت بوده، لذا بررسی پارامترهای تعداد ضربات لازم برای نفوذ، سرعت و نفوذ هر شمع، کمک شایانی به شناخت رفتار آنها می‌نماید. نمودار تعداد ضربه نسبت به عمق نفوذ برای دو شمع استوانه‌ای و مخروطی که در خاک با تراکم نسبی متوسط کوبیده شده‌اند، در شکل (4) نشان داده شده است.



شکل (4): نمودار تعداد ضربه کوبش نسبت به عمق نفوذ برای دو شمع استوانه‌ای و مخروطی در خاک با تراکم متوسط

تعداد ضربات لازم برای کوبش شمع استوانه‌ای (C) برابر 52 ضربه و برای شمع با مقطع متغیر (T) برابر 31 ضربه اندازه‌گیری گردید. در اینجا مشاهده می‌شود که شمع مخروطی کامل با تعداد ضربات کمتری نسبت به شمع استوانه‌ای در خاکریز خاک ماسه‌ای کوبیده شده و این مسئله عملکرد بهتر شمع مخروطی را

شکل (3) سیستم شمع کوبی شمع‌های با مقاطع غیریکنواخت را در خاکریز ماسه‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، ابزار دقیق شتاب‌سنج و کرنش‌سنج در فاصله 34 سانتیمتری از سر شمع نصب شده و همچنین طول شمع‌ها به منظور کنترل فرآیند شمع کوبی، در فواصل هر 5 سانتیمتر اندازه‌گذاری شده است.



الف) شمع مخروطی



ب) شمع استوانه‌ای

شکل (3): سیستم شمع کوبی در خاکریز ماسه‌ای

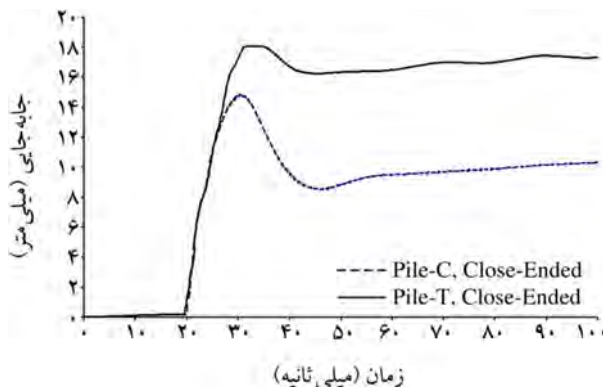
انتگرال گیری با توجه به بیشتر بودن زمان استهلاک امواج بزرگ تر است، لذا نفوذ شمع مخروطی در خاکریز ماسه‌ای بیشتر از شمع استوانه‌ای به دست می‌آید.

### 3- آزمایش کوبش شمع‌های با مقاطع متغیر ته‌باز در خاکریز ماسه‌ای

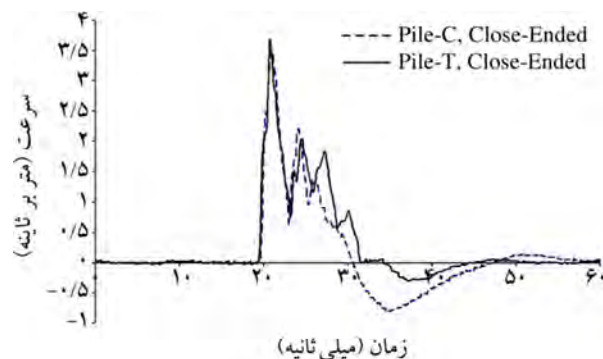
در تمامی آزمایش‌های شمع کوبی انجام شده که در بخش قبل به آن اشاره شد، قسمت انتهایی شمع به صورت ته‌بسته بوده، به طوری که در هنگام کوبیدن و فرو رفتن شمع در خاک، اجازه ورود خاک به فضای خالی داخل شمع و بالا رفتن در آن داده نشده و هیچ گونه اندرکنشی بین خاک و شمع در این محدوده وجود ندارد. در این قسمت، به منظور بررسی تأثیر نوک شمع در فرآیند کوبش مطابق شکل (7)، آزمایش‌هایی بر روی دو شمع (T) و (C) ته‌باز در خاکریز ماسه‌ای انجام شده است. در اینجا نیز طول و حجم شمع‌ها یکسان بوده و پس از قرارگیری در عمق مدفون نیم متری، تحت ضربه چکش با انرژی سقوط از 50 سانتیمتری قرار می‌گیرند. با مقایسه تعداد ضربات کوبش برای این شمع‌ها در دو حالت ته‌بسته و ته‌باز مطابق شکل (8)، مشاهده می‌گردد که شمع‌های (T) و (C) ته‌باز به ترتیب با 26 و 38 ضربه در خاک کوبیده می‌شوند. ارتفاع خاک وارد شده در فضای خالی شمع‌ها نیز پس از کوبش اندازه‌گیری گردید که در شمع استوانه‌ای ته‌باز برابر 115 سانتی‌متر و برای شمع مخروطی ته‌باز 106 سانتی‌متر بوده است.

از نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که در شمع استوانه‌ای، شرایط باز یا بسته بودن نوک شمع تأثیر بسیار زیادی در فرآیند کوبش دارد. در شمع استوانه‌ای ته‌باز به علت اینکه سطح مقطع در کل طول آن ثابت است، در اثر هر ضربه گسیختگی برشی منگنه‌ای در خاک ایجاد کرده و نفوذ بیشتری دارد و در نتیجه راحت‌تر در خاک فرو می‌رود. قابل ذکر است که در حین فرو رفتن شمع در خاک، قسمتی از خاک زیر شمع در داخل جداره وارد شده و پس از خارج نمودن شمع از خاک، مشاهده گردید این خاک در داخل جداره بسیار متراکم شده است، شکل (9). لذا با اعمال انرژی یکسان در حین عملیات

نسبت به شمع استوانه‌ای نشان می‌دهد. شکل (5) نمودار تغییرات نفوذ و شکل (6) نمودار تغییرات سرعت نسبت به زمان را برای ضربه نهایی وارده بر سر شمع نشان می‌دهد.



شکل (5): نمودار تغییرات نفوذ شمع استوانه‌ای و مخروطی با کوبش در خاکریز ماسه‌ای



شکل (6): نمودار تغییرات سرعت برای کوبش شمع استوانه‌ای و مخروطی در خاکریز ماسه‌ای

از نمودارهای اندازه‌گیری شده نتیجه‌گیری می‌شود که شمع‌های مخروطی دارای نفوذ نهایی بیشتری نسبت به شمع‌های استوانه‌ای بوده و راحت‌تر در خاک کوبیده می‌شوند. نکته‌ی حائز اهمیت با توجه به نمودار سرعت کوبش شمع در خاک‌های سست این است که سرعت در شمع استوانه‌ای، در این حالت نیز نسبت به شمع مخروطی کمتر است. علت این پدیده، بیشتر بودن نوسانات در شمع مخروطی نسبت به شمع استوانه‌ای بوده و به دلیل ارتعاشات زیاد شمع، امواج منتشر شده در مدت زمان طولانی‌تری مستهلک می‌شوند. با توجه به اینکه انتگرال زیر، منحنی سرعت برابر نفوذ بوده و برای شمع مخروطی، بازه این

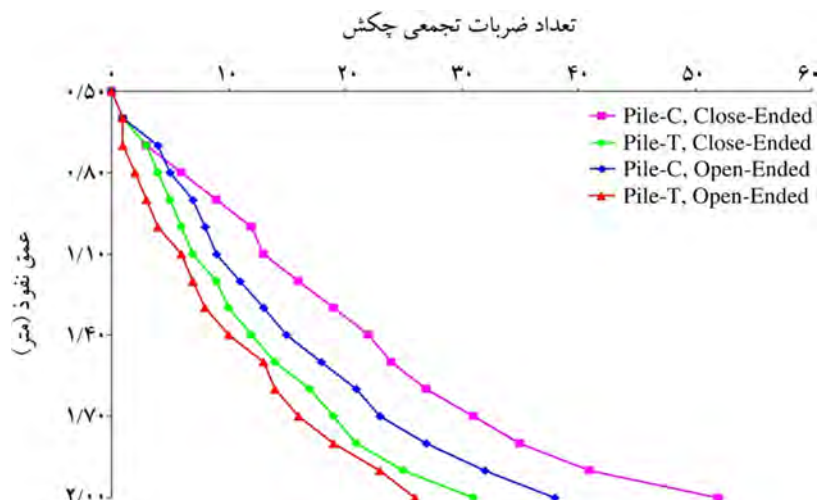


(ب) ته باز



(الف) ته بسته

شکل (7): شمع‌های فلزی استوانه‌ای و مخروطی شکل ساخته شده در دو حالت



شکل (8): مقایسه تعداد ضربات لازم جهت کوبش شمع استوانه‌ای و مخروطی ته‌باز و ته‌بسته در خاکریز ماسه‌ای



(ب) مخروطی

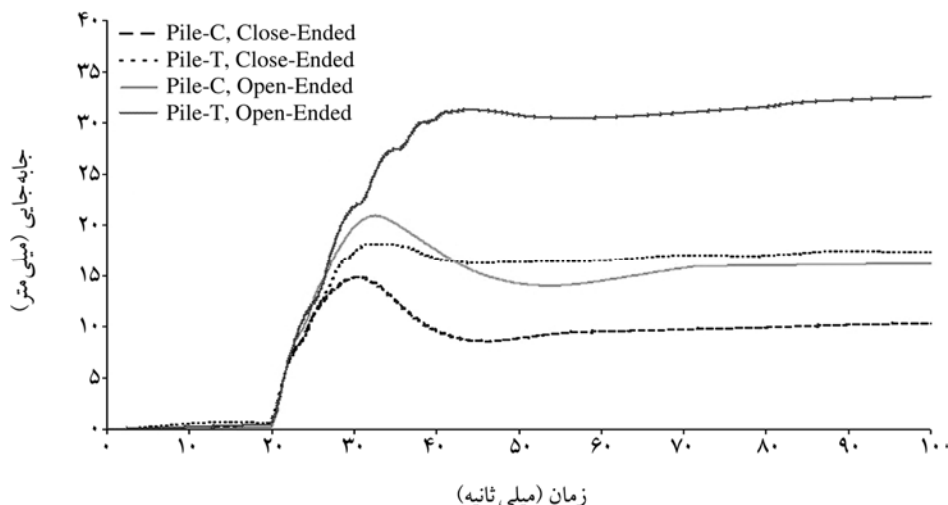


(الف) استوانه‌ای

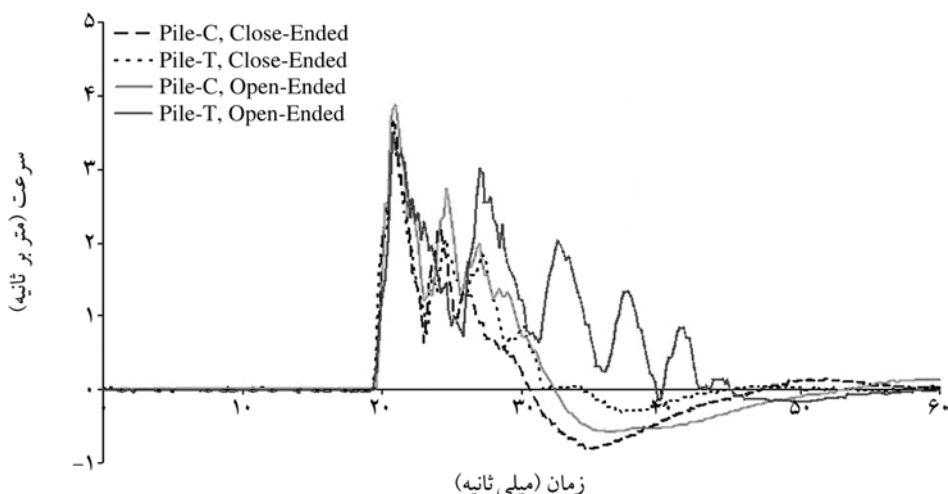
شکل (9): متراکم شدن خاک وارد شده در فضای داخلی شمع ته‌باز

نمودار تغییرات نفوذ نهایی و سرعت شمع نسبت به زمان برای کوبش شمع‌های ته‌بسته و ته‌باز در شکل‌های (10) و (11) نشان داده شده است. شمع مخروطی ته‌باز دارای نفوذ نهایی 32/495 میلی‌متر بوده و شمع مخروطی ته‌بسته 17/308 میلی‌متر در خاک نفوذ می‌کند. همچنین شمع استوانه‌ای ته‌بسته و ته‌باز به ترتیب دارای نفوذ 10/267 میلی‌متر و 16/171 میلی‌متر می‌باشند. اگر به نمودار تغییرات سرعت شمع در حالت ته‌باز و ته‌بسته بودن دقت شود، مشاهده می‌گردد که زمان استهلاک امواج منتشره ناشی از ضربه، در شمع‌های ته‌باز بیشتر از شمع‌های ته‌بسته می‌باشد و این مسئله موجب می‌گردد که سرعت این شمع‌ها نسبت به حالت ته‌بسته بیشتر شده و در نتیجه نفوذ نهایی نیز بزرگ‌تر باشد.

کوبش، شمع استوانه‌ای ته‌باز عملکرد بهتری نسبت به شمع استوانه‌ای ته‌بسته دارد. در خصوص شمع مخروطی ته‌باز نیز وارد شدن خاک به داخل جداره آن دیده شده، ولی به دلیل اینکه سطح مقطع شمع از پایین به بالا افزایش می‌یابد، حجم فضای داخلی شمع بیشتر می‌شود. در حین کوبش، خاک زیر ابتدا به دلیل سطح مقطع کم نوک شمع، بسیار متراکم شده ولی پس از ورود به داخل شمع به دلیل باز شدگی مقطع، از تراکم آن کاسته و فقط سطح مقطع نوک شمع که در تماس با خاک است دارای تراکم می‌باشد. بنابراین با بررسی نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌گردد که شمع مخروطی شکل ته‌باز عملکرد بهتری نسبت به سایر شمع‌ها با هندسه مختلف دارد.



شکل (10): مقایسه نمودار تغییرات نفوذ شمع استوانه‌ای و مخروطی ته‌باز و ته‌بسته در خاکریز ماسه‌ای



شکل (11): مقایسه نمودار تغییرات سرعت کوبش شمع استوانه‌ای و مخروطی ته‌باز و ته‌بسته در خاکریز ماسه‌ای

ساختگاه کوئیده می شوند، اغلب به دلیل تسهیل نفوذ در خاک، انتهای شمع به صورت ته بسته و نوک تیز ساخته شده و مورد استفاده قرار می گیرد. در این قسمت رفتار شمع های توخالی که در فرآیند کوبش تحت ضربه چکش قرار می گیرند، در مقایسه با شمع های توپر که در پژوهش قضاوی و توسلی [7] توضیح داده شد، بررسی و تحلیل گردیده است.

در بخش قبل با انجام آزمایش های واقعی شناخت کافی در خصوص رفتار شمع های توخالی با مقاطع متغیر تحت کوبش به دست آمد. در اینجا دو شمع استوانه ای C و مخروطی T که دارای ارتفاع 16 متر بوده و به صورت کاملاً مدفون در خاک قرار می گیرند، در نظر گرفته شده است. همچنین همگی این شمع ها در حالت توپر و توخالی، دارای سطحی جانبی و حجم برابر می باشند. انتهای شمع های توخالی در واقعیت به دو صورت ته باز و ته بسته ساخته شده و در اینجا شمع نیز در هر دو حالت در نظر گرفته می شود. در صورتی که نوک شمع بسته باشد، خاک زیر در اثر نفوذ شمع، اجازه ورود به فضای خالی داخل آن را نمی یابد، ولی در حالتی که انتهای شمع باز باشد، در اثر اعمال ضربه و فرو رفتن شمع در زمین، خاک زیر شمع نیز در فضای خالی داخل شمع وارد شده و آن را پر می نماید. در این حالت علاوه بر جداره خارجی شمع، جداره داخلی آن نیز با خاک درگیر بوده و باعث افزایش اصطکاک سطح داخلی شمع و خاک می گردد؛ بنابراین در سطح جانبی داخلی شمع نیز در تماس با خاک، لازم است المان حد واسط (بر هم کنش) خاک و شمع لحاظ شده و در مدلسازی و محاسبات تأثیر داده شود. در تحلیل کوبش این گونه شمع ها، مشخصات هندسی خاک و شمع، مدل رفتاری آنها، تابع نیروی وارده چکش به سر شمع و همچنین تمامی شرایط اولیه و مرزی استاتیکی و دینامیکی آنها، مطابق پژوهش قضاوی و توسلی [7]، لحاظ گردیده است. همچنین در اینجا تحلیل عددی کوبش شمع های توخالی علاوه بر خاک رس، در خاک ماسه ای نیز بررسی شده که مشخصات آنها به شرح جدول (2) می باشد. ضریب میرایی خاک در همه تحلیل ها معادل 5 درصد لحاظ شده است.

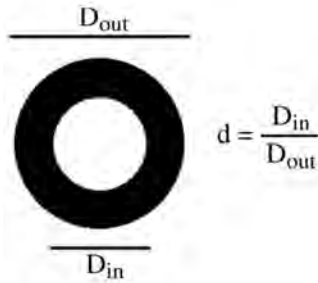
بنابراین از مقایسه نتایج به دست آمده مطابق نمودارهای سرعت و نفوذ شمع، استنباط می گردد که میزان نفوذ نهایی و سرعت شمع مخروطی ته باز از شمع استوانه ای ته باز بیشتر بوده و در حالتی کلی نیز وقتی انتهای شمع به صورت ته باز باشد، راندمان و عملکرد شمع نسبت به شمع های ته بسته در کوبش بیشتر می باشد.

#### 4- بررسی عددی رفتار شمع های توخالی تحت کوبش

برای بررسی عددی فرآیند کوبش شمع ها در خاک، مدل سازی شمع و خاک به صورت یک محیط پیوسته مورد توجه قرار گرفته و بدین منظور نرم افزار FLAC سه بعدی [8] که بر اساس روش عددی تفاضل محدود استوار بوده، جهت انجام تحلیل ها استفاده شده است. شبیه سازی واقعی رفتار شمع و خاک در فرآیند کوبش و اخذ نتایج کاربردی، علت واقعی استفاده از این نرم افزار و بررسی مسئله کوبش در حالت سه بعدی بوده است. انتخاب مدل رفتاری مناسب برای هر یک از مصالح از جمله نکات مهم در روش های عددی بوده و در صورت عدم تطابق مشخصات رفتاری مصالح با مشخصات مدل انتخاب شده، پاسخ های به دست آمده با واقعیت فاصله زیادی خواهند داشت [9 و 10]. از جمله مهم ترین مدل هایی که در مورد مصالح خاکی کاربرد فراوانی دارد، مدل الاستو پلاستیک موهر-کولمب و یا الاستو پلاستیک کامل می باشد. در مدل موهر-کولمب رویه تسلیم فضای سه بعدی به سه بخش داخل رویه، سطح رویه و خارج رویه تقسیم می شود. همچنین برای قسمت های سازه ای که شامل شمع است از مدل رفتاری الاستیک استفاده شده است که فقط نیازمند دو پارامتر الاستیک است. همچنین نوع المان بندی و اندازه المان ها در تحلیل عددی مسائل مهندسی ژئوتکنیک از اهمیت بسیاری برخوردار است. به طوری که بایستی در محل اتصال شمع و خاک، جهت افزایش دقت نتایج، اندازه المان ها کوچک تر از بقیه نواحی مدل در نظر گرفته شود [11 و 12].

در پروژه های اجرایی شمع کوبی که شمع های پیش ساخته در



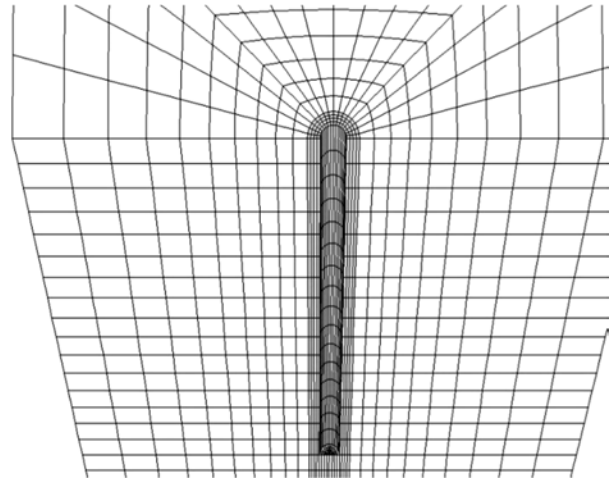


شکل (13): نسبت قطر داخلی به قطر خارجی در شمع توخالی

در این قسمت شمع استوانه‌ای و مخروطی ته‌بسته را با نسبت‌های مختلف قطر داخلی به قطر خارجی در نظر گرفته که تحت اثر ضربه در دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی کوبیده می‌شوند. همان‌طور که گفته شد، در این حالت خاک زیر نوک شمع به دلیل بسته بودن انتهای آن، اجازه ورود به فضای خالی داخل آن را در اثر نفوذ در زمین نمی‌یابد. شکل‌های (14) و (15)، نتایج سرعت و جابه‌جایی شمع استوانه‌ای توخالی ته‌بسته را در خاک رس نشان می‌دهد. هنگامی که این شمع تحت ضربه چکش قرار می‌گیرد، سرعت و جابه‌جایی این شمع‌ها در مقایسه با شمع توپر افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت قطر داخلی به قطر خارجی یا به عبارتی کاهش ضخامت جداره شمع، سرعت و جابه‌جایی شمع نیز بیشتر می‌شود.

در شکل‌های (16) و (17) نشان داده شده است. با مقایسه نتایج به‌دست آمده با نمودارهای نتایج رفتار شمع کوبیده شده در

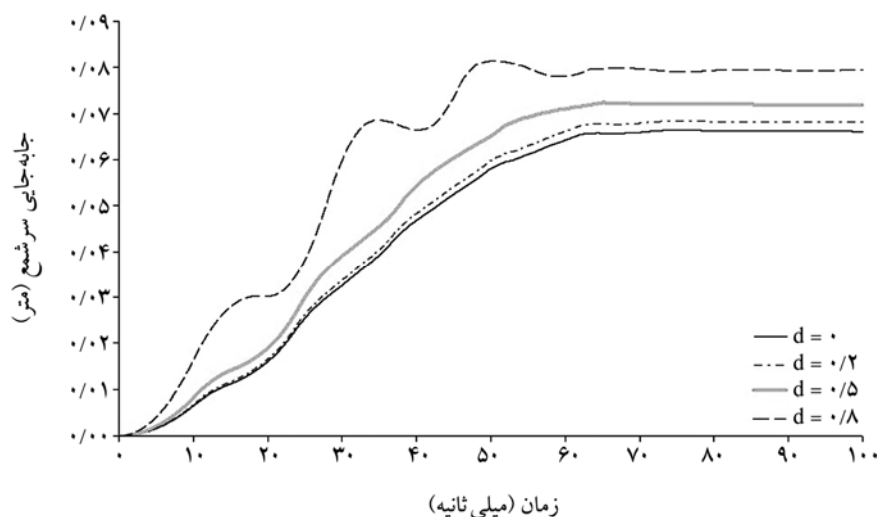
شکل (12) سیستم شمع و خاک در حالت سه‌بعدی جهت فرآیند کوبش شمع‌های توخالی را نشان می‌دهد. نسبت قطر داخلی به قطر خارجی شمع مطابق شکل (13) نیز با ضریب  $d$  نمایش داده شده است.



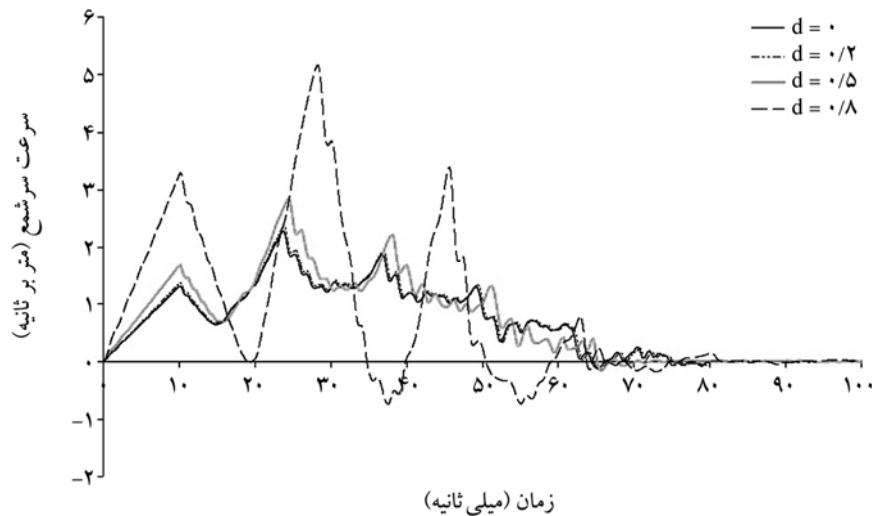
شکل (12): مدل سه‌بعدی سیستم شمع توخالی و خاک در فرآیند کوبش

جدول (2): مشخصات مکانیکی خاک مورد استفاده در تحلیل رفتار شمع توخالی

خاک	مدل رفتاری	E (MPa)	n	C (MPa)	f (درجه)
رسی	موهر-کولمب	10	0/35	$z^2$	0
ماسه‌ای	موهر-کولمب	100	0/30	0	30



شکل (14): نمودار نفوذ نهایی شمع لوله‌ای استوانه‌ای در خاک رس به ازای تغییرات نسبت قطر داخلی به قطر خارجی

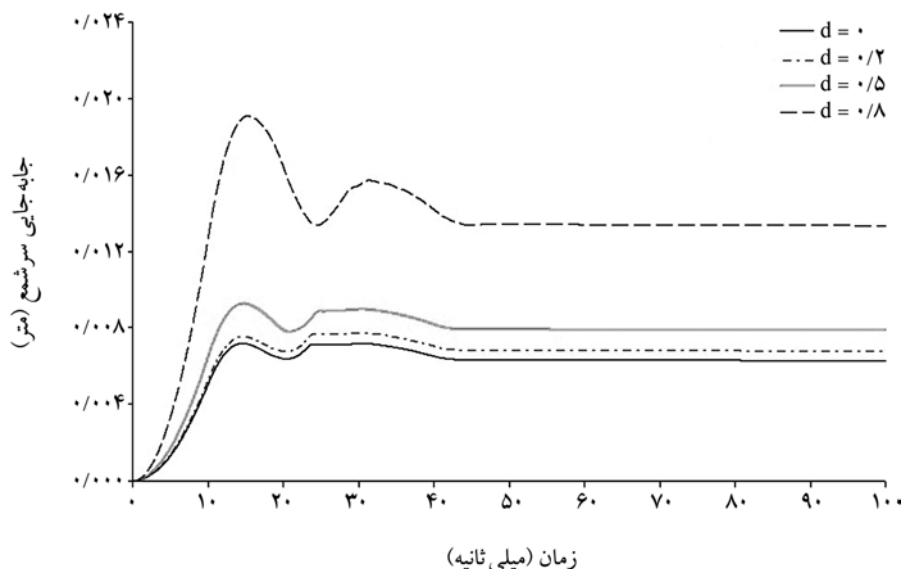


شکل (15): نمودار تغییرات سرعت شمع لوله‌ای استوانه‌ای در خاک رس به ازای تغییرات نسبت قطر داخلی به قطر خارجی

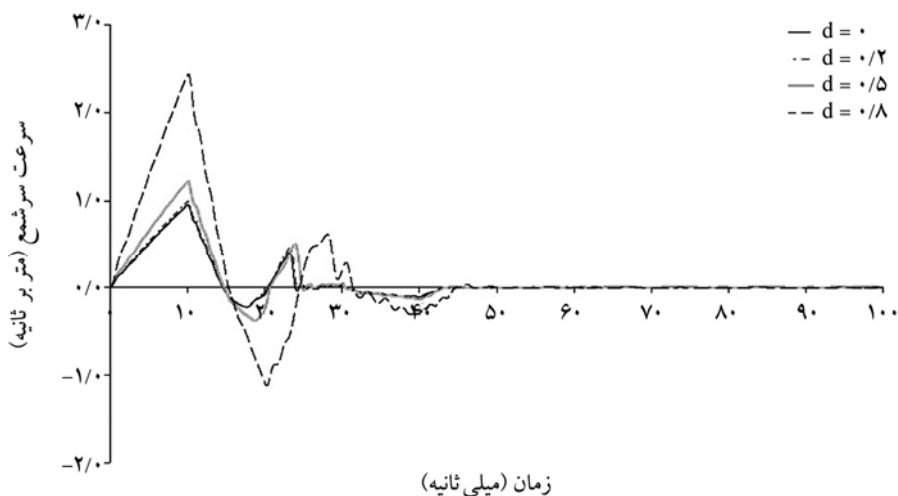
کوبش این گونه شمع‌ها در خاک رس و ماسه‌ای در شکل‌های (18) تا (21) نمایش داده شده است. در این حالت نیز سرعت و جابه‌جایی این شمع‌ها در مقایسه با شمع توپر افزایش یافته و همچنین سرعت و جابه‌جایی شمع‌های غیر استوانه‌ای نسبت به شمع استوانه‌ای در حالت توخالی نیز بیشتر می‌باشد. همچنین مطابق آنچه قبلاً گفته شد، سرعت و جابه‌جایی رأس شمع در اثر کوبش در خاک ماسه‌ای در مقایسه با خاک رس کمتر بوده و با افزایش ضخامت جداره شمع نیز، سرعت و نفوذ نهایی کاهش می‌یابند.

خاک رس، مشاهده می‌گردد که میزان سرعت و نفوذ کوبش شمع در خاک ماسه‌ای کاهش یافته و میزان نوسان نمودارها و دامنه آن نیز در اثر اعمال بار چکش کمتر شده است. همچنین در خاک ماسه‌ای، ارتعاشات حاصل از ضربه چکش در زمان زودتری مستهلک شده و تعداد نوسانات جداره شمع کاهش می‌یابد.

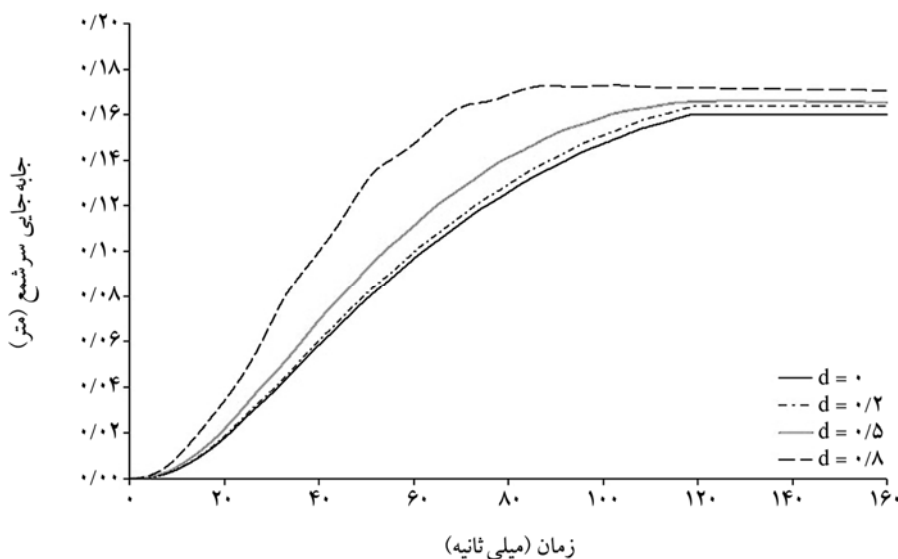
در ادامه، فرآیند کوبش شمع‌های غیر استوانه‌ای توخالی که انتهای آنها به صورت بسته می‌باشد، بررسی شده است. پس از انجام تحلیل‌ها و استخراج نتایج، نمودارهای سرعت و جابه‌جایی



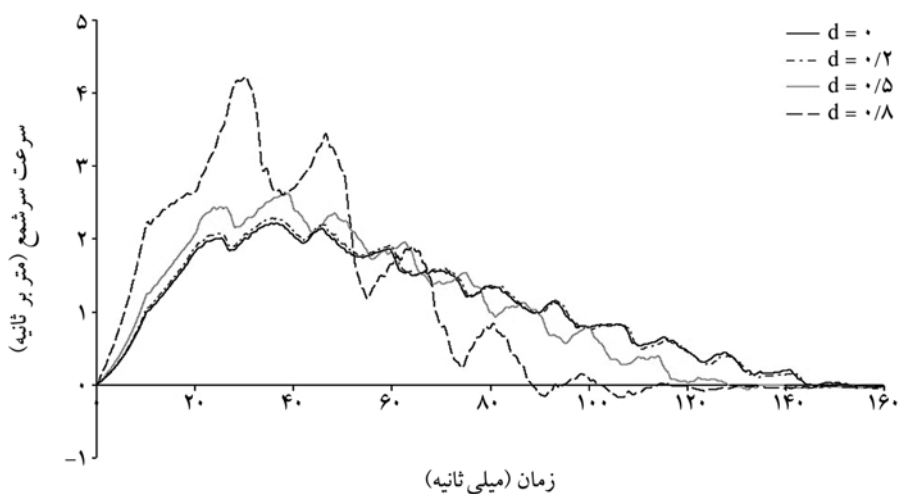
شکل (16): نمودار تغییرات نفوذ نهایی شمع لوله‌ای استوانه‌ای در خاک ماسه‌ای به ازای تغییرات نسبت قطر داخلی به قطر خارجی



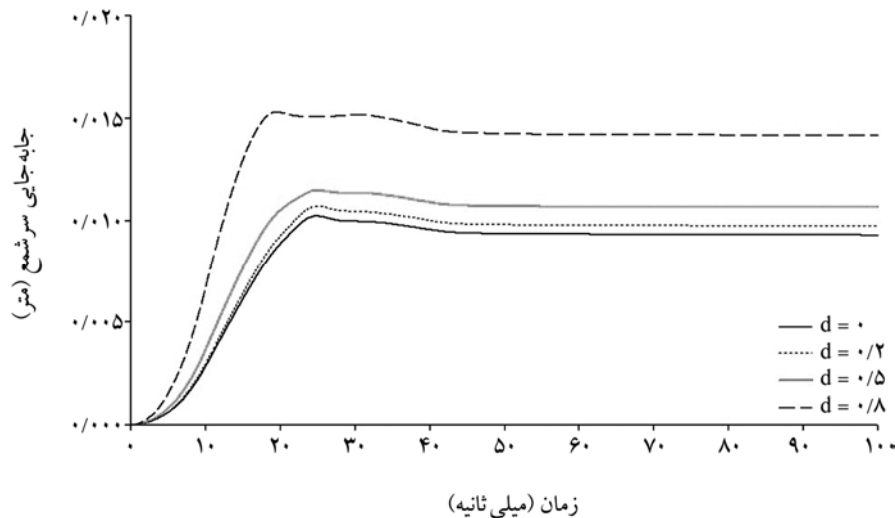
شکل (17): نمودار تغییرات سرعت شمع لوله‌ای استوانه‌ای در خاک ماسه‌ای به ازای تغییرات نسبت قطر داخلی به قطر خارجی



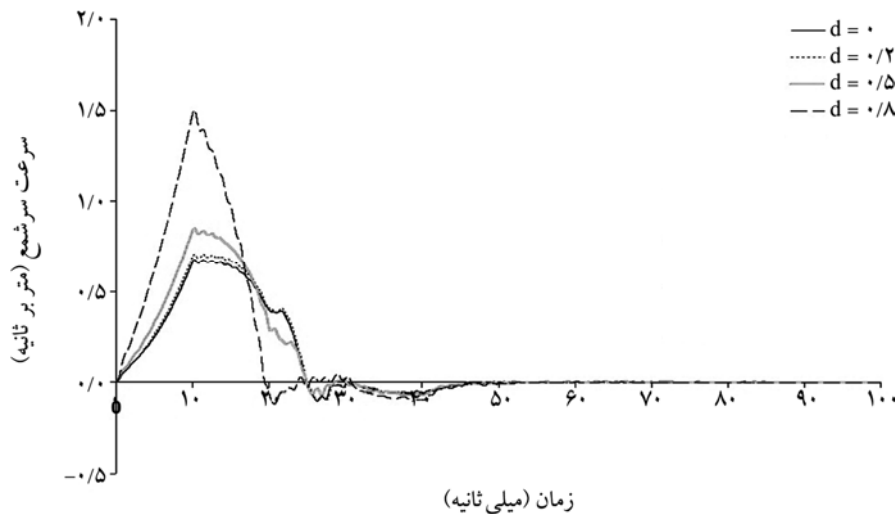
شکل (18): نمودار تغییرات نفوذ نهایی شمع لوله‌ای مخروطی در خاک رس به ازای تغییرات نسبت قطر داخلی به قطر خارجی



شکل (19): نمودار تغییرات سرعت شمع لوله‌ای مخروطی در خاک رس به ازای تغییرات نسبت قطر داخلی به قطر خارجی



شکل (20): نمودار تغییرات نفوذ نهایی شمع لوله‌ای مخروطی در خاک ماسه‌ای به ازای تغییرات نسبت قطر داخلی به قطر خارجی



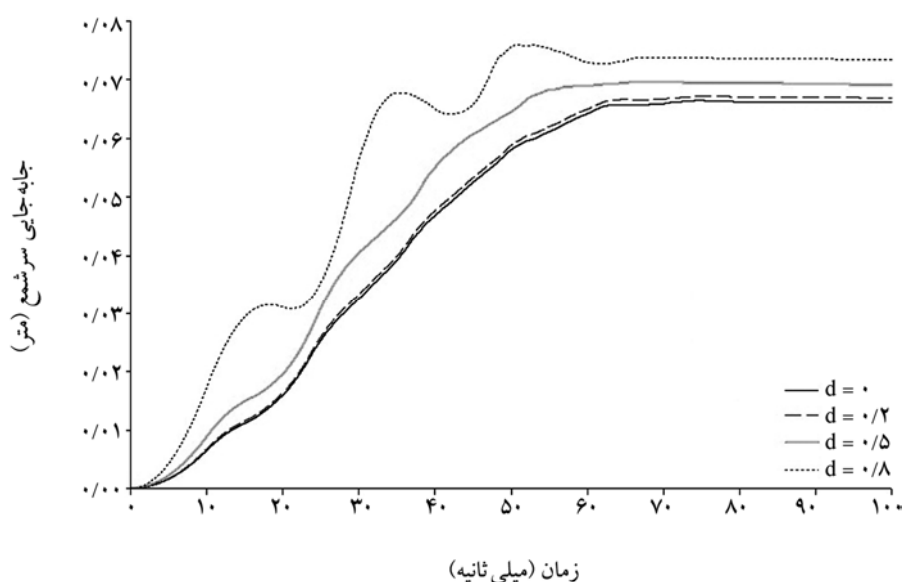
شکل (21): نمودار تغییرات سرعت شمع لوله‌ای مخروطی در خاک ماسه‌ای به ازای تغییرات نسبت قطر داخلی به قطر خارجی

داخلی به قطر خارجی مختلف که به وسیله ضربه چکش در خاک رسی و ماسه‌ای فرو رانده می‌شوند، تحلیل و بررسی شده است. در این حالت هنگام فرو رفتن شمع در زمین تحت ضربه چکش، خاک زیر آن وارد فضای خالی داخلی شمع شده و به جداره داخلی آن متناسب با ارتفاع خاک وارد شده، تنش وارد می‌شود. به این علت جداره داخلی شمع نیز با خاک درگیر شده و اصطکاک جداری شمع و خاک بیشتر گردیده و در نتیجه نیروهای مقاوم بسیج شده در برابر جابه‌جایی شمع در خاک افزایش می‌یابد. لذا برای مدل‌سازی

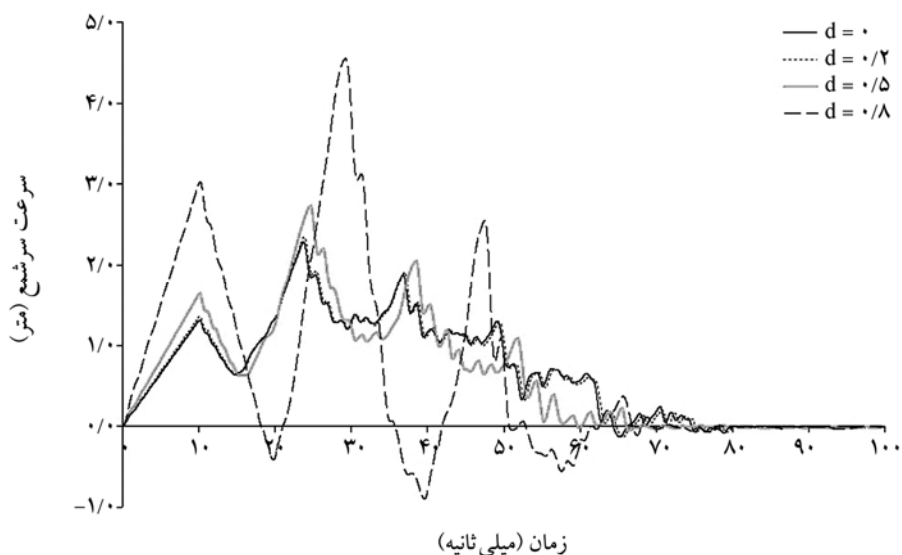
بنابراین با مقایسه نتایج رفتار شمع‌های توخالی با مقاطع متغیر در حین کوبش، ملاحظه می‌گردد که شمع با مقطع غیریکنواخت در این حالت نیز دارای عملکرد بهتری نسبت به شمع استوانه‌ای بوده و با طراحی مناسب ابعاد و هندسه آن به منظور جلوگیری از کماتش و لهیدگی در حین کوبش و همچنین کنترل سلامت شمع در هنگام اجرا، افزایش راندمان عملیات اجرایی حاصل گردیده و در موجب بهینه‌شدن مصرف انرژی و در نتیجه صرفه‌جویی اقتصادی خواهد شد. در این بخش کوبش شمع استوانه‌ای ته‌باز با نسبت قطر

ته‌باز را به ترتیب در خاک رس و ماسه‌ای نشان می‌دهد. مجدداً ملاحظه می‌شود که وقتی این شمع‌های ته‌باز تحت ضربه چکش قرار می‌گیرد، سرعت و جابه‌جایی این شمع‌ها در مقایسه با شمع توپر افزایش یافته ولی به دلیل وجود اصطکاک در جداره داخلی شمع علاوه بر جداره خارجی آن، نتایج به دست آمده نسبت به شمع‌های ته‌بسته کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت قطر داخلی به قطر خارجی سرعت و جابه‌جایی شمع نیز بیشتر می‌شود.

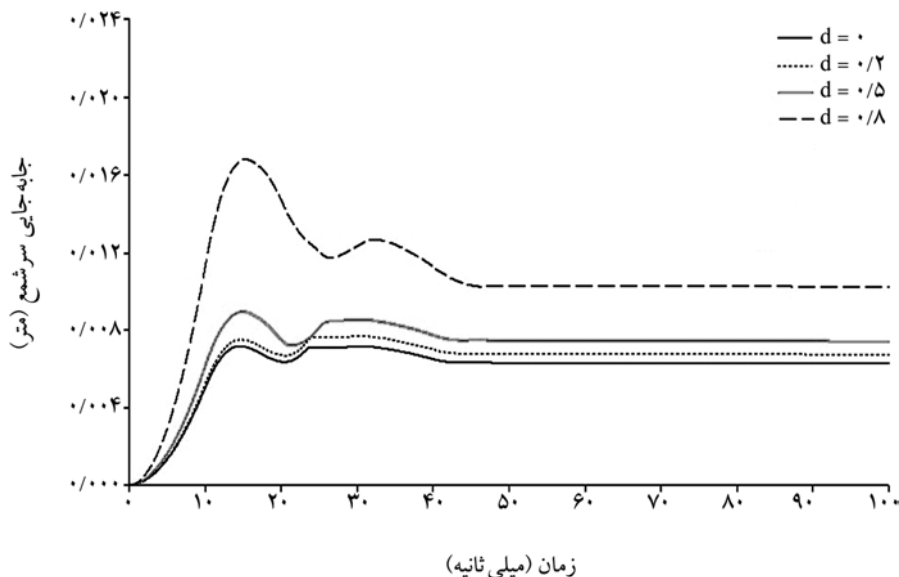
این پدیده، در سطح جانبی داخلی شمع در تماس با خاک نیز المان‌های اندرکنش خاک و شمع به صورت سختی‌های برشی و نرمال لحاظ شده و در محاسبات تأثیر داده می‌شود. در اینجا نیز تمامی فرآیندها و تحلیل‌های انجام شده برای شمع‌های توخالی ته‌بسته، مجدداً با در نظر گرفتن پدیده بالاروندگی خاک در شمع تکرار شده و نتایج سرعت و جابه‌جایی برای سر شمع استخراج شده است. شکل‌های (22) تا (25)، نتایج سرعت و جابه‌جایی شمع استوانه‌ای توخالی



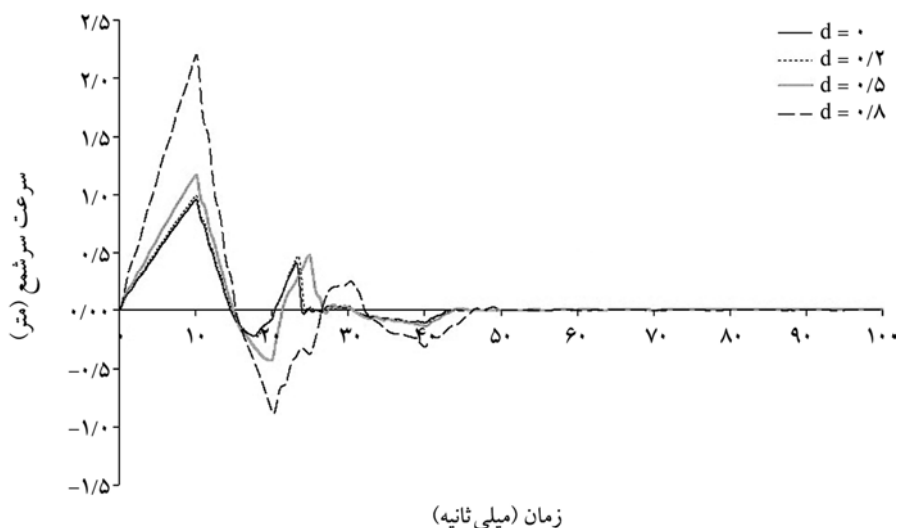
شکل (22): نمودار تغییرات نفوذ نهایی شمع لوله‌ای استوانه‌ای ته‌باز در خاک رس به ازای تغییرات نسبت قطر داخلی به قطر خارجی



شکل (23): نمودار تغییرات سرعت شمع لوله‌ای استوانه‌ای ته‌باز در خاک رس به ازای تغییرات نسبت قطر داخلی به قطر خارجی



شکل (24): نمودار تغییرات نفوذ نهایی شمع لوله‌ای استوانه‌ای ته‌باز در خاک ماسه‌ای به ازای تغییرات نسبت قطر داخلی به قطر خارجی



شکل (25): نمودار تغییرات سرعت شمع لوله‌ای استوانه‌ای ته‌باز در خاک ماسه‌ای به ازای تغییرات نسبت قطر داخلی به قطر خارجی

## 5- نتیجه گیری

رفتار شمع و خاک را در هنگام کوبش شمع تحلیل نموده و از اطلاعات و نتایج حاصل از آن در مراحل مختلف طراحی و اجرای شمع‌ها استفاده نمود. آزمایش‌ها در خاکریز ماسه‌ای که با حالت سست انباشته شده، انجام گردیده و تمامی شمع‌ها دارای طول، مساحت جانبی و حجم یکسان می‌باشند. ثبت داده‌ها با استفاده از دستگاه PDA انجام شده، که شامل تعداد ضربات کوبش، سرعت و نیروی شمع می‌باشد. پس از برداشت نتایج و انجام تحلیل‌ها و کنترل‌های لازم، نتایج آزمایش‌های انجام شده

در این پژوهش به بررسی و تحلیل فرآیند کوبش شمع‌های پیش‌ساخته فلزی استوانه‌ای و مخروطی پرداخته شد. این مسئله موجب شناخت بیشتر این فرآیند گردیده و در جهت افزایش راندمان و بهینه‌سازی عملیات اجرایی مربوطه کاربرد فراوانی دارد. از جمله روش‌های بررسی مسائل کوبش استفاده از نتایج آزمایش‌های واقعی و روش عددی تفاضل محدود با کمک نرم‌افزار FLAC3D می‌باشد، به گونه‌ای که بتوان به شکلی منطقی

2. Chow, Y.K. (1981) *Dynamic Behaviour of Piles*. Ph.D. Thesis, University of Manchester, U.K.
3. Chow, Y.K. and Smith, L.M. (1984) A numerical model for the analysis of pile drivability. *Proceedings 2<sup>nd</sup> International Conference on the Application of Stress Waves to Piles*, Sweden, 319-325.
4. Mabsout, M.E. and Tassoulas, J.L. (1994) A finite element model for the simulation of pile driving. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, **37**, 257-278.
5. Mabsout, M.E., Reese, L.C., and Tassoulas, J.L. (1995) Study of pile driving by finite-element method. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **121**(7), 535-543
6. Sakr, M., El Naggar, M.H., and Nehdi, M. (2007) Wave equation analyses of tapered FRP-concrete piles in dense sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**, 168-188.
7. Ghazavi, M. and Tavasoli, O. (2012) Characteristics of non-uniform cross-section piles in drivability. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **43**, 287-299.
8. Itasca (2002) Fast lagrangian analysis of continua in three dimensions (FLAC3D). Version 2.10, Itasca Consulting Group, Inc. Minnesota.
9. Ghazavi, M. (2007) Analysis of kinematic seismic response of tapered piles. *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, **25**(1), 37-44.
10. Ghazavi, M. (2008) Response of tapered piles to axial harmonic loading. *Canadian Geotechnical Journal*, **45**(11), 1622-1628.
11. Ghazavi, M. and Tavasoli, O. (2008) Numerical analysis for pile geometry effect on drivability. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on the Application of the Stress-Wave Theory to Piles*, Lisbon, Portugal.
12. Ghazavi, M. and Tavasoli, O. (2008) Numerical analysis of drivability of non-uniform pile. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Arlington, Washington DC, USA, August 2008.

بر روی شمع‌های با مقاطع غیریکنواخت حاصل شده است. در خاکریز ماسه‌ای که با حالت سست انباشته شده نیز، شمع استوانه‌ای و مخروطی در دو حالت تهباز و تهبسته کوبیده شده‌اند.

با مقایسه نمودارها و نتایج به دست آمده از رفتار شمع‌های با هندسه‌ی مختلف تحت کوبش، نتایج به شرح زیر حاصل می‌گردد:

1- هندسه و شکل شمع در رفتار کوبشی آنها تأثیر مستقیم داشته، به طوری که با استفاده از شمع مخروطی، سرعت و جابجایی این شمع‌ها افزایش یافته و در عین حال تعداد ضربه لازم برای فرو بردن آنها در خاک کاهش می‌یابد. لذا استفاده از شمع‌های با مقاطع غیریکنواخت در عملیات شمع کوبی علاوه بر کاهش مصرف انرژی به میزان 25 تا 60 درصد، موجب افزایش راندمان و بهره‌وری عملیات کوبش نیز می‌گردد.

2- در حالت‌های تهبسته و تهباز، شمع‌های مخروطی دارای نشست نهایی بیشتری نسبت به شمع‌های استوانه‌ای بوده و با تعداد ضربات کمتری در خاک کوبیده می‌شوند.

3- در شمع استوانه‌ای، شرایط باز یا بسته بودن نوک شمع تأثیر بسیار زیادی در فرآیند کوبش دارد. لذا با اعمال انرژی یکسان در حین عملیات کوبش، شمع استوانه‌ای تهباز عملکرد بهتری نسبت به شمع استوانه‌ای تهبسته دارد. همچنین میزان نشست نهایی و سرعت شمع مخروطی تهباز از شمع استوانه‌ای تهباز بیشتر بوده و در حالتی کلی نیز وقتی انتهای شمع به صورت تهباز باشد، راندمان و عملکرد شمع نسبت به شمع‌های تهبسته بیشتر می‌باشد و در مجموع شمع مخروطی تهباز عملکرد بهتری نسبت به سایر شمع‌ها با هندسه‌ی مختلف دارد.

## مراجع

1. Smith, E.A.L. (1960) Pile driving analysis by the wave equation. *J. Soil Mech. & Foundations*, Div. ASCE, **86**(4), 35-61.