

بررسی عددی روش‌های مختلف برجا در تخمین باربری شمع

مهدی رجحانی*^۱، علی فاخر^۲

^۱ استادیار دانشکده فنی، گروه مهندسی عمران، عضو پژوهشکده علوم و فن‌آوری‌های نوین، دانشگاه شاهد
^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

(دریافت: ۹۷/۸/۲۰، پذیرش: ۹۹/۲/۳۱، نشر آنلاین: ۹۹/۲/۳۱)

چکیده

با توجه به عدم اطمینان نتایج روابط متداول محاسبه ظرفیت باربری شمع‌ها، نیاز به انجام آزمایش‌های برجا محسوس است. هدف تحقیق ارائه شده در این مقاله مقایسه تئوریک آزمایش‌های برجای تعیین باربری شمع‌ها، به‌خصوص سه روش بارگذاری استاتیکی شمع، استفاده از روابط دینامیکی کوبش شمع (Dynamic Pile Driving Formula) و استفاده از روابط مبتنی بر تئوری موج تنشی می‌باشد. در این مقاله به کمک مدل‌سازی عددی کوبش شمع و آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع، نتایج به‌دست‌آمده از هر یک از سه روش فوق با هم و با نتایج حاصل از روابط متداول محاسبه ظرفیت باربری مقایسه شده است. در روش استفاده از روابط دینامیکی، از رابطه هیلی (Hiley) که تنها رابطه است که بر اساس مقدار فرورفت و برجهندگی سر شمع باربری را تخمین می‌زند، استفاده شده است. نتایج مقاله حاکی از آن است که روند تغییرات باربری در رابطه هیلی اصلاح شده و روش مبتنی بر تئوری موج، تطابق خوبی با سایر روش‌ها از جمله بارگذاری استاتیکی و روابط کلاسیک طراحی دارد. همچنین باربری به‌دست‌آمده از این دو روش، به دلیل ماهیت دینامیکی آن‌ها، از جواب سایر روش‌ها بزرگ‌تر است.

کلیدواژه‌ها: آزمون‌های برجای شمع، باربری شمع، رابطه هیلی، معادله موج، بارگذاری شمع.

۱- مقدمه

به دلیل خطاهای اندازه‌گیری است که موضوع مقاله حاضر نمی‌باشد، ولی بخش دیگر به تفاوت نظری این روش‌ها مربوط می‌شود. لذا بررسی تئوریک روش‌های مختلف در این مقاله بحث می‌شود. شایان‌ذکر است اگرچه مطالعات مختلفی پیرامون این روش‌ها از کارهای Fellenius (۱۹۷۵) و Randolph (۲۰۰۳) گرفته تا Rosenvinge و همکارانش (۲۰۰۴)، Bullock (۲۰۱۲)، Allin و همکاران (۲۰۱۵)، Rajagopal (۲۰۱۲)، Shooshpasha و همکاران (۲۰۱۶)، Zhussupbekov (۲۰۱۶) و Salgado (۲۰۱۷) انجام شده یا در حال انجام است، لیکن در اغلب موارد بررسی پیرامون یک روش یا مقایسه آن با نتایج روش دیگری انجام شده است. درحالی‌که در این مقاله با شبیه‌سازی عددی، سه روش متداول و نسبتاً رایج‌تر تخمین درجای ظرفیت باربری شمع با هم و با نتایج روابط طراحی شمع مقایسه شده‌اند. روش‌های بارگذاری استاتیکی، اندازه‌گیری برجهندگی شمع و روش مبتنی بر تئوری پخش موج، روش‌های مطالعه شده در این مقاله می‌باشند.

به دلیل عدم قطعیت‌های زیادی که در تعیین ظرفیت باربری شمع ناشی از تغییرات شرایط زیرسطحی ژئوتکنیکی، کمبودهای ذاتی روابط کلاسیک طراحی شمع و همچنین دست‌خوردگی و تغییر متغیرهای مکانیکی خاک اطراف شمع در حین اجرا وجود دارد، تعیین باربری شمع مبتنی بر اندازه‌گیری برجا در پروژه‌های مختلف متداول و ضروری است. اهمیت موضوع به‌حدی است که برخی مراجع طراحی مثل استاندارد آلمان، اجازه طراحی بدون اندازه‌گیری برجا را نمی‌دهند (Ulrich, ۲۰۰۳). جدول (۱) روش‌های برای این منظور را به‌همراه برخی مزایا و معایب آن‌ها نشان می‌دهد. اگرچه آزمایش بارگذاری استاتیکی دقیق‌تر از کلیه روش‌های دیگر است، ولی مشکلات اجرایی زیادی به‌خصوص در شمع‌های بزرگ دارد. بنابراین استفاده از روش‌های ساده‌تر مثل فرمول‌های دینامیکی یا روش‌های مبتنی بر تئوری پخش موج تنش ضروری است. نتایج حاصل از روش‌های مختلف تخمین باربری برجای شمع با یکدیگر تفاوت دارند، بخشی از این تفاوت

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲-۵۱۳۹۳۷۱

۲- مبانی تئوری و مرور ادبیات فنی

ساده‌ترین روش تخمین باربری شمع استفاده از روابط کلاسیک طراحی است. این روش‌ها صرفاً بر اساس مشخصات مکانیکی خاک مثل زاویه اصطکاک داخلی ϕ و چسبندگی C بنانهاده شده‌اند. روش‌های مختلفی بدین منظور در مراجع و کتب درسی موجود است، که به جهت اختصار از ذکر آن‌ها اجتناب می‌شود. در این مقاله برای تخمین باربری شمع با استفاده از روابط کلاسیک، از روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه انستیتو نفت آمریکا (API)^۱ استفاده شده است (API، ۲۰۰۰). در روش API، مقاومت نوک و جدار شمع مبتنی بر سطح مقطع نوک و سطح پیرامونی شمع و اعمال ضرایبی بر مشخصه‌های مقاومت برشی خاک تعیین می‌شود. با توجه به عدم اطمینان‌های روابط کلاسیک ظرفیت باربری در بسیاری از موارد انجام آزمایش‌های برجا برای تخمین باربری شمع اجتناب‌ناپذیر است. در ادامه سه روشی که در این مقاله برای مقایسه انتخاب شده‌اند، توضیح داده می‌شود.

۲-۱- آزمایش بارگذاری

آزمایش بارگذاری شمع یکی از قابل‌اعتمادترین آزمایش‌هایی است که برای تعیین باربری شمع انجام می‌شود. از مشکلات عمده

انجام این آزمایش طولانی بودن و هزینه‌های بسیار بالای آن است (Fellenius، ۱۹۷۵). این مشکلات عمدتاً به‌دلیل فراهم آوردن نیروی عکس‌العمل جک‌های بارگذاری با بار مرده یا شمع‌های کششی می‌باشد. ضمناً تأمین جک با ظرفیت کافی و تیر بارگذاری نیز مشکل است. این امر ممکن است منجر به عدم انجام آزمایش در برخی پروژه‌ها به‌دلیل مشکلات اجرایی شود. هر چند که با وجود روش‌های ساده‌تر دیگر، به‌علت دقت بالا همچنان این روش جایگاه ویژه و با اهمیتی دارد و بایستی برای کالیبره کردن بسیاری از روش‌ها موردتوجه قرار گیرد (Rajagopal، ۲۰۱۲). اگر قدرت سیستم بارگذاری برای اعمال بار بر شمع تا حد گسیختگی کفایت نکند، آنگاه روش‌های مختلفی برای تفسیر نتایج و تخمین باربری نهایی به‌کار می‌رود. این حالت در بسیاری از پروژه‌ها وجود دارد. یکی از این روش‌ها، روش چین-کندنر^۲ است که به‌طور مختصر شرح داده می‌شود (Fakher و Khodaparast، ۱۳۷۷). برای استفاده از این روش ابتدا باید منحنی (تغییر مکان- بار) تغییر مکان) را رسم کرد (شکل (۱)) و شیب قسمت مستقیم منحنی را به‌دست آورد. باربری نهایی شمع عکس شیب به‌دست‌آمده می‌باشد.

جدول ۱- روش‌های برجا برای تخمین باربری شمع

روش	دقت	هزینه	تجهیزات	توضیح
بارگذاری استاتیکی	بسیار خوب	بسیار بالا	ساده	عدم امکان بار گسیختگی زیاد بسیار زمان‌بر عدم امکان تفکیک مقاومت نوک و جدار دشواری انتخاب روش تفسیر مناسب
فرمول‌های دینامیکی (Chellis، ۱۹۶۱؛ Fleming و همکاران، ۱۹۸۶؛ Mohan، ۱۹۹۰؛ Poulos و Davis، ۱۹۹۰)	نسبتاً خوب	بسیار کم	بسیار ساده	عدم در نظر گرفتن تمام عوامل مؤثر در کوبش عدم در نظر گرفتن اثراتی مانند کاهش اصطکاک در گروه شمع عدم امکان تفکیک مقاومت نوک و جدار کاربرد بیشتر در خاک‌های دانه‌ای تعدد فرمول‌ها و دشواری انتخاب فرمول مناسب در شرایط مختلف انجام خیلی سریع
آزمون‌های دینامیکی بر مبنای تئوری موج تنشی (Chellis، ۱۹۶۱؛ Fleming و همکاران، ۱۹۸۶)	خوب	زیاد (در ایران)	مشکل	نیاز به تجربه در تفسیر داده‌ها عدم در نظر گرفتن اثراتی مانند کاهش اصطکاک در گروه شمع انجام خیلی سریع تعیین تنش حین کوبش در شمع امکان تفکیک مقاومت نوک و جدار مناسب برای شمع‌های با ظرفیت بالا
استاتنامیک ^۳ (Rosenvinge و همکاران، ۲۰۰۴)	خوب	زیاد (در ایران)	مشکل	به‌دلیل سرعت زیاد، اثر بارهای استاتیکی را دقیقاً نشان نمی‌دهد عدم امکان تفکیک مقاومت نوک و جدار
استربرگ ^۴ (Rosenvinge و همکاران، ۲۰۰۴؛ Zhussupbekov و همکاران، ۲۰۱۶)	خوب	نسبتاً بالا	مشکل	تنها راه عملی برای شمع‌های با ظرفیت بسیار بالا (شمع‌های با بیش از ۹۰ متر طول و ۳ متر قطر) امکان تفکیک مقاومت نوک و جدار

همان‌طور که ذکر شد کلیه فرمول‌های دینامیکی بر مبنای برابر بودن کار انجام‌شده توسط چکش با کار مقاومی که خاک روی شمع انجام می‌دهد، بنانهاده شده‌اند. این معنا در شکل (۲) به- خوبی نشان داده شده است (Mohan, ۱۹۹۰).

$$W.H = S_{OABD} = S_{OABC} + S_{BCD} = R(s + c/2) \quad (2)$$

W وزن وزنه، H ارتفاع سقوط، R باربری شمع، s فرورفت شمع در هر ضربه، W_p وزن شمع، c بر جهندگی شمع، A سطح مقطع شمع. البته همواره بخشی از انرژی چکش هدر خواهد رفت که در نمودار ساده شکل (۲) نشان داده نشده است. اگر انرژی هدررفته در چکش با یک ضریب بازده و افت انرژی ناشی از برخورد نیز وارد معادله گردد، به‌دست می‌آید:

$$e_f.W.H = R.S + e_f.W.H \frac{W_p(1-e^2)}{(W+W_p)} + \frac{R^2L}{2.A.E} + \frac{R^2L'}{2.A'.E'} + \frac{R.C_q}{2} \quad (3)$$

C_q نشست الاستیک زمین، L' ، A' ، E' طول، سطح مقطع و مدول ارتجاعی سرشمع، e_f ضریب بازده چکش، e ضریب بازگشت، اگر $C_p = \frac{R.L}{A.E}$ و $C_c = \frac{R.L'}{A'.E'}$ باشد نیز:

$$\frac{e_f.(W+e^2.W_p)}{(W+W_p)} = R \left[S + \frac{1}{2}(C_c + C_p + C_q) \right] \quad (4)$$

با فرض $C = C_c + C_p + C_q$ و در حالت ساده‌شده، رابطه هیلای به‌صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$R = \frac{W.H}{s + c/2} \times \frac{e_f.(W+e^2.W_p)}{(W+W_p)} \quad (5)$$

روش فوق، برای استخراج رابطه Hiley، مبتنی به قانون نیوتن و اصل بقای انرژی است.

اندازه‌گیری برجهندگی به‌سادگی با نصب کاغذ روی شمع و اتصال قلم مناسب به آن انجام می‌شود. جزئیات روش کار و اندازه-گیری برجهندگی و همچنین ارزیابی رابطه Hiley و مقایسه نتایج آن با آزمایش بارگذاری در چند پروژه در ایران انجام شده است. به‌نظر می‌رسد رابطه Hiley به‌دلیل در نظر گرفتن برجهندگی دقیق‌تر از سایر روابط دینامیکی کوبش است (Yahyazadeh, ۱۳۷۷). لذا در اینجا برای مقایسه تئوریک انتخاب گردیده است.

۲-۳- روش مبتنی بر تئوری پخش موج

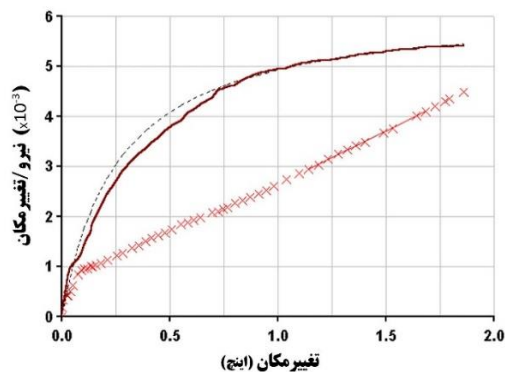
سومین روش برجا که در این مقاله موردبررسی قرار می‌گیرد، روش مبتنی بر تئوری پخش موج تنش در شمع در اثر ضربه است.

$$Q_u = \frac{1}{C_1} \quad (1)$$

Q_u بار نهایی، C_1 شیب قسمت خطی منحنی است. اگر منحنی بار- تغییر مکان کاملاً خطی باشد، منحنی چین- کندندر حالت ایده‌آل خود را، مثل منحنی خط‌چین در شکل (۱)، پیدا می‌کند. شایان‌ذکر است در مواردی همچون کارهای شوش‌پاشا و همکاران از روش بارگذاری در مقیاس آزمایشگاهی نیز برای بررسی ظرفیت باربری و رفتار شمع استفاده شده است (Shooshpasha و همکاران، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۳).

۲-۲- روش مبتنی بر اندازه‌گیری برجهندگی

از رایج‌ترین روش‌ها برای تخمین ظرفیت باربری شمع استفاده از فرمول‌های شمع کوبی است که وابسته به اندازه‌گیری فرورفت دائمی شمع در هر ضربه می‌باشد. این فرمول‌ها مقاومت حین کوبش شمع را به باربری استاتیکی آن مرتبط می‌کند (Randolph, ۲۰۰۳). برخی از این فرمول‌ها تجربی است و برخی دیگر مبنای تئوریک دارد، که مبتنی بر تساوی انرژی دینامیکی ورودی چکش با کار استاتیکی انجام‌شده توسط خاک در فرورفت شمع می‌باشد. اولین فرمول دینامیکی را تیلور^۵ ارائه کرد و از آن زمان تاکنون تعداد بسیاری از این فرمول‌ها برای شرایط مختلف ارائه گردیده که جواب‌های حاصل از آن‌ها نیز بسیار متفاوت است. یکی از انواع این فرمول‌ها رابطه Hiley است (Hiley, ۱۹۳۰). رابطه Hiley با سایر روابط دینامیکی کوبش شمع تفاوت اساسی دارد، زیرا تنها رابطه است که علاوه بر فرورفت از مقدار برجهندگی نیز در تخمین باربری به‌منظور محاسبه مقدار انرژی هدررفته در تغییرشکل‌های استفاده می‌کند. برجهندگی در واقع فرورفت موقت شمع تحت ضربه است (Allin و همکاران، ۲۰۱۵)، (Likins و همکاران، ۲۰۱۲).



شکل ۱- روش برون‌یابی چین- کندندر

روش کیس با استفاده معادلات پخش موج در میله‌ای منشوری، رابطه ساده‌ای برای تخمین باربری استاتیکی شمع، با استفاده از منحنی‌های سرعت و نیروی سرشمع در هنگام کوبش، ارائه می‌کند، که عبارت است از:

$$R_S = (1 - J_C) \left[\frac{P_1 + Z \cdot V_1}{2} \right] + (1 + J_C) \left[\frac{P_2 - Z \cdot V_2}{2} \right] \quad (8)$$

P_1 نیرو در شمع در لحظه t_1 ، P_2 نیرو در شمع در لحظه t_2

V_1 سرعت در شمع در زمان t_1

V_2 سرعت در شمع در زمان t_2

J_C ضریب میرایی

Z امپدانس شمع

معمولاً زمان t_1 را زمانی می‌گیرند که منحنی سرعت سر شمع به اولین قله خود می‌رسد. زمان t_2 نیز برابر است با:

$$t_2 = t_1 + 2L/C \quad (9)$$

L طول شمع و C سرعت انتشار موج در شمع است که برابر است با:

$$C = \sqrt{E/P} \quad (10)$$

امپدانس شمع نیز از رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

$$Z = \frac{E \cdot A}{C} \quad (11)$$

E مدول الاستیسیته شمع، A سطح مقطع شمع شایان ذکر است که تعیین مقدار ضریب میرایی در روش کیس دشوار است. البته جدول‌هایی موجود است که با توجه به جنس خاک مقدار تقریبی J را پیشنهاد می‌کند. Mohan در کتاب خود مقدار J را برای خاک‌های ماسه‌ای از 0.328 (S/m) تا 0.1656 (S/m) و برای خاک‌های رسی از 1.31 (S/m) تا 3.28 (S/m) معرفی می‌کند (Mohan, ۱۹۹۰).

لازم است این نکته یادآوری شود، روش کیس که بر مبنای معادله پخش موج تنش در شمع بنا نهاده شده است روش خیلی دقیقی نیست و علت اصلی استفاده از آن در این تحقیق سادگی آن می‌باشد. زیرا دیگر روش‌های مبتنی بر تئوری پخش موج تنش در شمع حل بسته ندارد و استفاده از آن‌ها مستلزم نوشتن برنامه رایانه‌ای برای حل عددی معادله دیفرانسیل پخش موج است. نرم-افزار CAPWAP یکی از نمونه‌های تجاری این نرم‌افزارهاست که با استفاده از منحنی سرعت و نیروی ثبت شده توسط دستگاه PDA در هنگام کوبش شمع و حل عددی معادله دیفرانسیل پخش موج، باربری را تخمین می‌زند.

در خصوص این روش Bullock در سال ۲۰۱۲ مزیت‌های استفاده از این روش را بر می‌شمارد.

بعد از این که معلوم شد بررسی کوبش شمع با فرض شمع به صورت یک جسم صلب دقت چندانی ندارد، روش تئوری پخش موج گسترش یافت (Salgado و همکاران، ۲۰۱۷). در این روش فرض می‌شود که با هر ضربه چکش یک موج تنش در شمع ایجاد می‌شود که با سرعت مشخصی به طرف پایین شمع حرکت می‌کند. در نتیجه تمام طول شمع به طور مشابه تحت تنش قرار نمی‌گیرد. معادله موج علاوه بر تخمین باربری، قابلیت محاسبه تنش‌های ایجاد شده در شمع حین کوبش را نیز داراست (Singh, ۲۰۰۶). معادله موجی که در اثر اعمال ضربه بر سر لوله‌ای منشوری، ایجاد می‌گردد به صورت زیر است:

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \left(\frac{E}{\rho} \right) \left(\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \right) \quad (6)$$



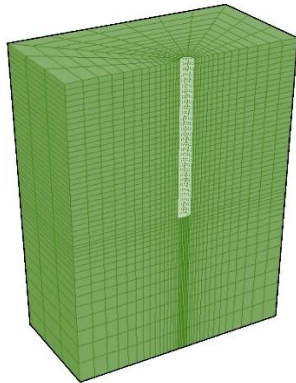
شکل ۲- ایده اولیه شکل‌گیری فرمول‌های دینامیکی کوبش شمع

D تغییر مکان طولی نقطه‌ای از میله از موقعیت اصلی آن، E مدول ارتجاعی میله، ρ چگالی مصالح میله، t زمان، x جهت محور طولی میله، با در نظر گرفتن مقاومت خاک اطراف شمع به دست می‌آید:

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \left(\frac{E}{\rho} \right) \left(\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \right) \pm R \quad (7)$$

که R مقاومت خاک است.

معادله (۷) باید برای شرایط اولیه و مرزی مناسب حل شود، تا رابطه بین تغییر مکان، زمان، موقعیت شمع و همچنین تغییرات تنش در طول شمع به دست آید. به دلیل این که حل تحلیلی این معادله به دلیل پیچیدگی آن میسر نیست، باید با روش‌های عددی حل گردد. اولین بار حل عددی مسئله توسط اسمیت ارائه شد. بعداً معادله پخش موج تنش در شمع توسط افراد مختلف حل گردید. در این تحقیق برای بررسی تئوری پخش موج تنش در شمع و تخمین باربری، از روش کیس^۶ استفاده شده است. به همین منظور در اینجا این روش تشریح می‌گردد.



شکل ۳- مقطعی از مدل ساخته شده

۳- مدل سازی عددی

۳-۱- انتخاب نرم افزار

به منظور شبیه سازی عددی کوبش شمع و آزمایش بارگذاری شمع از نرم افزار تفاضل محدود FLAC در محیط سه بعدی استفاده شده است. علت استفاده از نسخه سه بعدی مهیا بودن امکان بررسی حالت های مختلف دیگری همچون شمع مایل است که خارج از موضوع مقاله حاضر می باشد.

۳-۲- ابعاد هندسی مدل و مش بندی

در مدل سازی عددی همواره باید محدوده ای مدل گردد که علاوه بر شبیه سازی رفتار واقعی، بهینه هم باشد. به عبارت دیگر مدل آن قدر بزرگ نشود که فاقد کارایی گردد. بر این اساس و با مطالعه کارهای مشابه انجام گرفته، خاک اطراف شمع تا ده برابر قطر شمع مدل می گردد (Mabsout و همکاران، ۱۹۹۵). همچنین عمقی از خاک که در زیر نوک شمع مدل می شود باید برابر طول شمع و یا حداقل ده متر باشد. ابعاد المان ها یا فاصله گره های شبکه تفاضل محدود نیز در شمع و نوک آن کوچک ترین مقادیر را دارد (شکل (۳)) و هرچه به انتهای مدل و طرفین آن نزدیک می شود فاصله گره ها بیشتر می شود (Azizi, ۱۹۹۹). زیرا در اطراف و انتهای مدل، دقت بالایی نیاز نیست و این کار موجب کم شدن تعداد گره ها و تسریع حل مسئله می گردد. متذکر می گردد، با توجه به این که مدل شمع از هندسه ساده ای برخوردار بوده و تجربه زیادی از مدل سازی آن موجود است، مبتنی بر تجارب و توصیه های قبلی، در خصوص هندسه و ابعاد مش در مدل سازی تصمیم گیری شده است. در این پژوهش شمع های بتنی با مقطع استوانه توپر و با روش اجرای کوبش و با مشخصات زیر مدل سازی شده است:

قطر شمع (cm): ۶۰، ۱۰۰، ۱۵۰، طول شمع (m): ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰، مشخصات خاک مدل سازی شده نیز عبارت است از:

$$\phi = 0, C = 120 \text{ kN}, E = 38 \text{ MPa} \quad \text{خاک ۱}$$

$$\phi = 20, C = 100 \text{ kN}, E = 50 \text{ MPa} \quad \text{خاک ۲}$$

$$\phi = 20, C = 50 \text{ kN}, E = 75 \text{ MPa} \quad \text{خاک ۳}$$

$$\phi = 20, C = 20 \text{ kN}, E = 100 \text{ MPa} \quad \text{خاک ۴}$$

شایان ذکر است در این مدل سازی خاک به صورت خشک مدل شده است و آب در محیط وجود ندارد.

۳-۳- شرایط مرزی

در مدل استاتیکی که آزمایش بارگذاری شمع را شبیه سازی می کند، مرز ثابت^۷ به خوبی شرایط واقعی را شبیه سازی می کند. اما با توجه به این که در مدل سازی دینامیکی، مرزها باید جاذب انرژی باشند تا تحریکات ناشی از ضربه را منعکس نکنند، در مدل دینامیکی کوبش شمع از مرزهای ویسکوز استفاده شده است. مرز ویسکوز FLAC بر اساس فرمولاسیون ارائه شده توسط Lysmer و Kuhlemeyer در سال ۱۹۶۹ می باشد.

۳-۴- مدل رفتاری خاک

در کلیه مدل سازی های انجام شده در این تحقیق رفتار خاک بر مبنای مدل موهر- کولمب^۸ است. از جمله علل استفاده از این مدل رفتاری، سادگی تعیین پارامترهای آن و سابقه طولانی استفاده از آن در مدل سازی های ژئوتکنیکی است. البته استفاده از سایر مدل های رفتاری خاک جهت تحقیقات آتی پیشنهاد می شود.

۳-۵- میرایی

به دلیل این که نرم افزار FLAC همواره معادله حرکت را به صورت کامل حل می کند، یعنی مسائل استاتیکی نیز به صورت دینامیکی حل می شود، در حل استاتیکی هم از متغیر میرایی استفاده می کند. پیش فرض FLAC در مسائل استاتیکی یک نوع میرایی غیر ویسکوز به نام میرایی محلی^۹ است که تنها زمانی که سرعت تغییر علامت دهد، فعال می شود. اما برای حل مسائل در حالت پایا^{۱۰} که حرکت یکنواخت قابل توجهی وجود دارد (مانند حرکت شمع در خاک) و سرعت تغییر علامت نمی دهد، یک نوع میرایی دیگر در FLAC موجود است که برای انتقال انرژی جنبشی از میرایی محلی کارآمدتر است. این میرایی در FLAC میرایی

10. Steady state

7. Fixed boundary

8. Mohr-Coulomb

9. Local damping

۳-۷- بارگذاری

در مدل استاتیکی شبیه‌سازی آزمایش بارگذاری شمع، بارگذاری به‌صورت سرعت یکنواختی بر سر شمع اعمال می‌شود. البته اعمال سرعت به‌صورت ناگهانی بر سر شمع صحیح نیست و به دلیل شک ناگهانی ناشی از بارگذاری، شمع دچار ارتعاش خواهد شد و منحنی بار-نشست حالت نوسانی به خود می‌گیرد. لذا ابتدا به‌صورت تدریجی سرعت از صفر شروع شده و پس از رسیدن به مقدار مشخصی ثابت می‌شود. سرعت ثابت نفوذ شمع در خاک ۷-۱۰ متر در هر گام حل است.

در مدل دینامیکی شبیه‌سازی کوبش شمع باید ضربه چکش بر سر شمع اعمال شود. برای شبیه‌سازی ضربه از تابع بارگذاری که توسط Goble و همکارانش (۱۹۸۰) بدین منظور ارائه شده، استفاده می‌شود. البته منحنی نیرو برای چکشی که در مدل‌سازی مدنظر بوده (Delmag-D100) تغییر کرده است.

۳-۸- ارزیابی صحت مدل

قبل از آن‌که از مدل ساخته‌شده استفاده شود، باید صحت جواب‌های آن بررسی و تأیید گردد. یکی از مواردی که در هر مدل‌سازی مطرح است کنترل درستی هندسه مدل است. هرچند همان‌طور که ذکر شد برای مدل‌سازی، با توجه به نکات ارائه‌شده در منابع مربوطه، تلاش شده است که محدوده‌ای از خاک که مدل‌سازی می‌شود و موقعیت مرزها، ابعاد المان‌ها و ... به‌گونه‌ای انتخاب شود که اثرات ناشی از مدل‌سازی عددی به حداقل ممکن کاهش یابد. درعین حال بعد از انجام تحلیل‌ها نیز با کنترل تغییر مکان‌ها و تنش‌های ایجادشده در خاک، هندسه مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همان‌طور که شکل‌های (۴) و (۵) نشان می‌دهد، محدوده تغییرات تنش ناشی از بارگذاری در مدل دینامیکی و استاتیکی در فاصله قابل قبولی از مرزهای اطراف مدل قرار دارد که نشان‌دهنده مناسب بودن ابعاد هندسی مدل است.

در اینجا برای کنترل بیشتر به مقایسه کیفی پاسخ‌های مدل با موارد واقعی می‌پردازیم. با توجه به این‌که یکی از روش‌های موردبررسی در تحقیق حاضر رابطه هیلری است که با استفاده از مقدار فرورفت و برجهندگی باربری را تخمین می‌زند، لذا در شکل (۶) منحنی‌های فرورفت و برجهندگی به‌دست‌آمده از مدل دینامیکی کوبش شمع با یک نمونه واقعی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود تطابق کیفی خوبی بین دو منحنی برقرار است.

مربک^{۱۱} نام دارد و در مدل‌سازی استاتیکی بارگذاری شمع مورد استفاده قرار گرفته است.

قبل از آن‌که درباره مقدار میرایی در مدل دینامیکی صحبت شود، لازم است با روش تحلیل استفاده شده آشنایی حاصل شود. تحلیل دینامیکی در FLAC، تحلیل غیرخطی با انتگرال‌گیری مستقیم عددی در حوزه زمان است. در این روش در ابتدای هر گام زمانی به رابطه تنش- کرنش رجوع می‌شود تا خصوصیات مناسب برای هر المان در آن گام زمانی مشخص گردد. در روش تحلیل غیرخطی با تشکیل چرخه هیستریزس^{۱۲} تنش و کرنش برشی، مقدار انرژی مستهلک‌شده با توجه به نسبت $\frac{\Delta W}{W}$ محاسبه می‌شود. زیرا میرایی برابر است با:

$$D \cong \frac{\Delta W}{4\pi W} \quad (12)$$

اما از آنجاکه هیچ مدل رفتاری به‌طور کامل میرایی هیستریزس^{۱۳} را مدل نمی‌کند، در محاسبات عددی میرایی اضافی به برنامه داده می‌شود. البته چنانچه مسئله در مد کرنش‌های بزرگ باشد و جریان خمیری ایجاد شود، مقدار استهلاک انرژی در مدل آن قدر زیاد است، که تأثیر میرایی اضافی واردشده بسیار ناچیز می‌شود. لذا تعیین دقیق آن لزومی ندارد و حداقل مقدار آن کفایت می‌کند. مقدار میرایی در تحلیل‌های انجام گرفته دو درصد انتخاب شده است.

۳-۶- سطح تماس شمع و خاک (Interface)

برای مدل کردن سطح تماس شمع و خاک از المان اینترفیس^{۱۴} موجود در FLAC استفاده شده است که رفتار آن بر مبنای تئوری کولمب است و دارای ویژگی‌هایی از قبیل اصطکاک، چسبندگی، اتساع، سختی نرمال و برشی، مقاومت کششی و برشی است. شایان‌ذکر است نرم‌افزار FLAC به‌صورت پیش‌فرض اجازه لغزش به اینترفیس را نمی‌دهد. لذا با توجه به این‌که در این مسئله لغزش اتفاق می‌افتد می‌بایست این گزینه فعال شود. مقدار زاویه اصطکاک و چسبندگی اینترفیس وابسته به خاک اطراف تعیین می‌گردد. زاویه اصطکاک برابر ۶۷٪ مقدار زاویه اصطکاک خاک مینا در نظر گرفته شده است. چسبندگی نیز معادل ۳۰٪ چسبندگی خاک مینا منظور شده است. زاویه اتساع صفر و سختی در صفحه و عمود بر صفحه نیز معادل سختی خاک در نظر گرفته شده است.

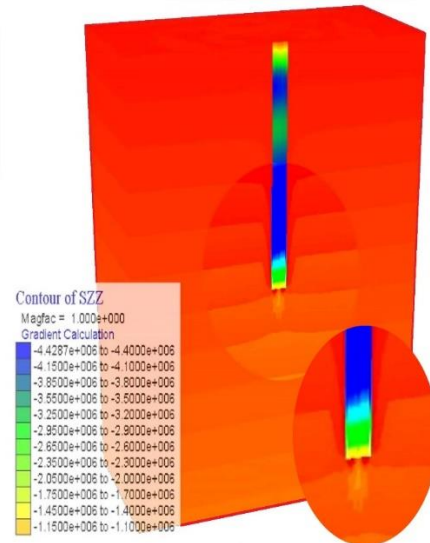
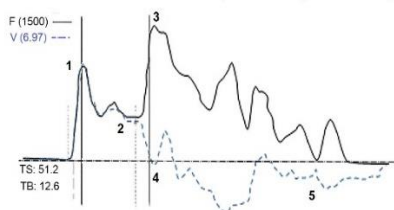
14. Interface

11. Combined damping

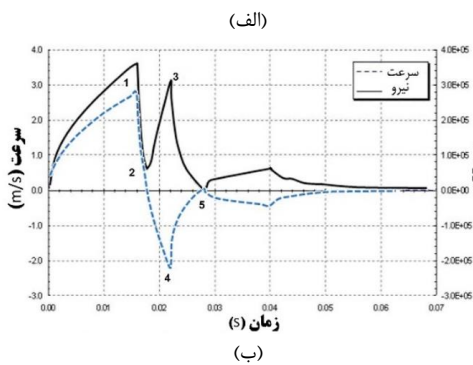
12. Hysteresis

13. Hysteretic damping

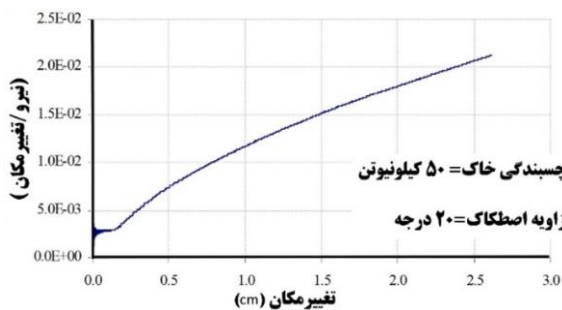
به دست آمده از مدل در سر شمع را در مقایسه با یک نمونه از منحنی های سرعت و نیروی ثبت شده توسط دستگاه PDA نشان می دهد. برای نشان دادن هم خوانی خوب این دو منحنی با هم، نقاط مشترک بر روی آن ها شماره گذاری شده است. ملاحظه می گردد که پاسخ های به دست آمده از مدل به لحاظ کیفی، از هم خوانی خوبی نسبت به منحنی واقعی ثبت شده برخوردار است. برای کنترل پاسخ های مدل استاتیکی با موارد واقعی نیز یک نمونه از منحنی های بار- نشست شمع که از مدل عددی ساخته شده و شبیه سازی آزمایش بارگذاری شمع به دست آمده در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۴- کانتور تنش خاک در مدل دینامیکی

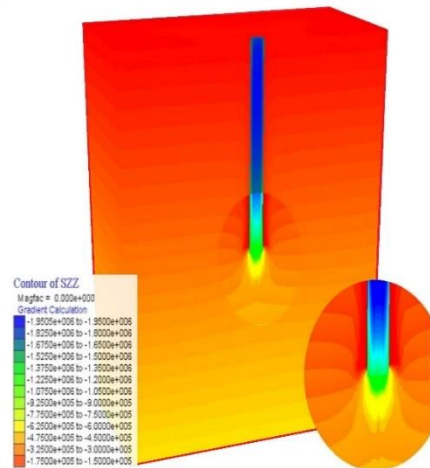


شکل ۷- منحنی سرعت و نیروی سر شمع: (الف) الگوی کلی منحنی سرعت و نیروی سر شمع در نرم افزار CAPWAP. (ب) منحنی سرعت و نیروی سر شمع، به دست آمده از مدل دینامیکی کوبش شمع در محیط FLAC

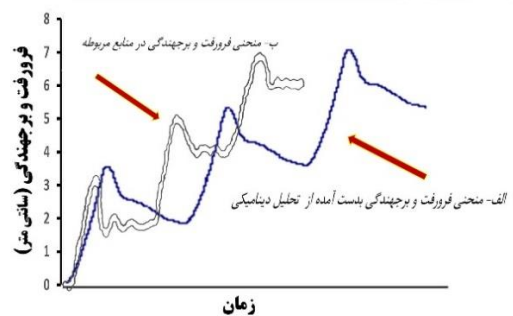


شکل ۸- منحنی بار- نشست به دست آمده از FLAC

مقایسه این منحنی با شکل (۱)، که مشابه منحنی مذکور در منابع علمی مربوطه می باشد، حاکی از هم خوانی خوب آن ها است. علاوه بر این تطابق بسیار خوب نتایج حاصل از تخمین باربری



شکل ۵- کانتور تنش خاک در مدل استاتیکی

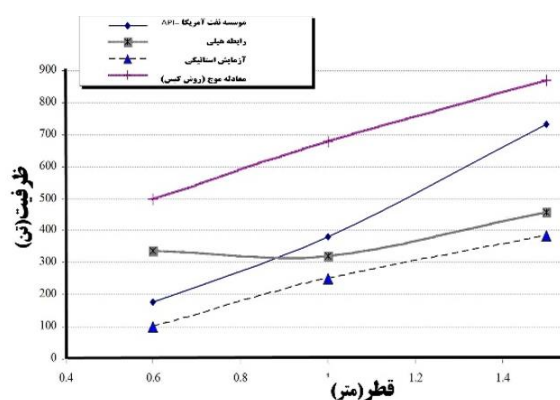


شکل ۶- منحنی فرورفت و برجهندگی

همچنین با توجه به این که جهت تخمین باربری شمع با استفاده از تئوری پخش موج تنشی، به منحنی سرعت و نیرو در سر شمع نیاز است؛ در اینجا لازم است از پاسخ های مدل دینامیکی نیز اطمینان حاصل شود. شکل (۷) منحنی سرعت و نیروی

۴-۲- بحث در مورد فرمول هیلی

برای تخمین ظرفیت باربری شمع با استفاده از فرورفت و برجهندگی که در واقع استفاده از رابطه هیلی می‌باشد، باید پارامترهای ورودی این رابطه اندازه‌گیری شود. مقدار فرورفت (S) و برجهندگی شمع (C) در این رابطه از نتایج تحلیل دینامیکی شمع تحت بار کوبش چکش در تحقیق حاضر حاصل شد. مقادیر متغیرهای وزن چکش W و وزن شمع W_p نیز با توجه به نوع چکش مدل شده و ابعاد و جنس شمع قابل تعیین است. چکش استفاده شده در این پژوهش از نوع دلماک^{۱۵} (D100) با وزن کوبه ۱۰ تن و انرژی هر ضربه بین ۲۱۴-۳۶۰ کیلو نیوتن-متر می‌باشد. ضریب بازده چکش (ef) نیز، یک در نظر گرفته می‌شود، چراکه در مدل عددی استهلاک انرژی نداریم و نیرو مستقیماً بر سر شمع اعمال می‌گردد. در مورد ضریب بازگشت (e) با استفاده از جداول راهنمای موجود در مراجع برای انتخاب مقدار آن اقدام شده و عدد ۰/۵ منظور می‌شود (Chellis, ۱۹۶۱). تعیین مقدار E_n نیازمند دقت بیشتری است. در مدل دینامیکی ساخته شده نیروی مشخصی بر سر شمع به‌عنوان اثر چکش بر شمع اعمال گردیده است، درحالی‌که در واقعیت انرژی ورودی از طرف چکش به شمع است که مقدار مشخصی است و نه نیرو، و در واقع نیروی اعمالی از جانب چکش بر شمع بستگی به سختی شمع و خاک پیرامون آن دارد. به‌عبارت‌دیگر اگر چکش با انرژی مشخص بر شمع فرضی صلب اثر کند نیرو به بی‌نهایت میل می‌کند درحالی‌که اثر همان چکش به یک شمع فرضی با سختی خیلی کم نیروی خیلی کوچکی خواهد بود. زیرا انرژی ورودی از جانب چکش برابر با کار مقاوم انجام شده، یعنی حاصل ضرب نیرو در جابه‌جایی، است. پس هرچه تغییر مکان بزرگ‌تر شود نیرو کوچک‌تر خواهد بود. لذا مقدار E_n در هریک از موارد با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان بر شمع به‌دست آمده و در رابطه هیلی قرار داده می‌شود.



شکل ۹- نمودار نحوه تغییرات باربری شمع با تغییر قطر شمع

شمع به‌کمک مدل استاتیکی بارگذاری شمع، که در ادامه مقاله ارائه خواهد شد، با نتایج روابط کلاسیک طراحی نشان‌دهنده صحت مدل‌سازی انجام شده است.

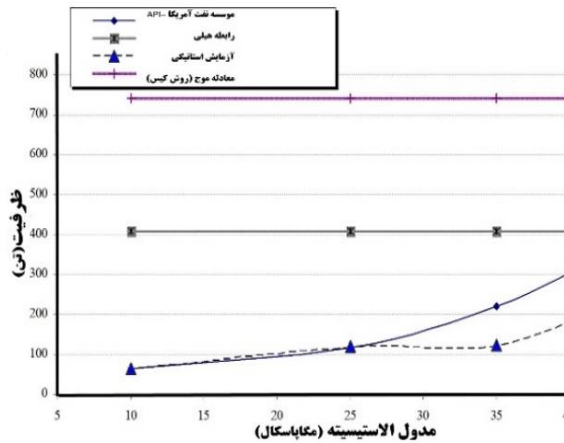
۴-۳- بررسی نظری روش‌های تعیین باربری

چنانچه ذکر شد روش‌های مختلفی برای تخمین باربری شمع وجود دارد. این قسمت به بررسی و مقایسه نتایج برخی از این روش‌ها با هم و بر مبنای مدل‌سازی‌های انجام شده اختصاص دارد. مدل استاتیکی و دینامیکی مذکور در قسمت قبل این مقاله برای مقادیر مختلف متغیرهای خاک (C و ϕ) و طول شمع، قطر شمع و ... اجرا گردید و نتایج به‌دست آمد.

۴-۱- بحث در مورد آزمایش بارگذاری استاتیکی

پیش از آن‌که نتایج به‌دست آمده مورد بررسی قرار گیرد لازم است تذکر داده شود، به‌علت این‌که در مدل عددی بارگذاری شمع، بارگذاری تا حد تسلیم ادامه نیافته است؛ برای تخمین باربری از روش چین-کندرن استفاده شده است (Fakher و Khodaparast, ۱۳۷۷). علت عدم بارگذاری شمع تا حد گسیختگی (تغییر مکان حدود ۱۰ درصد قطر شمع)، محدودیت سخت‌افزار در دسترس است که زمان حل را خیلی طولانی می‌کند. همان‌طور که ذکر شد سرعت بارگذاری ۷-۱۰ متر در هر گام حل است.

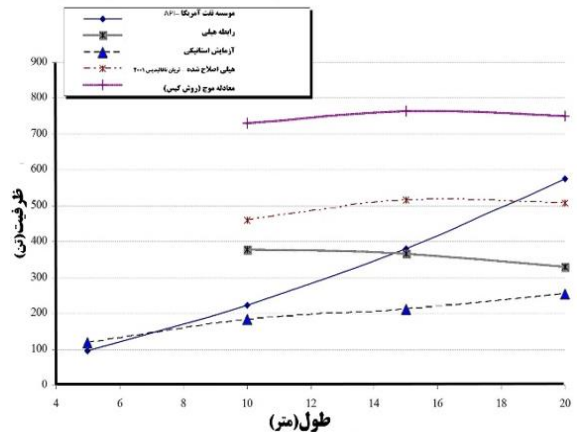
با بررسی نمودارهای تغییرات باربری شمع با تغییر قطر و عمق مدفون شمع و همچنین چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته خاک (منحنی‌های شکل‌های (۹) تا (۱۳))، ملاحظه می‌گردد که روش تعیین باربری شمع به‌کمک مدل‌سازی به‌صورت محیط پیوسته و شبیه‌سازی آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع از قابلیت بالایی برخوردار بوده و جواب‌های به‌دست آمده از این روش تطابق بسیار خوبی با جواب‌های حاصل از روابط کلاسیک ظرفیت باربری دارد. همچنین در مواردی از قبیل تغییر مدول الاستیسیته خاک نیز که روش‌های کلاسیک طراحی آن را در نظر نمی‌گیرد، این روش به‌خوبی تغییرات را احساس می‌کند و با سخت‌تر شدن خاک باربری شمع نیز افزایش می‌یابد. البته همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد یکی از مشکلات اصلی آزمایش بارگذاری شمع انتخاب روش مناسب برای تفسیر نتایج است که طبیعتاً در شبیه‌سازی آزمایش بارگذاری استاتیکی نیز این مشکل موجود خواهد بود. لیکن ملاحظه می‌گردد علی‌رغم وجود این مشکل با انتخاب روش مناسب تفسیر داده‌ها، نتایج به‌دست آمده بسیار خوب است و از درجه بالای اطمینان برخوردار است.



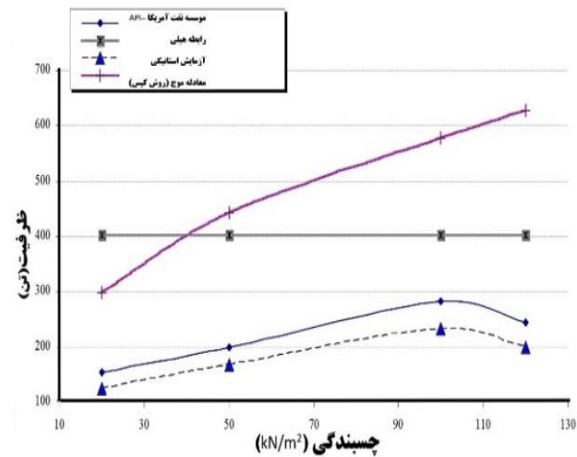
شکل ۱۳- نمودار نحوه تغییرات باربری شمع با تغییر مدول الاستیسیته خاک

همان طور که در نمودار شکل‌های (۹) تا (۱۳) مشخص است کیفیت پاسخ‌های به‌دست‌آمده از رابطه هیلی در حالات مختلف متفاوت است. روند تغییر باربری به‌دست‌آمده از رابطه هیلی با تغییر قطر روندی منطقی و تقریباً مطابق با جواب روش‌های کلاسیک طراحی است. زیرا با افزایش قطر، گوه خاک تشکیل شده در نوک شمع نیز بزرگ‌تر و در نتیجه نیروی مقاوم بیشتر می‌شود. در حالتی که طول مدفون شمع تغییر می‌کند هم‌خوانی مقدار تغییرات در باربری به‌دست‌آمده از رابطه هیلی با باربری حاصل از روش‌های کلاسیک طراحی کم‌تر است (Triantafyllidis, 2001).

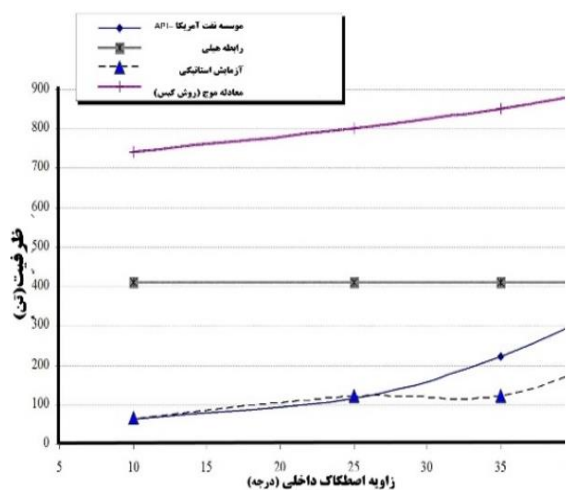
Triantafyllidis نیز در تحقیقات خود به نتیجه‌ای مشابه این دست یافت و علت آن را این‌گونه بیان کرد که به دلیل آن که نیروی ناشی از ضربه چکش به‌صورت موج در شمع منتشر می‌گردد، لذا مدت زمانی طول خواهد کشید تا این موج به نوک شمع برسد. در نتیجه در شمع‌های با طول زیاد ممکن است مدت زمان اعمال ضربه، از زمان لازم برای رسیدن موج به نوک شمع کوتاه‌تر باشد. پس منحنی فرورفت و برجهنگی ثبت‌شده مربوط به زمانی خواهد بود، که هنوز موج تمام طول شمع را طی نکرده است. و این بدان معناست که در معادلات ضربه-ممنتم^{۱۶} نوشته‌شده بین کوبه و شمع، کل شمع مشارکت ندارد. در نتیجه وزن شمع به‌کار رفته در رابطه هیلی باید اصلاح شود و وزن طولی از شمع که در حین ضربه، موج را احساس کرده است به‌جای آن قرار داده شود. بر این اساس و با توجه به رابطه هیلی، بدیهی است اگر در شمع‌های بلند از وزن کل شمع در رابطه هیلی استفاده شود، باربری را کم‌تر تخمین خواهد زد. لذا نمودار باربری از رابطه هیلی اصلاح‌شده با روشی که Triantafyllidis ارائه می‌کند نیز در کنار سایر روش‌ها رسم شده که ملاحظه می‌گردد نمودار اصلاح‌شده از هم‌خوانی



شکل ۱۰- نمودار نحوه تغییرات باربری شمع با تغییر طول شمع

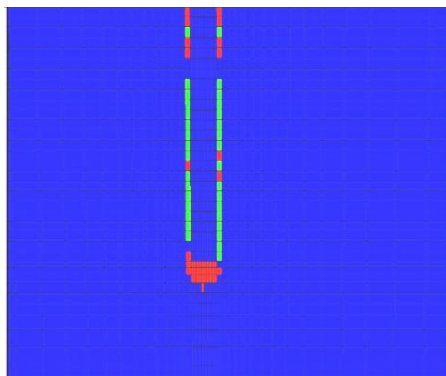


شکل ۱۱- نمودار نحوه تغییرات باربری شمع با تغییر چسبندگی خاک



شکل ۱۲- نمودار نحوه تغییرات باربری شمع با تغییر زاویه اصطکاک خاک

خاک اطراف شمع به اندازه کافی پلاستیک نشده و در نتیجه رفتار آن به مقدار C و ϕ خیلی وابسته نیست. شکل (۱۴) قسمت‌هایی از مدل را که در هنگام کوبش وارد ناحیه خمیری شده است نشان می‌دهد. کوچکی نواحی پلاستیک شده مؤید مطلب فوق می‌باشد. راه‌حل این مشکل مدل کردن تعداد ضربات کافی برای پلاستیک شدن خاک اطراف شمع است، تا مدل مطابق با واقعیت گردد. اما با توجه به این که در واقعیت حدوداً در هر ۱/۵ ثانیه یک ضربه زده می‌شود، در نتیجه اگر بخواهیم برای مدل‌سازی کوبش تعداد زیادی ضربه را مدل کنیم، با امکانات سخت‌افزاری موجود زمان تحلیل آن قدر طولانی می‌شود که انجام آن عملاً غیرممکن است.



شکل ۱۴- نواحی پلاستیک شده در مدل دینامیکی کوبش شمع

در مدل‌سازی انجام شده دو ضربه مدل شده است و با توجه به این که در دو ضربه تسریع بارگذاری اثرات چندانی ندارد، فاصله زمانی بین دو ضربه به ۰/۰۳ ثانیه کاهش یافته است. اما از آنجا که در چندین ضربه متوالی، به دلیل شکل گرفتن جریان خمیری در خاک، نمی‌توان از فاصله زمانی بین ضربات و اثرات ناشی از کاهش آن صرف‌نظر کرد، اگر قرار باشد تعداد زیادی ضربه با زمان تناوب معمول (۱/۵ ثانیه) مدل گردد، زمان لازم برای انجام تحلیل در هر حالت نزدیک به یک ماه خواهد بود که انجام آن میسر نیست. در ادامه به بررسی اثرات این مشکل در پاسخ‌های مدل می‌پردازیم. عدم ایجاد ناحیه خمیری قابل توجه، بر مقدار برجهندگی شمع اثری ندارد. زیرا برجهندگی تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر شمع و خاک است و تابع متغیرهای تغییر شکل‌پذیری مصالح است. اما این مسئله بر مقدار فرورفت شمع اثر داشته و موجب کاهش آن می‌شود. که نتیجه آن افزایش باربری تخمین زده شده از رابطه هیلی است. به عبارت دیگر وجود این مشکل موجب شده خاک به طور کاذب محکم‌تر از آنچه هست، به نظر آید. به همین دلیل باربری به دست آمده از رابطه هیلی و روش مبتنی بر معادله موج، که هر دو از نتایج مدل دینامیکی کوبش شمع استفاده می‌کنند، نسبت به روش‌های دیگر دست بالاتر می‌باشد. البته به دلیل این که اثر این مسئله در همه حالات یکسان است، در کلیه حالات، به جز شرایطی

بهتری برخوردار است. اما در رابطه هیلی باربری با تغییر چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته خاک تغییراتی ندارد. علت بروز این مشکل به طور مفصل در بخش بعدی بحث خواهد شد.

موارد مذکور درباره نتایج رابطه هیلی، پیرامون نحوه تغییرات باربری با تغییر قطر و طول شمع و همچنین چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته خاک بود. آنچه درباره کلیه حالت‌ها برقرار است این است که جواب‌های رابطه هیلی همگی دست بالا و بیشتر از مقدار واقعی است. علت بروز این مشکل در بخش (۳-۴) توضیح داده خواهد شد.

۳-۴- بحث در مورد روش مبتنی بر پخش موج تنش

همان‌طور که از نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۹) تا (۱۳) برمی‌آید، روند تغییرات باربری در این روش در حالات مختلف نسبت به باربری به دست آمده از رابطه هیلی تطابق بهتری با باربری به دست آمده از روابط کلاسیک طراحی دارد. به استثناء حالتی که قطر تغییر می‌کند که شاید ناشی از خطاهای عددی باشد. ملاحظه می‌گردد که روند تغییرات باربری به دست آمده از این روش با روند تغییرات باربری به دست آمده از آزمایش بارگذاری استاتیکی و رابطه هیلی اصلاح شده هم‌خوانی خوبی دارد. البته در حالتی که چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته خاک تغییر می‌کند، این روش نیز تغییر چندانی را نشان نمی‌دهد که خلاف واقع است و علت بروز آن در ادامه خواهد آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد مقدار باربری به دست آمده از روش کیس خیلی بیشتر از مقدار باربری به دست آمده از روابط کلاسیک طراحی، آزمایش بارگذاری استاتیکی و حتی رابطه هیلی است. در ادامه دلیل این مسئله ذکر خواهد شد.

چنانچه ذکر شد، برخلاف آن که انتظار می‌رود با افزایش چسبندگی یا زاویه اصطکاک داخلی خاک، باربری شمع افزایش یابد، نمودارهای ارائه شده چنین چیزی را نشان نمی‌دهند. عدم وجود حساسیت در پاسخ‌های مدل نسبت به این دو پارامتر می‌تواند به دلیل آن باشد که خاک اطراف شمع در مدل کاملاً پلاستیک نشده است، در نتیجه تغییر C و ϕ اثری بر پاسخ مدل ندارد. با توجه به آن که برخی مراجع مقدار تغییر مکان لازم برای گسیختگی شمع را ۰/۱ قطر شمع ذکر می‌کنند، اگر این مقدار تغییر مکان را به عنوان مثال معیاری برای پلاستیک شدن خاک اطراف شمع بدانیم، در این مدل خاک اطراف شمع کاملاً وارد ناحیه پلاستیک نشده است. زیرا همان‌طور که از منحنی تغییر مکان مشخص است در مدل مذکور دو ضربه متوالی شبیه‌سازی شده است و مقدار تغییر مکان اتفاق افتاده در حدود چهار تا پنج سانتی‌متر است که کم‌تر از ۰/۱ قطر شمع است، لذا

همچنین باربری به دست آمده از روش کیس معمولاً از جواب روش-های دیگر مثل بارگذاری استاتیکی، رابطه هیل و روابط کلاسیک طراحی بزرگتر است که در بخش ۴-۳ به دلایل آن اشاره شد. همچنین ممکن است این مسئله ناشی از خطاهای موجود در روش کیس باشد. زیرا همان طور که بیان شد، روش کیس ساده ترین روش تخمین باربری شمع از معادله موج است و روش های دقیق تر از این روش نیز در تخمین باربری شمع بر مبنای معادله موج وجود دارد که در آن ها معادله دیفرانسیل به صورت عددی و به طور کامل حل می شود.

با توجه به دستاوردهای این تحقیق به نظر می رسد روشی که در ذیل خواهد آمد، برای تخمین باربری شمع مناسب است. به نحوی که سادگی آزمایش اندازه گیری فرورفت و برجهندگی را با دقت آزمایش بارگذاری استاتیکی ترکیب می کند:

الف) ثبت منحنی فرورفت و برجهندگی شمع در حین کوبش،
ب) ایجاد مدل عددی کوبش شمع با استفاده از مدل رفتاری مناسب خاک و کالیبره کردن آن با استفاده از منحنی فرورفت و برجهندگی ثبت شده در محل و تعیین پارامترهای مکانیکی و تغییر شکل پذیری خاک دست خورده. به عبارت دیگر پارامترهای خاک در مدل آن قدر تغییر داده شود تا منحنی فرورفت و برجهندگی به دست آمده از مدل، مطابق منحنی ثبت شده در محل شود. در این تحقیق مبتنی بر نوع خاک مدل شده از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده،

ج) مدل سازی عددی آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع با پارامترهای به دست آمده از بند (ب) برای خاک،

د) تخمین باربری استاتیکی شمع با استفاده از نتایج مدل سازی عددی آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع، مشابه روش به کاررفته در این تحقیق.

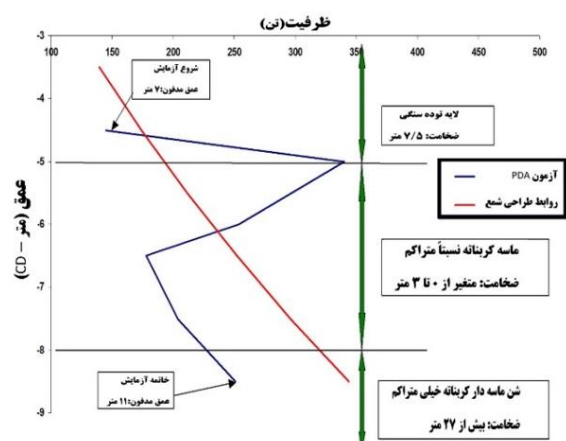
شایان ذکر است استفاده از روش فوق، در صورت تکمیل مدل دینامیکی کوبش شمع در تحقیقات آتی امکان پذیر می باشد.

۶- مراجع

- Allin R, Likins G, Honeycutt J, "Pile Driving Formulas Revisited", In Fcee 2015, 1052-1063.
American Petroleum Institute (API), "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design", 2000.
Azizi F, "Applied Analyses in Geotechnics: Practical Aspect of a Finite Element Mesh Related to Foundation", E & FN Spon, 1999, p731.
Bullock Paul J, "Advantages of dynamic pile testing", Full-Scale Testing and Foundation Design: Honoring Bengt H, Fellenius, 2012, 694-709.
Chellis O, "Pile Foundations", Mc Graw-Hill, 1961, 704 pp.
Fellenius Bengt H, "Test loading of piles and new proof testing procedure", Journal of Geotechnical and

که ϕ و C تغییر می کند، روند تغییرات باربری متأثر از آن نخواهد شد.

شکل (۱۵) یک نمونه از نتایج تست PDA انجام شده در بندر خدماتی پارس عسلویه را نشان می دهد. مشاهده می شود تخمین باربری از معادله موج چندین برابر باربری به دست آمده از روابط کلاسیک طراحی است. لذا چند برابر بودن پاسخ معادله موج پدیده نادری نیست و حتی در خروجی برنامه CAPWAP نیز که از روش کیس دقیق تر است دیده می شود.



شکل ۱۵- مقایسه نتایج تست PDA با نتایج روابط کلاسیک طراحی در بندر خدماتی پارس عسلویه

۵- نتیجه گیری

روند تغییرات نتایج حاصل از مدل سازی آزمایش بارگذاری شمع نسبت به متغیرهای مختلف تطابق خوبی با نتایج به دست آمده از روابط کلاسیک تعیین ظرفیت باربری شمع ها دارد و از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است.

روند تغییرات جواب های به دست آمده از رابطه هیل اصلاح شده، با روش Triantafyllidi، با نتایج روش های دیگر از جمله بارگذاری استاتیکی شمع و روابط کلاسیک طراحی تطابق نسبتاً خوبی دارد. البته این تطابق در برخی حالات مثل تغییر چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته خاک خوب نیست، که به علت نحوه مدل سازی انجام گرفته و فقدان امکانات سخت افزاری مناسب برای مدل کردن تعداد ضربات کافی برای پلاستیک شدن خاک اطراف شمع است. همچنین نتایج حاصل شده از تخمین باربری شمع با رابطه هیل به طور کلی در همه حالات، نسبت به جواب های روابط کلاسیک طراحی و روش بارگذاری استاتیکی، دست بالاتر می باشد. که علت آن بیان شد.

روند تغییرات باربری به دست آمده از روش کیس با تغییرات باربری در روش بارگذاری استاتیکی و همچنین تغییرات باربری حاصل از روابط کلاسیک طراحی تطابق خیلی خوبی دارد.

- Geoenvironmental Engineering 101.ASCE# 11551 Proceeding, 1975.
- Fleming WGK, Weltman AJ, Randolph MF, Elson WK, "Piling Engineering", John Wiley & Sons, 1986.
- Hiley A, "Pile-Driving Calculations with Notes on Driving Forces and Ground Resistances", Structural Engineer, Landon, Vol-8, 246-259, 278-288, 1930.
- Khodaparast M, Fakher A, "Pile Bearing Capacity Estimation by Loading Test", Geotechnics and Strength of Materials Journa, 1377, 80, 12-27.
- Likins GE, Fellenius BH, Holtz RD, "Pile driving formulas: Past and present", In Full-Scale Testing and Foundation Design: Honoring Bengt H. Fellenius, 2012, 737-753.
- Mabsout ME, Reese LC, Tassoulas JL, "Study of Pile Driving By Finite-Element Method", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 535-543.
- Mohan D, "Pile Foundation", Oxford & IBH Publishing Co, 1990.
- Poulos HG, Davis EH, "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley & Sons, 1990, 397 pp.
- Rajagopal C, Solanki CH, Tandel, YK, "Comparison of static and dynamic load test of pile", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 17, 2012, 1905-1914.
- Randolph MF, "Science and empiricism in pile foundation design", Geotechnique, 2003, 53, 10, 847-875.
- Rosenvinge T, Acheampong K, Kidd J, "Capacity Testing for Deep Foundations", Structure Magazine, 2004, 14-16.
- Salgado R, Zhang Y, Abou-Jaoude G, Loukidis D, Bisht V, "Pile driving formulas based on pile wave equation analyses", Computers and Geotechnics, 2017, 81, 307-321.
- Singh A, "Modern Geotechnical Engineering", CBS Publishers & Distributors; 3 edition, 2006, 846.
- Shooshpasha I, Saeedi B, "Evaluation of the Frictional Behavior of Pile in Sandy Soil Using Loading Test", Journal of Civil and Environmental Engineering Volume 46, Issue 3, Autumn 2016.
- Shooshpasha I, Sharafkhah M, "The Analytical and Experimental Study on the Settlement of Cast-in-Situ Concrete Piles in Sand", Journal of Civil and Environmental Engineering Volume 43, Issue 4, Autumn 2014.
- Triantafyllidis T, "On the application of the Hiley formula in driving long piles", Geotechnique, 2001, 51, 10, 891-895.
- Ulrich S, "Geotechnical Engineering Handbook", Volume 3, Ernest & Son a Wiley Company, 2003.
- Yahyazadeh F, "A Simple Method for Estimating Pile Bearing Capacity during Driving in Iran's Marine Environment", Msc thesis, 1377.
- Zhussupbekov A, Omarov A, "Modern advances in the field geotechnical testing investigations of pile foundations", Procedia Engineering, 165, 88-95, 2016.

EXTENDED ABSTRACT

Numerical Study of In- Site Tests for Pile Capacity Estimation

Mahdi Rojhani ^{a,*}, Ali Fakher ^b

^a School of Civil Engineering, member of Institute of Modern Sciences and Technologies, Shahed University, Tehran, Iran

^b School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 12 November 2018; **Accepted:** 21 May 2020

Keywords:

In-site pile tests, Pile capacity, Hiley formula, Wave equation, Pile loading.

1. Introduction

Pile capacity estimation by conventional design equations is not so accurate. Besides of uncertainty of geotechnical parameters and the defect of design equations, during pile installation, the soil is highly disturbed. In pile foundation projects, it is necessary to confirm pile capacity by in-situ tests. Many methods are proposed to perform in-situ such as static pile loading test, pile driving formulas based on penetration and rebound of the pile during driving, and wave equation method. Among these methods, the use of the pile driving formula is the easiest and the most economical method. (Randolph, 2003; Rosenvinge et al., 2004; Bullock, 2012; Likins, 2012; Rajagopal, 2012; Allin et al., 2015; Shooshpasha et al. 2016; Zhussupbekov, 2016; Salgado, 2017) Hiley formula is the only pile driving formula that uses pile rebound in combination with pile penetration for pile capacity estimation (Hiley, 1930). Static pile loading is the most accurate and also expensive test (Fellenius, 1975). Evaluation of capacity by wave equation method is newer than static loading and Hiley formula and with moderate accuracy and cost. In this research, by numerical simulating of the pile driving and pile loading, the results of the mentioned methods (Hiley formula, Wave equation, pile loading test) will be compared.

2. Methodology

In this study, the experimental research by the numerical modeling method was planned. The FLAC 3D software is used for numerical modeling and analysis of two types of models. First, pile driving has been simulated. Then the velocity and force of the pile's head are monitored to evaluate pile capacity by the Hiley formula and so wave equation method or Case method. Second, the pile has been loaded statically according to the pile load testing procedure to estimate pile capacity. During numerical modeling, many details such as mesh generation, dimensions of the model, appropriate constitute model of soil, boundary conditions, damping types, interface between pile and soil, loading conditions, and also verification of models and their results have been considered and discussed.

3. Results and discussion

In this paper, the Hiley formula has been evaluated using numerical simulation of pile driving and variation of penetration and rebound of pile (Fig. 1). Then, the pile capacity estimation using the Hiley equation based on penetration and rebound of pile was obtained from the numerical simulation. The pile capacity has also been calculated by the Case method using the force and velocity of the pile head obtained from the numerical simulation. In addition to numerical simulation of pile driving, a static pile loading test has been numerically simulated and its results have been used in the estimation of pile capacity (Khodaparast M, Fakher A, 1377). Finally, pile capacity values obtained by these three methods have been compared as shown in Fig. 2.

* Corresponding Author

E-mail addresses: m.rojhani@shahed.ac.ir (Mahdi Rojhani), afakher@ut.ac.ir (Ali Fakher).

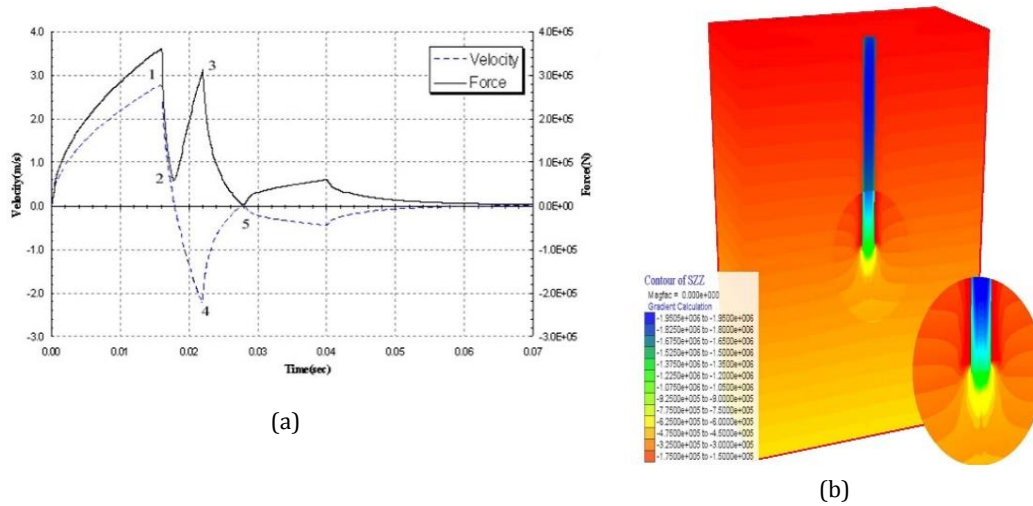


Fig. 1. Numerical modeling of pile Driving: a) Velocity and force of head pile during an impact, b) Szz stress counters during driving

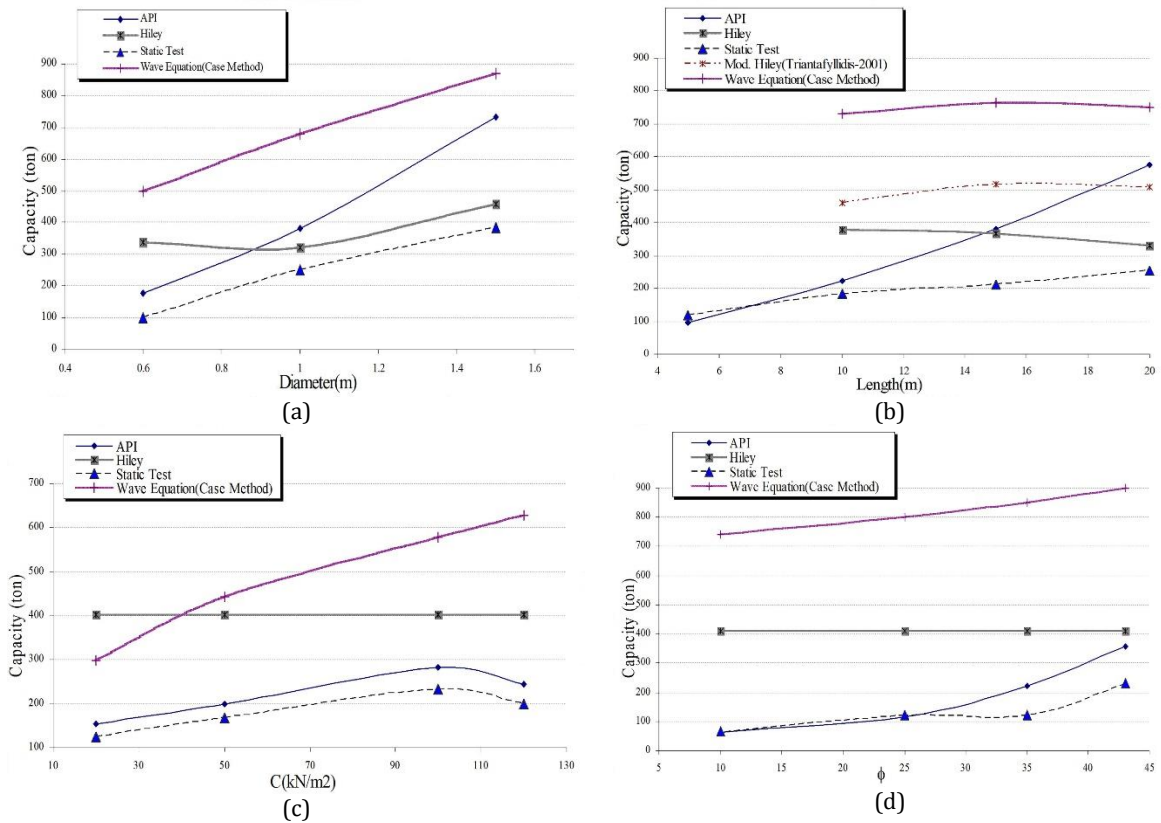


Fig. 2. Test setup: a) Diameter effect, b) Length effect, c) Soil cohesion effect, d) Soil friction angle (ϕ) effect

The results of numerical simulation have shown that the trend and also the amount of pile capacity estimation by pile loading tests have the best fit with the results of the design equation. The pile capacity estimated by the wave equation is usually overestimated. Because the soil strain due to wave propagation is low and elastic, and doesn't reach to plastic range. Also, the trend of the modified Hiley formula is in good agreement with the wave equation. The result of the Hiley formula is overestimated, but not as high as the wave equation results. The results of the Hiley formula are insensitive to friction angle, cohesion, and also modulus of elasticity of soil.

4. Conclusions

According to these results, the trend of capacity variation in static pile loading test modified Hiley formula, and Case methods are all, to some extent, in good agreement with the results of design equations. However, capacity values obtained from the Hiley formula and Case method are, almost in all cases, higher than capacity by static loading test and design equation (Triantafyllidis, 2001).

5. References

- Allin R, Likins G, Honeycutt J, "Pile Driving Formulas Revisited", In IFCEE, 2015, 1052-1063.
- Bullock Paul J, "Advantages of dynamic pile testing", Full-Scale Testing and Foundation Design: Honoring Bengt H. Fellenius, 2012, 694-709.
- Fellenius Bengt H, "Test loading of piles and new proof testing procedure", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 101. ASCE# 11551 Proceeding, 1975.
- Hiley A, "Pile-Driving Calculations with Notes on Driving Forces and Ground Resistances", Structural Engineer, London, 1930, 8 pp.246-259, 278-288.
- Khodaparast M, Fakher A, "Pile Bearing Capacity Estimation by Loading Test", Geotechnics and Strength of Materials Journal, 1377, 80, 12-27.
- Likins GE, Fellenius BH, Holtz RD, "Pile driving formulas: Past and present", In Full-Scale Testing and Foundation Design: Honoring Bengt H. Fellenius, 2012, 737-753.
- Rajagopal C, Solanki CH, Tandel YK, "Comparison of static and dynamic load test of pile", Electron Journal Geotech Engineering, 2012, 17, 1905-1914.
- Randolph MF, "Science and empiricism in pile foundation design", Geotechnique, 2003, 53, 10, 847-875.
- Rosenvinge T, Acheampong K, Kidd J, "Capacity Testing for Deep Foundations", Structure Magazine, 2004, 14-16.
- Salgado R, Zhang Y, Abou-Jaoude G, Loukidis D, Bisht V, "Pile driving formulas based on pile wave equation analyses", Computers and Geotechnics, 2017, 81, 307-321.
- Shooshpasha I, Saeedi B, "Evaluation of the Frictional Behavior of Pile in Sandy Soil Using Loading Test", Journal of Civil and Environmental Engineering, 2016, 46, 84, 39-50.
- Triantafyllidis T, "On the application of the Hiley formula in driving long piles", Geotechnique, 2001, 51 (10), 891-895.
- Zhussupbekov A, Omarov A, "Modern advances in the field geotechnical testing investigations of pile foundations", Procedia Engineering, 2016, 165, 88-95.