

# تغییر باربری شمع‌های کوبیدنی در خاکهای ریزدانه

مسعود حسینی<sup>i</sup>؛ علی فاخر<sup>ii</sup>

## چکیده

این مقاله باربری شمع‌های کوبیدنی در زمین‌های نرم و متوسط را مطالعه می‌کند. خاک اطراف شمع در اثر کوبش دست خورده می‌شود و فشار اضافی آب حفره‌ای در اطراف آن بوجود می‌آید. در نتیجه، تنشهای مؤثر خاک مجاور شمع و مقاومت برشی آن در حین کوبش کاهش می‌یابد. با پایان یافتن عملیات کوبش، فشار اضافی آب حفره‌ای بتدریج محو شده و خاک مجاور شمع تحکیم می‌یابد. به دنبال آن، تنش مؤثر و مقاومت برشی خاک مجاور شمع نیز افزایش می‌یابد. همچنین در رسهای تیکسوتروپ، قسمتی از مقاومت برشی خاک که در اثر دست‌خوردگی کاهش یافته است، بازیافت می‌شود. این عوامل باعث شده که ظرفیت باربری شمع‌های کوبیده شده در رس نرم با گذشت زمان افزایش یابد.

در این مقاله ابتدا معادله تحکیم خاک مجاور شمع بیان شده است. سپس این معادله با فرضیات مختلف برای توزیع اولیه فشار اضافی آب حفره‌ای، به روش عددی تفاضل‌های محدود حل و تغییرات فشار اضافی آب حفره‌ای خاک مجاور شمع با گذشت زمان محاسبه شده است. در ادامه با کمک روش‌های تجربی موجود که بین درجه تحکیم خاک و باربری شمع ارتباط برقرار می‌کنند، تغییرات ظرفیت باربری شمع محاسبه شده است. سپس با استفاده از نتایج به دست آمده، رابطه‌ای تجربی پیشنهاد شده است که به کمک آن می‌توان بدون نیاز به حل معادله تحکیم، تغییرات ظرفیت باربری شمع با گذشت زمان را تخمین زد. مقایسه نتایج به دست آمده در این تحقیق با اندازه‌گیری‌های میدانی از افزایش باربری شمع با گذشت زمان، نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده در این مقاله از دقت خوبی برخوردار است. با استفاده از نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌توان تغییرات ظرفیت باربری شمع با گذشت زمان را محاسبه کرد. همچنین می‌توان زمان مناسب برای انجام آزمایش بارگذاری شمع را نیز تخمین زد.

## کلمات کلیدی

شمع، رس نرم، فشار اضافی آب حفره‌ای، تحکیم، تیکسوتروپی، ظرفیت باربری.

## *Change in Bearing Capacity of Driven Pile in Fine Soils*

M. Hosseini; A. Fakher

### ABSTRACT

This Paper aims at the behavior of the driven piles in soft to moderately stiff clay. Driving the piles in such soils cause the surrounding layers to be disturbed and consequently the pore pressure to be increased. As a result, immediately after driving the effective stress and shear strength of the surrounding soil decreases. Then pore pressure dissipates and results in the consolidation of the soil and increase in the effective stress and shear strength parameters. Such an event also happens in thixotropic clays, which causes the bearing capacity of the driven piles in soft clay to increase with time.

<sup>i</sup> فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی و همکار تحقیقاتی گروه عمران؛ دانشکده فنی دانشگاه تهران؛ پست الکترونیکی:

[mashosseini@yahoo.com](mailto:mashosseini@yahoo.com)

<sup>ii</sup> دانشیار گروه مهندسی عمران گرایش خاک و پی؛ دانشکده فنی دانشگاه تهران؛ پست الکترونیکی: [afakher@ut.ac.ir](mailto:afakher@ut.ac.ir)

In this research, the equation for consolidation of the soil adjacent to a driven pile is presented. Using several assumptions for the primary distribution of excessive pore pressure, the equation of consolidation is solved by finite difference method. Then the change of excessive pore pressure of the surrounding soil is evaluated. Using several empirical relationships between the degree of consolidation and the bearing capacity of the driven pile, the variations of the pile bearing capacity due to soil consolidation is computed. Subsequently, a formula is suggested which can be used to estimate the variations of the pile bearing capacity without solving the consolidation equation. Such a formula takes the effect of thixotropy into consideration to predict the pile bearing capacity. Comparison of the result of the suggested formula and field measurement of bearing capacity with time shows a good agreement. Consequently the results of this study can be used to calculate variations of pile bearing capacity with time. In addition, the findings of the presented relationship can be employed to estimate the appropriate time to perform pile load testing and also interpretation of a test performed at a certain time.

#### KEYWORDS

Pile, Soft Clay, Excess Pore Pressure, Consolidation, Thixotropy, Bearing Capacity.

می‌شود. ولی همانطور که گفته شد ممکن است همچنان میزان زیادی از فشار اضافی آب حفره‌ای در خاک اطراف شمع باقی مانده باشد، در نتیجه ظرفیت باربری شمع دست‌پایین تخمین زده می‌شود. اما معمولاً بین کوبش شمع و موقعی که شمع لازم است بار طراحی را تحمل کند، فاصله زمانی نسبتاً زیادی وجود دارد و شمع فرصت کافی برای رسیدن به ظرفیت باربری نهایی را دارد. از طرف دیگر، در صورتی که به دلایل اجرایی لازم است آزمایش بارگذاری زودتر از موقع انجام شود، باید بتوان بخوبی روند افزایش باربری شمع را حدس زد تا به این وسیله بتوان حتی با انجام آزمایش بارگذاری زودتر از موعد، ظرفیت باربری نهایی شمع را تعیین کرد. بدین ترتیب با در نظر گرفتن باربری بلند مدت، می‌توان شمع‌ها را اقتصادی‌تر طراحی کرد. شناخت پدیده افزایش باربری شمع با گذشت زمان، نه تنها در تعیین زمان مناسب آزمایش بارگذاری، بلکه در تعیین باربری دراز مدت شمع و نیز تفسیر نتایج آزمایش بارگذاری اهمیت دارد.

#### ۲- سازوکار کوبش و افزایش باربری شمع با

##### گذشت زمان

وقتی شمع در خاک کوبیده می‌شود، حجمی از خاک برابر حجم قسمت نفوذ کرده شمع جابجا می‌شود. در نفوذهای کم (تا حدود ده برابر شعاع شمع)، جابجایی خاک ترکیبی از حرکت در جهت شعاعی و حرکت به سمت بالا می‌باشد [۱۹]. در نتیجه سطح زمین در مجاورت شمع بالا می‌آید. برای شمع‌های بلند در اعماق بیشتر، حرکت خاک عمدتاً در راستای شعاعی می‌باشد [۱۱]. در نوک شمع جابجایی خاک ترکیبی از حرکت به صورت شعاعی و به سمت پائین می‌باشد. جابجایی خاک در اثر کوبش شمع، موجب ایجاد فشار اضافی آب حفره‌ای می‌گردد و

#### ۱- مقدمه

تعیین ظرفیت باربری نهایی شمع تکی اولین گام در طراحی گروه شمع برای یک سازه است. ظرفیت باربری نهایی شمع عمدتاً با کمک روابط استاتیکی محاسبه می‌شود. ولی به علت عدم اطمینان کافی از فرمول‌ها و روابط موجود و همچنین پارامترهای مقاومتی خاک، لازم است ظرفیت باربری نهایی شمع، به کمک آزمایش‌های دینامیکی یا آزمایش بارگذاری تأیید شود. در حین کوبش شمع، خاک مجاور بدنه و نوک شمع بشدت دست خورده می‌شود و فشار اضافی آب حفره‌ای در مجاورت آن بوجود می‌آید. این فشار اضافی آب حفره‌ای باعث کاهش تنش مؤثر خاک مجاور شمع و پارامترهای مقاومتی خاک شده و به تبع آن ظرفیت باربری شمع در کوتاه مدت کاهش می‌یابد. در نتیجه کوبش شمع با سهولت بیشتری صورت می‌گیرد. اما فشار اضافی آب حفره‌ای با گذشت زمان محو می‌شود و خاک تحکیم می‌یابد. مدت زمان لازم برای محو فشار آب حفره‌ای وابسته به میزان نفوذپذیری خاک است.

در اثر تحکیم، تنش مؤثر خاک مجاور شمع و مقاومت برشی آن افزایش می‌یابد و در نتیجه ظرفیت باربری شمع نیز افزایش می‌یابد. این مسأله برای خاک‌های رسی که نفوذپذیری پایینی دارند، مسأله مهمی تلقی می‌شود. برای خاک‌های دانه‌ای که نفوذپذیری بالایی دارند، محو فشار اضافی آب حفره‌ای در حد چند ساعت و یا چند روز بطول می‌انجامد. اما در مورد خاک‌های چسبنده، حتی ممکن است محو فشار اضافی آب حفره‌ای چندین ماه و یا چند سال بطول انجامد. در اغلب اوقات آزمایش بارگذاری شمع در مدت کوتاهی بعد از کوبش شمع انجام می‌شود و ظرفیت باربری تعیین شده از آزمایش بارگذاری به عنوان ظرفیت باربری بلندمدت و نهایی شمع تلقی

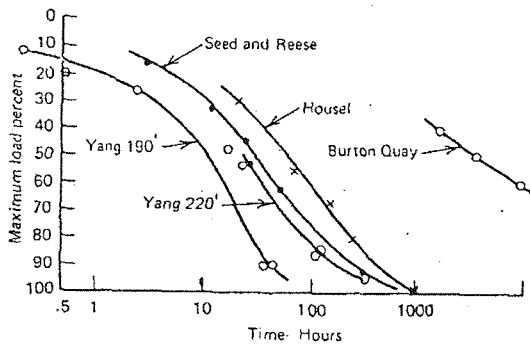
می‌دهد و باعث افزایش در سطح تنش خاک مجاور شمع می‌شود.

دلیل دوم، سالخوردگی<sup>۲</sup> و تیکسوتروپی<sup>۱</sup> یا بندش است که باعث می‌شود قسمتی از مقاومت برشی خاک که در نتیجه دستخوردگی کاهش یافته است، بازیافت گردد.

به پدیده افزایش ظرفیت باربری شمع با گذشت زمان در مراجع اروپایی «Pile Set-up» و در مراجع امریکایی «Pile Freeze» می‌گویند [۲۳]. علی‌رغم مکانیزم‌های ساده‌ای که در بالا ذکر شد، مکانیزم واقعی افزایش باربری شمع با گذشت زمان بسیار پیچیده است و کلیه عوامل تأثیر گذار بر آن هنوز به خوبی شناخته نشده است [۱۵]. محققین قریب به هفتاد سال سعی کرده‌اند که با انجام آزمایش‌های مختلف به صورت میدانی روی شمع‌های واقعی و یا به صورت آزمایشگاهی روی شمع‌های مدل و یا با ارائه مدل‌های تحلیلی، تا اندازه‌ای به بررسی این موضوع بپردازند.

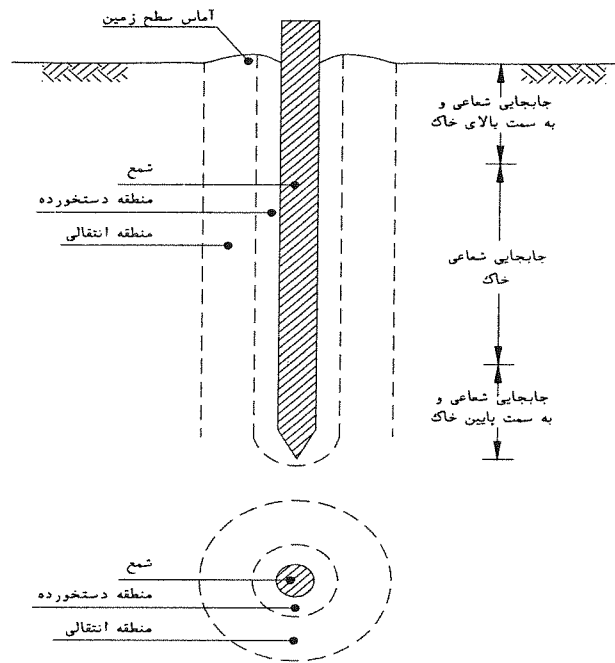
لازم به ذکر است که پدیده تغییر باربری شمع با گذشت زمان مستقل از نوع شمع (چوبی، فولادی یا بتنی)، در همه انواع خاکها، اعم از خاکهای دانه‌ای و یا چسبنده، با شدت و ضعف‌های مختلف مشاهده شده است. در رسهای تیکسوتروپ می‌تواند قسمتی از افزایش باربری به دلیل بازیافت مقاومت برشی خاک در اثر این پدیده باشد [۳].

نتایج بعضی از اندازه‌گیری‌ها از افزایش ظرفیت باربری شمعی‌های کوبیده شده در رس با گذشت زمان، در شکل (۲) نشان داده شده است. در خاکهای چسبنده (رس) می‌تواند افزایش باربری بسیار بزرگتری نسبت به خاکهای دانه‌ای رخ دهد و حتی افزایشی در حدود یازده برابر ظرفیت باربری اولیه مشاهده شده است. البته افزایش در حدود چهار تا شش برابر ظرفیت باربری اولیه متداول‌تر است.



شکل (۲): بعضی از اندازه‌گیری‌ها از افزایش باربری شمع‌های کوبیده شده در رس با گذشت زمان [۱۷].

تنش مؤثر خاک کاهش می‌یابد که نتیجه آن کاهش مقاومت برشی خاک می‌باشد. بنابراین یک منطقه دست‌خورده<sup>۱</sup> در مجاورت شمع بعد از کوبش یافته می‌شود. همچنین یک منطقه انتقالی<sup>۲</sup> که در آن خصوصیات خاک کمی تغییر می‌کند، خارج از منطقه دست‌خورده وجود دارد. گستره این منطقه انتقالی بستگی به خصوصیات خاک، روش کوبش، ابعاد شمع و چگالی شمع دارد. اثرات کوبش شمع در خاک به صورت شماتیک در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱): جایجایی و دستخوردگی خاک اطراف شمع در اثر کوبش. بعد از آن که نصب شمع کامل شد، فشار اضافی آب حفره‌ای بتدریج محو می‌شود و تنش مؤثر خاک افزایش می‌یابد و به تبع آن مقاومت برشی خاک نیز افزایش می‌یابد. همچنین خاک دوباره به سمت شمع حرکت می‌کند [۱۶]. این عوامل باعث می‌شود که ظرفیت باربری شمع به تدریج با گذشت زمان افزایش یابد. عمده افزایش ظرفیت باربری شمع با گذشت زمان در نتیجه افزایش در مقاومت برشی خاک و افزایش تنش جانبی وارد بر شمع از طرف خاک، اتفاق می‌افتد. به این دلیل افزایش ظرفیت باربری شمع عمدتاً به دلیل افزایش باربری بدنه می‌باشد.

مراجع دو دلیل اصلی زیر را برای افزایش مقاومت برشی خاک اطراف شمع و به تبع آن ظرفیت باربری شمع ذکر کرده‌اند [۱۷]:

دلیل اول تحکیم در خاک مجاور شمع است که در اثر محو فشار اضافی آب حفره‌ای بوجود آمده در حین کوبش شمع رخ

### ۳- معادله حاکم بر تحکیم و فروض لازم برای حل

آن

#### ۳-۱- معادله حاکم بر تحکیم

همانطور که اشاره شد، در مراحل اولیه کوبش شمع در خاک، جابجایی خاک ترکیبی از حرکت شعاعی و حرکت به سمت بالا است. ولی وقتی کوبش شمع تا اعماق بیشتری ادامه پیدا می‌کند، حرکت غالب خاک به صورت شعاعی در می‌آید. در نتیجه می‌توان کوبش شمع در خاک را همانند انبساط حفره‌ای استوانه‌ای<sup>۶</sup> به طول بینهایت در خاک ساده‌سازی کرد. به کمک این مدل و با در نظر گرفتن شرایط کرنش مسطح و تقارن محوری خاک اطراف شمع فقط دارای یک درجه آزادی به صورت شعاعی می‌باشد. علی‌رغم اینکه پدیده کوبش بسیار پیچیده است، لیکن ساده سازی ذکر شده توسط محققین پذیرفته شده است.

با مدل کردن کوبش شمع به صورت انبساط حفره استوانه‌ای و همچنین با فرض اینکه توزیع تنش در اسکلت خاک با فرمولهای حالت الاستیک به دست آید، می‌توان معادله تحکیم را استخراج کرد [۱۸]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u}{\partial r} \right) = c_h \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] \quad (1)$$

$c_h$  ضریب دو بعدی تحکیم برای زهکشی افقی،  $u$  فشار اضافی آب حفره‌ای و  $r$  فاصله شعاعی از شمع و  $t$  زمان منقضی شده از کوبش و  $u$  تابعی از  $r$  و  $t$  است.

برای حل معادله فوق باید شرایط ذیل ارضا گردد:

الف- شرایط مرزی: در فاصله بی‌نهایت از شمع فشار اضافی آب حفره‌ای در کلیه زمان‌های بعد از کوبش برابر صفر می‌باشد. همچنین شمع صلب و نفوذناپذیر است.

ب- شرط اولیه: بلافاصله بعد از کوبش شمع نیاز به داشتن توزیع اولیه از فشار اضافی آب حفره‌ای است.

لازم به ذکر است که معادله حاکم بر تحقیق همان (۱) است و از این نظر نوآوری خاصی مورد تحقیق نبوده است، لیکن تلاش شد اولاً اثرات توزیع‌های مختلف فشار اضافی آب حفره‌ای بر نتایج تحقیق مطالعه شود. ثانیاً ارتباط تحکیم با باربری بررسی گردد. بنابراین توضیح لازم در این خصوص ارائه می‌شود.

#### ۳-۲- تخمین توزیع اولیه فشار اضافی آب حفره‌ای

اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از فشار اضافی آب حفره‌ای تولید شده در اثر کوبش شمع منجر به نتایج بسیار پراکنده‌ای شده است. لیکن شکل کلی تغییرات فشار اضافی آب حفره‌ای در

شکل (۳) آمده است. با این وجود اکثر مشاهدات خاطر نشان می‌کند که فشار اضافی آب حفره‌ای تولید شده در مجاورت شمعهای کوبشی در رس‌های نرم، بسیار بزرگ و از مرتبه تنش مؤثر سربار می‌باشد، اما این فشار سریعاً با فاصله گرفتن از شمع کاهش می‌یابد. در این بخش روابط متعددی که محققین برای میزان و نحوه توزیع فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه ارائه کرده‌اند، بیان می‌گردد.



شکل (۳): شکل کلی تغییرات فشار اضافی آب حفره‌ای تولید شده در اثر کوبش شمع.

#### ۳-۲-۱- رابطه لو و استرماک

لو و استرماک [۱۳] پیشنهاد کرده‌اند که فشار اضافی آب حفره‌ای تولید شده در اطراف شمع ناشی از دو عامل تغییر در تنش کل و برش تا کرنشهای بزرگ است. در نتیجه،  $\Delta u_m$  فشار اضافی آب حفره‌ای ناشی از کوبش در مجاورت شمع در خاک رس عادی تحکیم یافته را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\Delta u_m = [1 - K_0 + \left( \frac{\Delta u}{p'} \right)_m] \sigma'_{v0} \quad (2)$$

که  $\sigma'_{v0}$  تنش مؤثر عمودی و  $K_0$  ضریب فشار خاک در حالت سکون در رس دست نخورده،  $\left( \frac{\Delta u}{p'} \right)_m$  یا  $A_r$  ضریب فشار حفره‌ای در حالت گسیختگی در آزمایش سه محوری و  $\sigma'_{v0}$  تنش مؤثر قائم (سربار) در حالت اولیه می‌باشد. روی و همکاران [۲۰] رابطه فوق را به صورت زیر برای خاک‌های پیش تحکیم یافته تکمیل کرده‌اند.

$$\Delta u_m = [1 - K_0 + \left( \frac{\Delta u}{p'} \right)_m \cdot OCR] \sigma'_{v0} \quad (3)$$

که OCR نسبت پیش تحکیمی خاک می‌باشد.

پستانا و همکاران [۱۶] پیشنهاد می‌کنند که (۳) برای فشار اضافی آب حفره‌ای تولید شده تا فاصله یک برابر قطر شمع از دیوار شمع به کار رود و خارج از این فاصله متناسب با  $1/r^2$  که  $r$  فاصله از مرکز شمع است کاهش یابد.

#### ۳-۲-۲- رابطه دآپولونیا و لامبه

دآپولونیا و لامبه [۹] رابطه‌ای به صورت زیر برای فشار

اضافی آب حفره‌ای تولید شده در اطراف شمع‌های کوبیده شده در رس پیشنهاد می‌کنند:

$$\frac{\Delta u_m}{\sigma'_{v0}} = [(1 - K_0) + \frac{2s_u}{\sigma'_{v0}}] A_f \quad (4)$$

تنها پارامتر معرفی نشده در رابطه فوق  $s_u$  است که مقاومت برشی زهکشی نشده رس می‌باشد.

پولس و دیویس [۱۷] پیشنهاد می‌کنند که عبارت فوق برای فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه از سطح شمع تا فاصله  $R$  از سطح شمع به کار رود که  $R$  از  $3r_0$  تا  $4r_0$  برای رس‌های غیر حساس و تا  $8r_0$  برای رس‌های حساس تغییر می‌کند. خارج از فاصله  $R$  فرض می‌شود که فشار اضافی آب حفره‌ای به صورت معکوس با مربع فاصله  $r$  از شمع تغییر می‌کند. یعنی:

$$u_0 = \frac{\Delta u_m}{(r/R)^2} \quad (5)$$

### ۳-۲-۳- روابط رندلف و همکاران

رندلف و روس [۱۸] توانسته‌اند به کمک مدل انبساط حفره استوانه‌ای فشار آب حفره‌ای تولید شده در اثر کوبش شمع را برای مصالح الاستیک-پلاستیک کامل محاسبه کنند. آنها بر اساس مشاهدات میدانی توزیع اولیه فشار اضافی آب حفره‌ای را به صورت لگاریتمی در نظر گرفته‌اند و رابطه زیر را پیشنهاد کرده‌اند:

$$u_0 = 2c_u \ln\left(\frac{R_p}{r}\right), \quad r_0 \leq r < R_p \quad (6)$$

$$u_0 = 0, \quad r \geq R_p$$

$R_p$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_p = r_0 [G/c_u]^{1/2} \quad (7)$$

در (۶) و (۷)،  $G$  مدول برشی و  $c_u$  مقاومت برشی زهکشی نشده خاک و  $r_0$  شعاع شمع می‌باشد.

رندلف و همکاران [۱۹] برای رس‌های حساس (۶) را به صورت زیر تکمیل می‌کنند:

$$u_0 = 2c_u \ln(R_p/r) + p'_i - p'_f, \quad r_0 \leq r < R_p \quad (8)$$

$$u_0 = 0, \quad r \geq R_p$$

که  $(p'_i - p'_f)$  میزان افت تنش مؤثر میانگین در اثر دست خوردگی می‌باشد.

به کمک این رابطه نتیجه می‌گیریم که فشار اضافی آب حفره‌ای حداکثر در مجاورت شمع برابر است با:

$$\Delta u_m = c_u \ln(G/c_u) + (p'_i - p'_f) \quad (9)$$

رندلف و همکاران برای رس‌های نرم، جمله  $c_u \ln\left(\frac{G}{c_u}\right)$  را معادل  $4c_{np}$  تخمین می‌زنند که  $c_{np}$  مقاومت برشی دست نخورده خاک در کرنش مسطح می‌باشد.

### ۳-۲-۴- رابطه بوگارد و همکاران

بوگارد و همکاران [۶] رابطه‌ای را برای فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه بیان نکرده‌اند، ولی بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته روی شمع‌های واقعی و مدل، رابطه زیر را برای درجه تحکیم خاک مجاور شمع در زمان‌های مختلف بعد از کوبش ارائه نموده‌اند:

$$U = \left(\frac{t}{t_{50}}\right) / \left(1 + \frac{t}{t_{50}}\right) \quad (10)$$

که  $U$  درجه تحکیم خاک در زمان  $t$  بعد از کوبش شمع می‌باشد.  $t_{50}$  نیز زمان لازم برای رسیدن به ۵۰٪ تحکیم در خاک مجاور شمع است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$t_{50} = \frac{r_0^2}{c_h} \quad (11)$$

### ۳-۲-۵- رابطه وزیک

وزیک [۲۴] به کمک مدل انبساط حفره استوانه‌ای، رابطه زیر را برای توزیع فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه ارائه کرده است:

$$u_0 = c_u [2 \ln \frac{R_p}{r} + 0.578(3A_f - 1)], \quad r_0 \leq r < R_p \quad (12)$$

$$u_0 = 0.578c_u (3A_f - 1) \left(\frac{R_p}{r}\right)^2, \quad r \geq R_p$$

که:

$$R_p = r_0 \left(\frac{E_{u50}}{3c_u}\right)^{1/2} \quad (13)$$

$E_{u50}$  مدول تغییر شکل زهکشی نشده مطابق با اعمال نیمی از تنش انحرافی در حالت گسیختگی می‌باشد. بقیه پارامتر قبلاً تعریف شده است.

### ۳-۲-۶- رابطه ماسارچ

ماسارچ [۱۴] به کمک مدل‌های انبساط حفره استوانه‌ای و انبساط حفره کروی، رابطه زیر را برای فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه در مجاورت بدنه شمع ارائه کرده است.

$$u_0 = 2c_u \ln\left[\frac{r_0}{r} \left(\frac{E_u}{2(1+\nu)c_u}\right)^{1/2}\right] + 0.82A_f, \quad r_0 \leq r < R_p \quad (14)$$

$$u_0 = 0, \quad r \geq R_p$$

که:

$$R_p = r_0 \left[\frac{E_u}{2(1+\nu)c_u}\right]^{1/2} \quad (15)$$

می‌توان توجه کرد که با در نظر گرفتن  $E_u = E_{u50}$ ،  $G = \frac{E_u}{2(1+\nu)}$  و  $\nu = 0.5$ ،  $R_p$  محاسبه شده از (۷)، (۱۳) و (۱۵) مساوی می‌شود. همچنین جمله اول (۸)، (۱۲) و (۱۴) برای محاسبه  $u_0$  در داخل محدوده پلاستیک ( $r_0 \leq r < R_p$ ) یکی است و فقط جملات دوم با هم تفاوت می‌کند.

#### ۴-۱- حل معادله تحکیم به روش اختلاف محدود

معادله حاکم بر تحکیم خاک مجاور شمع در (۱) ارائه شد. این معادله را می‌توان به روشهای مختلف حل کرد. این بخش از مقاله به شرح شیوه کلی حل معادله تحکیم در تحقیق حاضر به روش عددی اختلاف محدود می‌پردازد.

#### ۴-۱-۱- انقطاع ساختن معادله حاکم بر تحکیم به شیوه صریح

با منقطع کردن (۱) به شیوه صریح<sup>۱</sup> و بصورت مرکزی خواهیم داشت:

$$u_r^{n+1} - u_r^n = c_h \left[ \frac{u_{r-1}^n - 2u_r^n + u_{r+1}^n}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r} \frac{u_{r+1}^n - u_{r-1}^n}{2(\Delta r)} \right] \quad (16)$$

در نتیجه:

$$u_r^{n+1} = c_h \Delta t \left[ \frac{1}{(\Delta r)^2} - \frac{1}{2r(\Delta r)} \right] u_{r-1}^n + \left[ 1 - \frac{2c_h \Delta t}{(\Delta r)^2} \right] u_r^n + c_h \Delta t \left[ \frac{1}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{2r(\Delta r)} \right] u_{r+1}^n \quad (17)$$

که  $u_r^{n+1}$  فشار اضافی آب حفره‌ای در المان  $r$  ام در گام زمانی  $n+1$  و  $u_r^n$ ،  $u_{r-1}^n$ ،  $u_{r+1}^n$  نیز به ترتیب فشار اضافی آب حفره‌ای المان‌های  $r-1$  ام،  $r$  ام و  $r+1$  ام در گام زمانی  $n$  است.  $\Delta t$  و  $\Delta r$  به ترتیب فاصله بین المان‌های شعاعی و مدت زمان بین دو گام زمانی متوالی و  $r$  نیز موقعیت شعاعی المان مورد نظر می‌باشد.

#### ۴-۲- اعمال شرایط پایداری

برای پایداری جوابها باید ضرایب  $u_{r-1}^n$ ،  $u_r^n$  و  $u_{r+1}^n$  در (۱۷) هم علامت (مثبت) باشد. پس:

$$\frac{1}{(\Delta r)^2} - \frac{1}{2r(\Delta r)} > 0 \Rightarrow \Delta r < 2r \quad (18)$$

یعنی در هر المان می‌باید بعد المان از دو برابر موقعیت شعاعی آن المان کوچکتر باشد. این شرط همیشه برقرار است.

$$1 - \frac{2c_h \Delta t}{(\Delta r)^2} > 0 \Rightarrow \Delta t < \frac{(\Delta r)^2}{2c_h} \quad (19)$$

این شرط می‌باید در انتخاب ابعاد المان و گام زمانی مد نظر قرار گیرد.

#### ۴-۳- اعمال شرط اولیه

طبق آنچه بیان شد، برای حل معادله حاکم بر تحکیم نیاز به داشتن میزان و نحوه توزیع فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه، بلافاصله بعد از کوبش شمع، می‌باشد. بدین منظور می‌توان از هر یک از روابط ارائه شده در بخش [۲-۲-۲] استفاده کرد.

#### ۴-۴- اعمال شرایط مرزی

الف- اولین شرط مرزی از نفوذ ناپذیری شمع ناشی می‌شود. با اعمال این شرط مرزی در مرز المان اول، می‌توان معادله حاکم بر تحکیم برای المان اول را به صورت زیر ساده کرد:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right] \quad (20)$$

با منقطع کردن این معادله خواهیم داشت:

$$\frac{u_1^{n+1} - u_1^n}{\Delta t} = \frac{c_h \left[ \frac{\partial u}{\partial r} \right]_1^n - \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)_1^n}{\Delta r} \quad (21)$$

عبارت دوم داخل کروشه صفر است. پس:

$$\frac{u_1^{n+1} - u_1^n}{\Delta t} = \frac{c_h}{(\Delta r)^2} (u_2^n - u_1^n) \quad (22)$$

یا

$$u_1^{n+1} = \left( 1 - \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2} c_h \right) u_1^n + \left( \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2} c_h \right) u_2^n \quad (23)$$

لازم است برای این معادله هم شرط پایداری کنترل شود.

$$1 - \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2} c_h > 0 \Rightarrow \Delta t < \frac{(\Delta r)^2}{c_h} \quad (24)$$

این شرط از شرط پایداری ارائه شده در (۱۹) ضعیف‌تر است.

ب- دومین شرط مرزی بر این اساس است که در فاصله بینهایت از شمع، فشار اضافی آب حفره‌ای در کلیه زمان‌های بعد از کوبش صفر باقی می‌ماند. به عبارت دیگر از نظر تئوری در فاصله بینهایت از شمع یک مرز زهکش دائمی وجود دارد. از نظر کاربردی، فاصله شعاعی در اطراف شمع وجود دارد که خارج از این فاصله، فشار اضافی آب حفره‌ای در کلیه زمان‌های بعد از کوبش صفر باقی می‌ماند. میزان این فاصله شعاعی از مرتبه پنج تا ده برابر فاصله شعاعی است که فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه تا این فاصله افزایش می‌یابد. هر چند که برای زمان‌های اولیه می‌توان از مقادیر کوچکتر استفاده نمود [۱۸].

#### ۴-۵- برنامه تدوین شده برای حل معادله تحکیم

برنامه‌ای به زبان فرترن تدوین شده است که با آن می‌توان این معادله را که در بخش [۴-۱-۱] منقطع شده است، حل کرد [۱]. این برنامه شرط مرزی (ب) بخش [۴-۴-۱] را برابر هزار برابر شعاع شمع در نظر می‌گیرد. یعنی برنامه در فاصله ۱۰۰۰ برابر شعاع شمع از شمع، مرز زهکش در نظر می‌گیرد که در این نقطه فشار اضافی آب حفره‌ای در کلیه زمان‌های بعد از کوبش صفر باقی می‌ماند. خروجی برنامه شامل فشار اضافی آب حفره‌ای در هر زمان بعد از کوبش برای المان چسبیده به دیوار شمع ( $r = r_0$ ) و همچنین تغییرات فشار اضافی آب حفره‌ای با فاصله شعاعی از شمع در زمان‌های مختلف بعد از

## ۵- ارتباط تحکیم و افزایش باربری شمع با گذشت

## زمان

## زمان

## ۶-۱- روابط سایر محققان

علاوه بر روابطی که قبل از این ذکر شد و تا اندازه‌ای مبنای تئوریک دارند، روابطی نیز پیشنهاد شده که مبنای آن فقط داده‌های نتایج آزمایش بارگذاری شمع می‌باشد. مشهورترین رابطه‌ای که در این زمینه پیشنهاد شده است، توسط اسکو و دنور [۲۲] ارائه شده است. آنها رابطه لگاریتمی زیر را برای افزایش ظرفیت باربری شمع با گذشت زمان پیشنهاد می‌کنند:

$$\frac{Q(t)}{Q(t_0)} = 1 + A \left[ \log \left( \frac{t}{t_0} \right) \right] \quad (30)$$

در این رابطه،  $Q(t)$  ظرفیت باربری محوری شمع در زمان  $t$  بعد از کوبش،  $Q(t_0)$  ظرفیت باربری محوری شمع در زمان  $t_0$  و  $A$  ضریب ثابت که بستگی به نوع خاک دارد.  $t_0$  نیز یک مقدار تجربی است که با روز اندازه‌گیری می‌شود.

در (۳۰)،  $t_0$  (زمان اولیه) زمانی است که در آن نرخ محو فشار اضافی آب حفره‌ای به صورت خطی با لگاریتم زمان درمی‌آید (انتهای فاز یک در شکل (۴)).  $t_0$  را می‌توان با محاسبه معکوس از داده‌های میدانی تعیین کرد و یا به کمک روابط تجربی که از مرور بر ادبیات فنی به دست می‌آید، محاسبه نمود.  $t_0$  تابعی از نوع خاک و اندازه شمع است، هر چه شمع بزرگتر باشد،  $t_0$  نیز بزرگتر است [۷]. افراد مختلف از جمله اسوینکین و اسکو [۲۳]،  $t_0$  را بین یک تا دو روز پیشنهاد می‌کنند.

پارامتر  $A$  تابعی از نوع خاک، مصالح شمع، نوع و ظرفیت باربری شمع می‌باشد و باید با محاسبه معکوس از داده‌های میدانی و یا از مقادیر موجود در ادبیات فنی تعیین شود. محاسبات انجام شده توسط محققین منجر به مقادیر  $A$  بین 0.2 تا 0.8 شده است [۴]، [۸].

اسوینکین و اسکو [۲۳]، (۳۰) را برای  $t_0 = 0.1 \text{ day}$  (تقریباً بلافاصله بعد از کوبش شمع) به صورت رابطه زیر اصلاح کرده‌اند و نشان داده‌اند که این رابطه از دقت بالاتری برخوردار است.

$$\frac{Q(t)}{Q(0)} = 1 + B [\log(t) + 1] \quad (31)$$

که  $Q(0)$  ظرفیت باربری شمع بلافاصله بعد از کوبش و  $B$  ضریب ثابت (همانند  $A$ ) می‌باشد.

در این مقاله غیر از توزیع اولیه فشار اضافی آب حفره‌ای، به مسأله نحوه ارتباط تحکیم با باربری شمع توجه دقیقی شده است. محققین روشهای متفاوتی برای تعیین تغییرات ظرفیت باربری شمع با گذشت زمان اتخاذ کرده‌اند. عمده‌ترین روش این است که ارتباطی بین پارامترهای مؤثر در ظرفیت باربری شمع و درجه تحکیم خاک بر قرار می‌سازند. آنها بر اساس مشاهدات تجربی، تغییر در ظرفیت باربری شمع‌ها با گذشت زمان را به تغییر در مقاومت برشی خاک مجاور شمع ( $c_u$ ) و به عبارت بهتر به مقاومت دگرچسبی خاک - شمع ( $\alpha c_u$ ) مربوط می‌دانند و یا بر اساس مدل‌های ریاضی و مشاهدات تجربی، تغییر در ظرفیت باربری شمع را به تغییر در تنش مؤثر شعاعی مؤثر بر بدنه شمع ( $\sigma'_r$ ) با گذشت زمان مربوط می‌کنند. برای استفاده از این روابط لازم است که با پیش‌بینی فشار آب حفره‌ای تولید شده در اثر نصب شمع، معادله حاکم بر تحکیم خاک مجاور شمع حل شود.

در تحقیق حاضر مرور مفصل ادبیات فنی در این مورد انجام شد و نهایتاً سه رابطه طبق جدول (۱) برای این موضوع انتخاب گردید. برای شرح جزئیات می‌توان به مراجع اصلی یا [۱] مراجعه نمود. در این روابط  $\sigma'_r(0)$  تنش مؤثر شعاعی خاک مجاور شمع بلافاصله بعد از کوبش،  $c_{p.s.}(0)$  مقاومت برشی کرنش مسطح خاک دست خورده و  $\phi'$  زاویه اصطکاک داخلی خاک، اندازه‌گیری شده در آزمایش سه محوری می‌باشد.  $Q_u(t)$  و  $Q_{u,max}$  نیز به ترتیب ظرفیت باربری نهایی شمع و ظرفیت باربری شمع در زمان  $t$  بعد از کوبش است.

جدول (۱)- روابط مورد استفاده برای ارتباط تحکیم و باربری

مرجع	مبانی و فرضیات	رابطه
	$\frac{Q_u(t)}{Q_{u,max}} = \frac{\sigma'_r(t)}{\sigma'_r(\infty)}$	(۲۵)
[۱۹]	$\sigma'_r(t) = \left( \frac{\sqrt{3}}{M} + 1 \right) c_{p.s.}(0) + (0.60)u_0(r_0)U(t)$ $M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'}$	(۲۶) (۲۷)
[۱۷]	$\frac{Q_u(t)}{Q_{u,max}} = U(t)$	(۲۸)
[۶]	$\frac{Q_u(t)}{Q_{u,max}} = 0.3 + 0.7U(t)$	(۲۹)

گرفته می‌شود و فرض می‌شود شمع تا این زمان به باربری نهایی خود برسد.

با محاسبه نسبت  $Q_{u,max}/Q_u(0)$  از (۲۵) و (۲۶) خواهیم داشت:

$$\frac{Q_{u,max}}{Q_u(0)} = \frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{M} + 1\right) c_{p.s.}(0) + (0.54 \rightarrow 0.60) u_0(r_o)}{\left(\frac{\sqrt{3}}{M} + 1\right) c_{p.s.}(0)} \quad (22)$$

که  $Q_u(0)$  و  $Q_{u,max}$  به ترتیب ظرفیت باربری نهایی و ظرفیت باربری شمع بلافاصله بعد از کوبش می‌باشد. با جایگزینی نسبت  $Q_{u,max}/Q_u(0)$  در (۳۱) و در نظر گرفتن  $t = 200r_0^2/c_h$  قادر به محاسبه ضریب  $B$  به صورت زیر خواهیم بود.

$$B = \frac{(0.54 \rightarrow 0.60) u_0(r_o)}{\left(\frac{\sqrt{3}}{M} + 1\right) c_{p.s.}(0)} \frac{1}{\left[\log\left(\frac{200r_0^2}{c_h}\right) + 1\right]} \quad (23)$$

با جایگزینی ضریب  $B$  از رابطه فوق در (۳۱) خواهیم داشت:

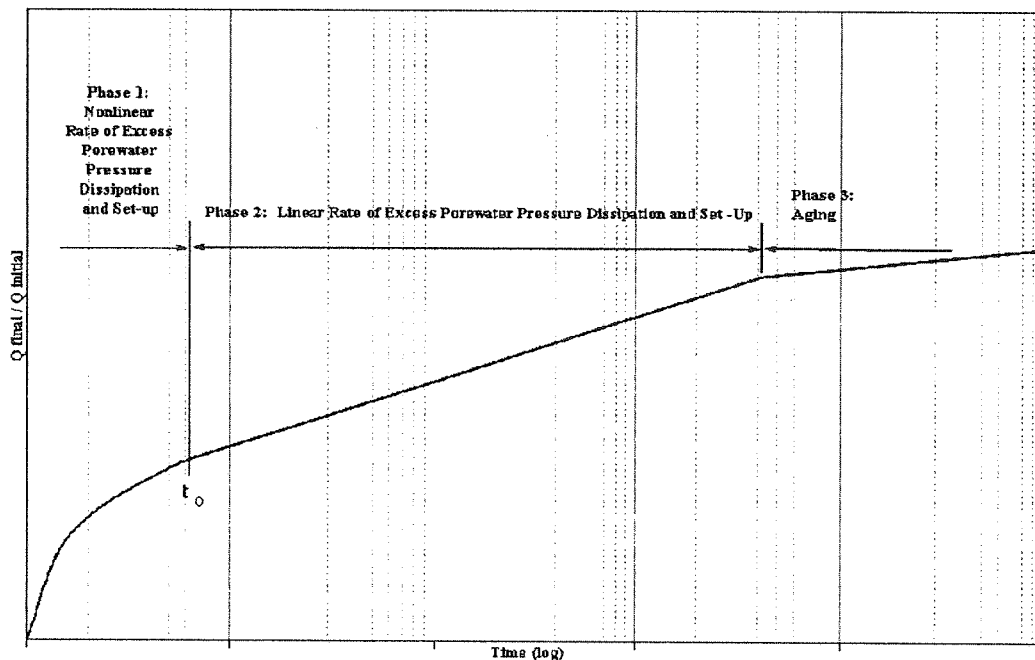
$$\frac{Q_u(t)}{Q_u(0)} = 1 + \frac{(0.54 \rightarrow 0.60) u_0(r_o)}{\left(\frac{\sqrt{3}}{M} + 1\right) c_{p.s.}(0)} \frac{[\log(t) + 1]}{\left[\log\left(\frac{200r_0^2}{c_h}\right) + 1\right]} \quad (24)$$

با توجه به فرضیات به کاررفته رابطه فوق برای زمانهای کوچکتر از  $200r_0^2/c_h$  اعتبار دارد. برای زمانهای بزرگتر از آن فرض می‌شود  $Q_u(t) = Q_{u,max}$  یعنی برای  $t > 200r_0^2/c_h$

همانطور که قبلاً ملاحظه شد، برای استفاده از روابط تخمین افزایش ظرفیت باربری وابسته به محو فشار اضافی آب حفره‌ای در شمعهای کوبیده شده در رس، یا باید معادله حاکم بر تحکیم حل شود و یا باید از نتایج آزمایشهای بارگذاری استفاده کرد. عیب اصلی روابط تجربی این است که توجهی به مکانیزم پدیده افزایش باربری با زمان نمی‌کنند. در این بخش سعی می‌شود با تلفیق این دو روش با یکدیگر، رابطه‌ای صریح برای تخمین افزایش ظرفیت باربری شمعهای کوبیده شده در رس در اثر محو فشار اضافی آب حفره‌ای استخراج شود.

همانگونه که در (شکل ۴) ملاحظه می‌شود، قسمت عمده محو فشار اضافی آب حفره‌ای به صورت تابعی لگاریتمی از زمان صورت می‌پذیرد. بنابراین طبیعی است که انتظار تابعی لگاریتمی برای افزایش باربری شمعهای کوبشی در رس وجود دارد. در این تحقیق با مبنا قرار دادن (۳۱)، سعی در یافتن مقداری مناسب برای  $B$  گردید.

محاسبات محو فشار اضافی آب حفره‌ای با گذشت زمان نشان می‌دهد که قسمت عمده تحکیم خاک مجاور شمع تا زمان  $100r_0^2/c_h$  تا  $200r_0^2/c_h$  صورت می‌گیرد و بعد از آن تنها درصد ناچیزی از فشار اضافی آب حفره‌ای باقی می‌ماند که تأثیر چندانی در افزایش باربری شمع ندارد [۱]. بنابراین زمان نهایی تحکیم خاک مجاور شمع زمان  $200r_0^2/c_h$  در نظر



شکل (۴): فازهای مختلف افزایش باربری شمع‌های کوبشی با گذشت زمان به صورت شماتیک [۱۲].



که  $Q(0)$  و  $Q(t)$  بترتیب ظرفیت باربری شمع بلافاصله بعد از کوبش و در زمان  $t$  بعد از کوبش می‌باشد.  $R_i(t)$  نیز نسبت مقاومت تیکسوتروپی می‌باشد.  $s_u(t)$  مقاومت برشی رس در زمان  $t$  و  $s_u(0)$  نیز مقاومت برشی رس بلافاصله بعد از دست خوردگی است.

یعنی به منظور وارد کردن اثر سالخوردگی یا تیکسوتروپی در افزایش ظرفیت باربری شمعهای کوبشی در رس می‌توان با آسانی ضریب تابع زمان  $R_i(t)$  را در روابط ارائه شده در بخشهای قبل ضرب کرد. به عنوان مثال، با اعمال  $R_i(t)$  در (۳۴) خواهیم داشت:

$$\frac{Q(t)}{Q(0)} = R_i(t) \left\{ 1 + \frac{(0.54 \rightarrow 0.60)u_0(r_0)}{\left(\frac{\sqrt{3}}{M} + 1\right)c_{p.s.}(0)} \cdot \frac{[\log(t)+1]}{\left[\log\left(\frac{200r^2}{c_h}\right)+1\right]} \right\} \quad (39)$$

$R_i(t)$  را باید به صورت آزمایشگاهی یا میدانی تعیین کرد. در مواردی که اندازه‌گیری افزایش مقاومت برشی رس با گذشت زمان در اثر تیکسوتروپی صورت نگرفته است، در روابط  $R_i(t)$  برابر واحد در نظر گرفته می‌شود.

#### ۷- مقایسه با اندازه‌گیری‌های میدانی

جهت ارزیابی روابط و فرضیات ذکر شده در این مقاله، نتایج آنها با دو اندازه‌گیری میدانی از افزایش باربری شمع با گذشت زمان مقایسه شده است. در این اندازه‌گیری‌های میدانی، آزمایشهای بارگذاری شمع در زمانهای مختلف بعد از کوبش انجام شده است. به منظور بررسی و ارزیابی دقیق‌تر روابط ارائه شده، ابتدا برای هر یک از مطالعات موردی، توزیع اولیه فشار اضافی آب حفره‌ای بر اساس هر یک از روابط ارائه شده در [۳-۲-۸] محاسبه شده است. سپس به کمک برنامه کامپیوتری تهیه شده، معادله حاکم بر تحکیم حل و تغییرات فشار اضافی آب حفره‌ای با گذشت زمان، بعد از کوبش در خاک مجاور شمع محاسبه شده است. سپس به کمک این محاسبات و هر یک از روابط موجود یا رابطه تجربی پیشنهادی برای افزایش باربری، تغییرات ظرفیت باربری شمع با گذشت زمان محاسبه و به صورت تابعی از زمان ترسیم شده است. در نهایت این نتایج با تغییرات واقعی ظرفیت باربری شمع مقایسه شده است. لازم به ذکر است، به دلیل اینکه در این دو مطالعه میدانی، اطلاعاتی از افزایش مقاومت برشی خاک در اثر تیکسوتروپی گزارش نشده است، در محاسبات ضریب  $R_i(t)$  برابر واحد در نظر گرفته شده است.

$$\frac{Q_u(t)}{Q_u(0)} = 1 + \frac{(0.54 \rightarrow 0.60)u_0(r_0)}{\left(\frac{\sqrt{3}}{M} + 1\right)c_{p.s.}(0)} \quad (35)$$

با تقسیم (۳۴) بر (۳۲)، برای  $t < 200r_0^2/c_h$  خواهیم داشت:

$$\frac{Q_u(t)}{Q_{u,max}} = \frac{X}{Y}$$

$$X = \left(\frac{\sqrt{3}}{M} + 1\right)c_{p.s.}(0) \left[ \log\left(\frac{200r^2}{c_h}\right) + 1 \right] + (0.54 \rightarrow 0.60)u_0(r_0)[\log(t)+1] \quad (36)$$

$$Y = \left\{ \left(\frac{\sqrt{3}}{M} + 1\right)c_{p.s.}(0) + (0.54 \rightarrow 0.60)u_0(r_0) \right\} \left[ \log\left(\frac{200r^2}{c_h}\right) + 1 \right]$$

همچنین برای  $t > 200r_0^2/c_h$ :

$$\frac{Q_u(t)}{Q_{u,max}} = 1 \quad (37)$$

برای استفاده از (۳۵)، (۳۶) و (۳۷) باید فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه در مجاورت شمع،  $u_0(r_0)$  را تخمین زد.  $u_0(r_0)$  می‌تواند از هر یک از روابط ارائه شده در [۳-۲-۳] محاسبه شود. توجه شود که در روابط فوق باید برای زمان  $t$  از واحد روز استفاده کرد.

#### ۶-۳- در نظر گرفتن اثر سالخوردگی و تیکسوتروپی

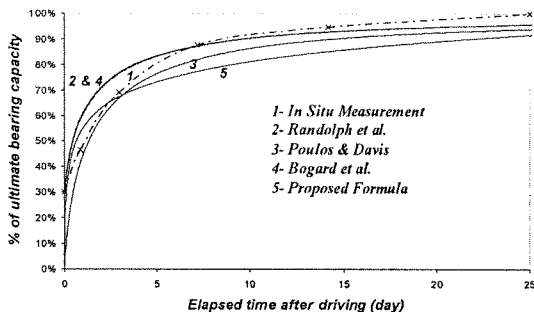
طی تحقیقات صورت گرفته در ادبیات فنی، هیچ رابطه‌ای که افزایش باربری وابسته به سالخوردگی و یا تیکسوتروپی در شمعهای کوبیده شده در رس را به صورت کمی در آورد، مشاهده نشد. ولی به هر حال در شمعهای کوبیده شده در رسهای تیکسوتروپی، باید افزایش ظرفیت باربری شمع در اثر این پدیده را در نظر گرفت. هر چند، اولاً ممکن است افزایش باربری در اثر پدیده تیکسوتروپی یا سالخوردگی همیشه اتفاق نیفتد (خاک تیکسوتروپ نباشد) و ثانیاً افزایش باربری در اثر تیکسوتروپی به زمان طولانی‌تری نسبت به افزایش باربری در اثر تحکیم نیاز دارد.

در اینجا پیشنهاد می‌شود که برای سادگی، افزایش ظرفیت باربری در اثر تحکیم و تیکسوتروپی به صورت مستقل فرض شود. اثر تیکسوتروپی می‌تواند بر حسب پارامترهای زهکشی شده یا زهکشی نشده تعیین گردد. ولی از آنجا که استفاده از پارامترهای زهکشی شده مشکل‌تر است، در اینجا جهت سادگی از پارامترهای زهکشی نشده استفاده می‌شود. بنابراین به دلیل تیکسوتروپی خواهیم داشت:

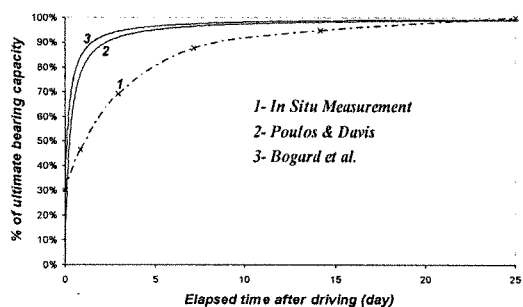
$$\frac{Q(t)}{Q(0)} = \frac{s_u(t)}{s_u(0)} = R_i(t) \quad (38)$$

## ۷-۱- آزمایشهای گزارش شده توسط سید و ریز

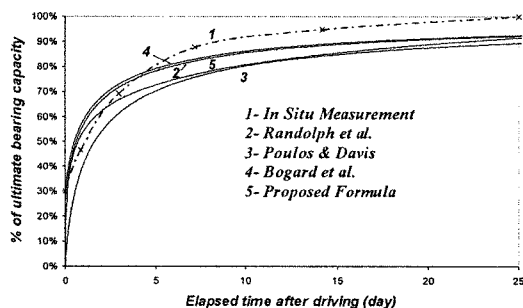
سید و ریز [۲۱] چند آزمایش بارگذاری روی شمع های ته بسته کوبیده شده در یک لایه رس سیلتی در یک سایت در نزدیکی سانفرانسیسکو انجام داده اند. شمع های مورد آزمایش به شعاع  $76/2$  میلی متر در طول یک غلاف از عمق  $2/75$  تا عمق هفت متری زمین کوبیده شدند. پروفیل مقاومت برشی خاک بطور قابل قبولی در طول شمع یکنواخت بود. میانگین مقاومت برشی دست نخورده و دست خورده این خاک به ترتیب  $12kN/m^2$  و  $5.5kN/m^2$  بود. خاک به صورت عادی تحکیم یافته بود. زاویه اصطکاک داخلی خاک  $\phi'$ ، حدود  $32$  درجه تعیین شده است. در نیمه عمق شمع، تنش مؤثر سر بار برابر  $50kN/m^2$  می باشد. ضریب تحکیم شعاعی خاک حدود  $8.2m^2/year$  محاسبه شده است. نسبت  $s_u/\sigma'_{vm}$  خاک در میانه شمع حدود  $0.24$  می باشد. میزان ضریب  $A_r$  تعیین نشده، ولی با توجه به حساسیت خاک حدود  $1.0$  تخمین زده می شود. در شکل (۵) تا شکل (۱۰) با فرضهای مختلف توزیع فشار اضافی آب حفره ای اولیه، تغییرات باربری شمع محاسبه و با اندازه گیری میدانی مقایسه شده است.



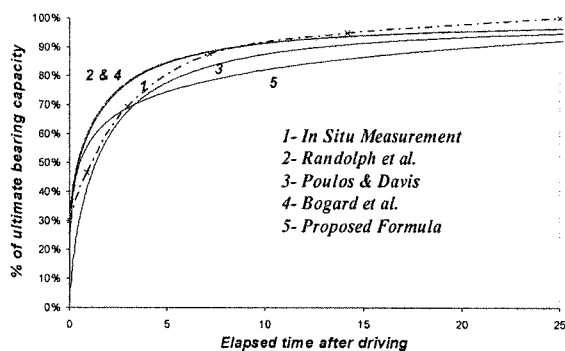
شکل (۷): مقایسه روابط افزایش باربری (با فرض رابطه رندلف و همکاران برای فشار اضافی آب حفره ای اولیه).



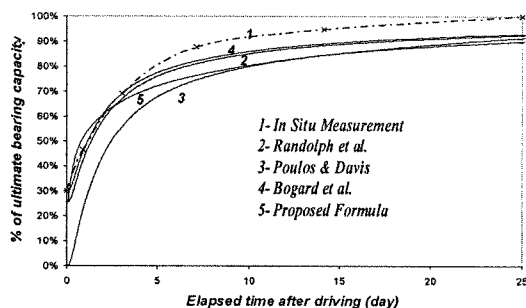
شکل (۸): مقایسه روابط افزایش باربری (با فرض رابطه تحکیم بوگارد و همکاران).



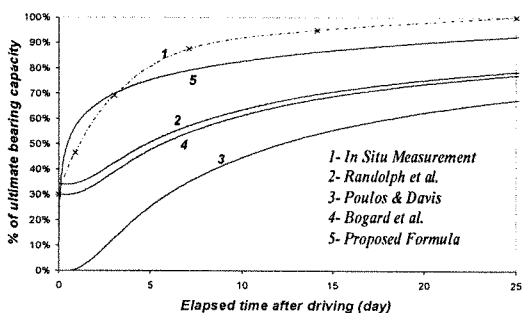
شکل (۹): مقایسه روابط افزایش باربری (با فرض رابطه وزیک برای فشار اضافی آب حفره ای اولیه).



شکل (۱۰): مقایسه روابط افزایش باربری (با فرض رابطه ماسارچ برای فشار اضافی آب حفره ای اولیه).



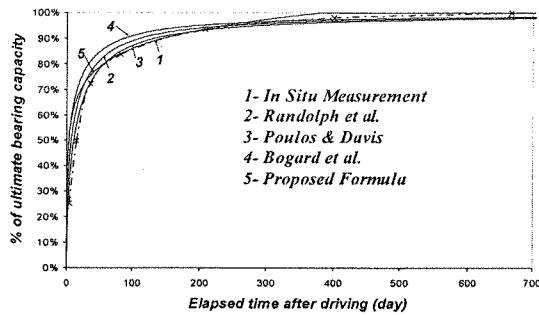
شکل (۵): مقایسه روابط افزایش باربری (با فرض رابطه لو و استرماک برای فشار اضافی آب حفره ای اولیه).



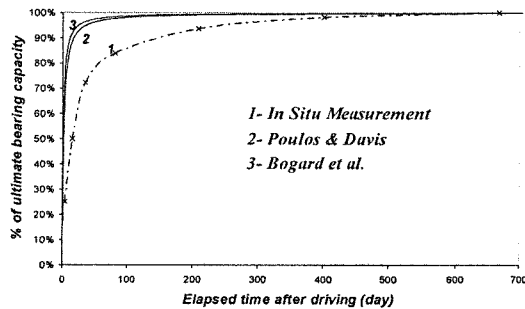
شکل (۶): مقایسه روابط افزایش باربری (با فرض رابطه دآپولونیا و لامبه برای فشار اضافی آب حفره ای اولیه).

## ۷-۲- آزمایش‌های گزارش شده توسط اید و همکاران

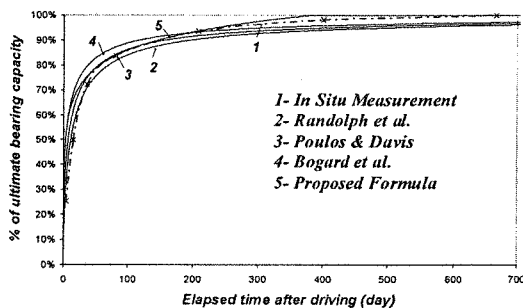
اید و همکاران [۱۰] آزمایش‌هایی روی شمعهای چوبی مخروطی کوبیده شده در رس حساس عادی تحکیم یافته نروژ انجام دادند. شمع از ۱۷/۵ تا ۷/۵ سانتی‌متر متغیر بود. شمعها از یک گودال حفاری شده به عمق ۲/۴ متر تا عمق ۱۵/۵ متر زیر سطح زمین کوبیده شدند. در نتیجه عمق نفوذ شمع ۱۲/۱ متر می‌باشد. مقاومت برشی دست نخورد خاک بین ۱۷ تا  $20 \text{ kN/m}^2$  تغییر می‌کرد. مقاومت برشی خاک در اثر دست خوردگی تا حدود  $4 \text{ kN/m}^2$  (حساسیت حدود ۵) کاهش می‌یافت. اندازه زاویه اصطکاک داخلی خاک  $\phi'$ ، حدود ۳۰ درجه تعیین شده است. در نیمه عمق شمع تنش مؤثر سربار برابر  $95 \text{ kN/m}^2$  بود. نسبت  $s_v / \sigma'_{vo}$  در میانه شمع حدود ۰.۱۸ می‌باشد. ضریب تحکیم شعاعی خاک در حدود  $3 \text{ m}^2 / \text{year}$  می‌باشد. در محاسبات شعاع شمع برابر ۱۲/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۱۱) تا شکل (۱۶) با فرضهای مختلف توزیع فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه، تغییرات باربری شمع محاسبه و با اندازه‌گیری میدانی مقایسه شده است.



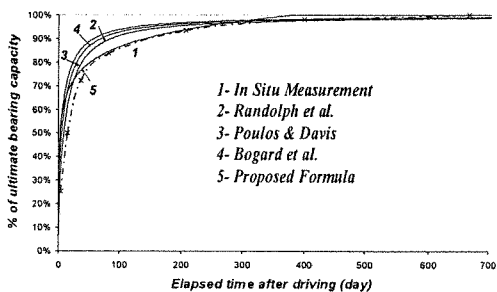
شکل (۱۳): مقایسه روابط افزایش باربری (با فرض رابطه رندلف و همکاران برای فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه).



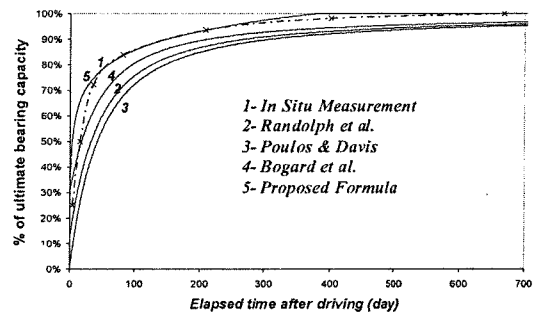
شکل (۱۴): مقایسه روابط افزایش باربری (با فرض رابطه تحکیم بوگارد و همکاران).



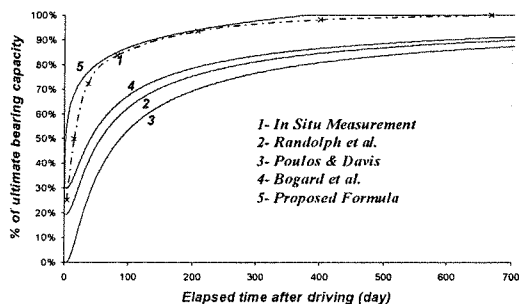
شکل (۱۵): مقایسه روابط افزایش باربری (با فرض رابطه وزیک برای فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه).



شکل (۱۶): مقایسه روابط افزایش باربری (با فرض رابطه ماسارچ برای فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه).



شکل (۱۱): مقایسه روابط افزایش باربری (با فرض رابطه لو و استرماک برای فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه).



شکل (۱۲): مقایسه روابط افزایش باربری (با فرض رابطه داپولونیا و لامبه برای فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه).

۱- ظرفیت باربری شمعهای کوبیده شده در رس نرم، با گذشت زمان افزایش می‌یابد و مهم‌ترین دلیل آن تحکیم خاک مجاور شمع و محو فشار اضافی آب حفره‌ای ناشی از کوبش است.

۲- اگر از حل معادله تحکیم برای تعیین تغییرات باربری شمع با گذشت زمان استفاده می‌شود، بکارگیری رابطه رندلف و همکاران برای توزیع اولیه فشار اضافی آب حفره‌ای (۸) و همچنین ((۲۵)) برای ارتباط بین تحکیم خاک مجاور شمع و افزایش باربری شمع، قابل توصیه است.

۳- نحوه تغییرات ظرفیت باربری شمعهای کوبیده شده در رس را می‌توان با کمک روابط پیشنهادی (۳۶) یا (۳۹) تخمین زد.

۴- بهتر است زمان آزمایش بارگذاری و یا زمانی که شمع تحت بار بهره‌برداری و خدمت‌دهی قرار می‌گیرد، بعد از محو فشار اضافی آب حفره‌ای و کامل شدن تحکیم خاک مجاور شمع باشد. بر اساس نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی، این زمان در حدود  $200r_0^2/c_h$  بعد از کوبش شمع است که  $r_0$  شعاع شمع و  $c_h$  ضریب تحکیم شعاعی خاک مجاور شمع است. اگر شمع‌ها در زمان  $t_s$  تحت بار سرویس و خدمت دهی قرار می‌گیرند و آزمایش بارگذاری در زمان  $t_i$  که کوچکتر از  $t_s$  است انجام شود ( $t_i < t_s$ )، آنگاه می‌توان با کمک روابط پیشنهادی (۳۶) یا (۳۹) ظرفیت باربری شمع در زمان  $t_s$  را تخمین زد و نتایج آزمایش بارگذاری را برای زمان بهره‌برداری اصلاح کرد.

## ۹- مراجع

- [۱] حسینی، مسعود؛ تأثیر زمان آزمایش بر نتایج بارگذاری شمعهای کوبیده شده در رس نرم (پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی)، فاخر، علی (راهنما)، گروه مهندسی عمران دانشگاه تهران، ۱۳۸۲.
- [۲] فاخر، علی؛ حسینی، مسعود؛ افزایش باربری شمعهای کوبیده شده در رس نرم با گذشت زمان، اولین کنفرانس ملی عمران، NCCE 1383، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، کد مقاله: ۱۲۱۷-۸۲-۱۳۸۲.
- [۳] نیکودل، محمدرضا، بررسی اثر بندش (تیکسوتروپی) و سیمانی شدن رسوبات ریزدانه آب شور در رفتار مکانیکی آنها (با نگرش ویژه بر دریاچه ارومیه)، پایان‌نامه دکتری زمین‌شناسی مهندسی، جلالی، حسین (راهنما)، صنعتی، همایون (مشاور)، دانشکده علوم دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۰.

همانطور که در بخشهای [۷-۱-§] و [۷-۲-§] ملاحظه می‌شود، انتخاب توزیع اولیه فشار اضافه آب حفره‌ای برای تخمین افزایش باربری شمع با گذشت زمان بسیار حائز اهمیت است و دقت روابط افزایش باربری به شدت وابسته به رابطه انتخابی برای آن است. در هر دو مطالعه موردی مشهود است که رابطه بوگارد و همکاران برای تحکیم خاک مجاور شمع، به هیچ وجه نمی‌تواند منجر به نتایج رضایت بخشی گردد. برعکس، انتخاب روش رندلف و همکاران برای تخمین فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه، موجب می‌گردد که اکثر روشهای تخمین افزایش ظرفیت باربری شمع منجر به نتایج به نسبت قابل قبولی گردد. انتخاب سایر روشها برای توزیع فشار اضافی آب حفره‌ای اولیه، منجر به نتایجی بینابین دو روش فوق‌الذکر می‌گردد.

در مورد روابط موجود برای تخمین افزایش ظرفیت باربری، تقریباً در کلیه نمودارها و با هر فرض توزیع اولیه فشار اضافه آب حفره‌ای، ملاحظه می‌گردد که رابطه ارائه شده توسط پولس و دیویس منجر به نتایج ضعیفی شده است. در مقابل، رابطه رندلف و همکاران با دقت به نسبت خوبی توانسته است افزایش ظرفیت باربری شمعهای کوبیده شده در رس را تخمین بزند. همچنین رابطه ساده بوگارد و همکاران نیز منجر به نتایج قابل قبولی شده است.

هر دو مطالعه موردی نشان می‌دهد که رابطه تجربی پیشنهادی در این مقاله می‌تواند به خوبی افزایش ظرفیت باربری شمعهای کوبیده شده در رس را تخمین بزند.

در مطالعه موردی اول ملاحظه می‌گردد که تقریباً در کلیه نمودارها در بلند مدت (بیشتر از ۱۰ روز) منحنی اندازه‌گیری میدانی درصد باربری بالاتری نسبت به نمودارهای محاسباتی نشان می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که در این مطالعه، اندازه‌گیریهای افزایش باربری فقط تا ۲۵ روز بعد از کوبش انجام گرفته و قبل از کامل شدن تحکیم متوقف شده است. لذا شمع هنوز به باربری نهایی خود نرسیده است و چون درصد باربری از تقسیم باربری در هر زمان بر آخرین اندازه‌گیری ظرفیت باربری محاسبه شده، به تبع منحنی اندازه‌گیری میدانی کمی به بالا شیف‌ت پیدا کرده است. برای مقایسه ملاحظه می‌گردد، در مطالعه موردی دوم که اندازه‌گیری های باربری تا حدود ۶۷۰ روز بعد از کوبش انجام گرفته است، منحنی‌های محاسباتی در دراز مدت بهتر با منحنی اندازه‌گیری درجا منطبق شده است.

- on Pile Research, Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, Report 51, 1976
- O'Neill, M.W.; "Side Resistance and Drilled Shafts", [۱۵] Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No.1, pp. 1-16, 2001.
- Pestana, J.; Hunt, C.; Bray, J.; "Soil Deformation and Excess Pore Pressure Field Around a Closed-Ended Pile," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 1, ASCE, pp.1-12, 2002. [۱۶]
- Poulos, H.G.; Davis, E.H.; *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley and Sons, New York, 379 p., 1980. [۱۷]
- Randolph, M.F.; Wroth, C.P.; "An Analytical Solution for the Consolidation around Displacement Piles", I.J. for Num. Math. In Geomechanics, No.3, pp. 217-229, 1979. [۱۸]
- Randolph, M.F.; Carter, J.P.; Wroth, C.P.; "Driven Piles in Clay – the Effects of Installation and Subsequent Consolidation", Géotechnique 29, No. 4, pp. 361-393, 1979. [۱۹]
- Roy, M.; Blachet, R.; Tarenas, F.; La Ruchelle, D.; "Behavior of a Sensitive Clay During Pile Driving", Can. Geotech. J., V. 18, Part 2, pp. 67-85, 1981. [۲۰]
- Seed, H.B.; Reese, L.C.; "The Action of Soft Clay Along Friction Piles", Proceedings of the American Society of Civil Engineers 81, Paper 842, 1955. [۲۱]
- Skov, R.; Denver, H.; "Time-Dependence of Bearing Capacity of Piles", Proceedings 3rd International Conference on Application of Stress-Waves to Piles, pp. 1-10, 1988. [۲۲]
- Svinkin, M.R.; Skov R.; "Set-Up Effect of Cohesive Soils in Pile Capacity", Proceedings 6th International Conference on Application of Stress Waves to Piles, Sao Paulo, Brazil, Balkema, pp. 107-111, 2000. [۲۳]
- Vesic, A.S.; "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, March, pp. 265-290, 1972. [۲۴]
- Axelsson, G.; "Long-Term Increase in Shaft Capacity of Driven Piles in Sand", Proc. 4th Int. Conf. on Case Histories in Geotech. Engrg. 1998. [۴]
- Axelsson, G.; "A Conceptual Model of Pile Set-up for Driven Piles in Non-Cohesive Soil", Deep Foundations Congress, Geotechnical Special Publication, No. 116, Vol. 1, ASCE, pp. 64-79, 2002. [۵]
- Bogard, Dowaine; Hudson, M.L.; "Comparisons of Probe and Pile test", Proc. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, , pp. 284-295, 1998. [۶]
- Camp, W.M.; Parmar, H.S.; "Characterization of Pile Capacity with Time in the Cooper Marl: A Study of the Applicability of a Past Approach To Predict Long-Term Pile Capacity", Emre, TRB, pp. 1-19, 1999. [۷]
- Chow, F.C.; Jardine, R.J.; Brucy, F.; Nauroy, J.F.; "Effects of Time on Capacity of Pipe Piles in Dense Marine Sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 3, ASCE, pp. 254-264, 1998. [۸]
- D'Appolonia, D.J.; and Lambe, T.W.; "Performance of Four Foundations on End Bearing Piles", ASCE, J. Soil Mech. Found., Div. 97, Proc. Pap. 7807, pp.77-93, 1971. [۹]
- Eide, D.; Hutchinson, J.N.; Londva, A.; "Short and Long Term Test Loading of a Friction Pile in Clay", Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Fdn. Engng, Paris, pp. 45-54, 1961. [۱۰]
- Kirby, R.C.; Esrig M.I.; "Further Development of a General Effective Stress Method for Prediction of Axial Capacity for Driven Piles in Clay", Conference on Recent Developments in the Design and Construction of Piles", Institution of Civil Engineers, London, pp. 335-344, 1979. [۱۱]
- Komurka, Van E.; Wagner, Alan B.; Edil, Tuncer B.; "Estimating Soil/Pile Set-Up", Wagner Komurka Geotechnical Group, Report No. 03-05, 43p., 2003 [۱۲]
- Lo, K.Y.; Stermac, A.G.; "Induced Pore Pressure During Pile Driving Operations", Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Montreal, Que., Vol. 2, pp.285-289, 1965. [۱۳]
- Massarsch, K.R.; *Soil Movements Caused by Pile Driving in Clay*, PH.D. Thesis, Royal Commission [۱۴]

زیر نویس ها

- ∩ Remolded Zone
- ∪ Transition Zone
- ∩ Aging
- ∩ Thixotropy
- ° Expansion of cylindrical cavity
- ∩ Explicit