دانشکده مهندسی - گروه عمران

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

گرایش مکانیک خاک و پی

عنوان :

« بررسی آزمایشگاهی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک ماسه‌ای»

دانشجو :

جواد کشاورز

استاد راهنما :

آقای دکتر جعفر بلوری بزاز

پاییز ۹۱

تقدیر و تشکر

با سپاس فراوان از استاد راهنمای فرهیخته جناب آقای دکتر بلوری بزاز که در طول مدت انجام این پایان نامه از رهنمودهای علمی واخلاقی ایشان بهره مند شدم و خداوند بزرگ را شاکرم که افتخار شاگردی ایشان را نصیبم نمود.

پادشاهی پسر به مکتب داد لوح سیمینش بر کنار نهاد

بر سر لوح او نبشته به زر جور استاد به ز مهر پدر

تقدیم اثر

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

پروردگارا

نه میتوانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دستهای پینه بسته شان که ثمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم. پس توفیقم ده که هر لحظه شکر گزارشان باشم و ثانیه های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم.

Ferdowsi University of Mashhad

Civil Engineering Department

Subject:

Experimental evaluation of lateral bearing capacity of piles in sandy soil

A Thesis

submitted in partial fulfillment of the requirements for the

Degree of Master of Science

in

Geotechnical Engineering

By:

Javad Keshavarz

Advisor:

Jafar Bolouri Bazaz

October 2012

چکیده

در بسیاری از سازه‌ها، بارهای جانبی بزرگی نسبت به بارهای ثقلی به سازه تحمیل می‌شود. شمع‌های اینگونه سازه‌ها را که تحت اثر بارهای جانبی قابل توجهی قرار می‌گیرند، می‌توان به دو گروه شمع‌های بلند و کوتاه تقسیم نمود. معمولا تخمین ظرفیت باربری شمع تحت اثر بار جانبی برای شمع‌های کوتاه بر اساس حداکثر ظرفیت باربری و برای شمع‌های بلند بر اساس تغییر مکان افقی مجاز می‌باشد. در میان نظریه‌های ارائه شده می‌توان به روش‌های هانسن، برامز، پتراسوویت، میرهوف، پراساد و چری، مدول واکنش بستر، نظریه الاستیک و حداکثر مدول افقی واکنش بستر اشاره نمود. روش برامز به عنوان معروف ترین روش، بدلیل سادگی و کاربردی بودن آن برای شمع‌های کوتاه و بلند است. در تحقیق حاضر برای بررسی رفتار شمع تحت اثر بار جانبی، از لوله‌های فلزی به عنوان شمع در آزمایشگاه استفاده شده است. شمع‌های فلزی مدفون در خاک ماسه‌ای در آزمایشگاه تحت بار جانبی استاتیکی قرار گرفته است. با بیان نظریه‌های ذکر شده و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی رفتار شمع‌ها به لحاظ تغییر طول، قطر، وزن مخصوص خاک مورد بررسی قرار گرفته است و نمودار نیرو – جابجایی برای شمع‌های مورد آزمایش تحت اثر بار جانبی ارائه شده است. مقایسه انجام شده بین نظریه‌های موجود، بیانگر این نکته است که روش پراساد و چری برای شمع‌های کوتاه و نظریه حداکثر مدول افقی واکنش بستر برای شمع‌های بلند برای تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع نسبت به دیگر نظریه‌های ارائه شده مناسب تر می‌باشد.

کلمات کلیدی: شمع‌های کوتاه و بلند، بار جانبی، ظرفیت باربری، ماسه، جابجایی افقی.

Abstract

Almost all types of piles are subjected to lateral loads. In many cases, however, the applied lateral loads are comparable with gravity loads. All piles which are subject to lateral load are usually divided into two categories: long piles and short piles. The general methods to estimate lateral bearing capacity of piles are based on ultimate bearing capacity and allowable horizontal displacement for short and long piles respectively. Several theoretical methods, including Hansen, Broms, Petrasovits, Meyerhof, Prasad and Chari, modulus of subgrade reaction, elastic approach and ultimate modulus of horizontal subgrade reaction (K_{hmax}) have been proposed to predict lateral bearing capacity of piles in cohesionless soils. In engineering practice the Broms method is most popular, since it is simple and applicable for both of short and long piles. In the present research steel pipe used as pile in laboratory to evaluate lateral capacity of piles subjected to horizontal loads. The soil, in which piles were embedded, was fine sand. According to theories and experimental test results, the behavior of piles with different length and diameter, embedded in sand was evaluated. A comparison between experimental test results and different theories reveals that Prasad and Chari method for short pile and K_{hmax} approach for long pile is more suitable for estimation of lateral bearing capacity.

Keywords: Short and long piles, Lateral load, bearing capacity, Sand, Horizontal displacement

فهرست

عنوان **صفحه**

فصل اول : کلیات **۱**
۱-۱ مقدمه ۱
۱-۲ شمع تحت اثر بار جانبی ۲
۱-۳ شمع کوتاه و بلند ۳
۱-۴ فصل‌های پایان نامه ۳

فصل دوم : روش‌های تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها **٦**
۲-۱ مقدمه ۶
۲-۲ معیار شمع کوتاه و بلند ۶
۲-۳ روش Hansen ۹
۲-۴ روش Broms ۱۱
۲-۵ روش Petrasovits and Award ۱۷
۲-۶ روش Meyerhof ۱۸
۲-۷ روش Prasad and Chari ۲۰
۲-۸ نظریه مدول واکنش بستر ۲۳
۲-۸-۱ شمع بدون پی ۲۴
۲-۸-۲ شمع دارای پی ۲۹
۲-۹ نظریه الاستیک ۳۰
۲-۱۰ نظریه حداکثر مدول افقی واکنش بستر ۳۴

فصل سوم : طراحی آزمایش‌ها و نتایج آنها **۳۸**
۳-۱ مقدمه ۳۸
۳-۲ فعالیت‌های دیگر پژوهشگران ۳۸
۳-۳ دستگاه و مصالح آزمایش ۴۰
۳-۳-۱ خاک مورد استفاده ۴۰
۳-۳-۲ شمع‌های مورد استفاده ۴۳
۳-۳-۳ مخزن خاک ۴۶
۳-۳-۴ نحوه اندازه‌گیری جابجایی افقی ۴۶

۳-۳-۵ نحوه اعمال نیروی افقی ۴۷
۳-۴ نحوه انجام آزمایش ۴۸
۳-۵ نمودارهای نیرو – جابجایی ۴۹

فصل چهارم : تحلیل و تفسیر نتایج ۷۵
۴-۱ مقدمه ۷۵
۴-۲ پیش‌بینی رفتار شمع‌ها ۷۵
۴-۳ شمع‌های کوتاه ۷۷
۴-۳-۱ ظرفیت باربری جانبی شمع‌های کوتاه ۷۷
۴-۳-۲ رفتار شمع‌های کوتاه ۸۵
۴-۳-۳ نقطه دوران در شمع‌های کوتاه ۹۴
۴-۴ شمع‌های بلند ۹۶
۴-۴-۱ ظرفیت باربری جانبی شمع‌های بلند ۹۶
۴-۴-۲ رفتار شمع‌های بلند ۱۰۵

فصل پنجم : نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۱۰
۵-۱ مقدمه ۱۱۰
۵-۲ نتیجه‌گیری ۱۱۰
۵-۳ پیشنهادها ۱۱۲

مراجع ۱۱۳

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲- ۱ معیارهای شمع بلند و کوتاه ۸
جدول ۲-۲ محدوده مدول افقی واکنش بستر ۸
جدول ۲-۳ مقایسه ظرفیت باربری شمع کوتاه تحت اثر بار جانبی مشاهده و پیش بینی شده ۲۲
جدول ۲-۴ ضرایب A و B برای شمع بلند بدون پی ۲۷
جدول ۲-۵ مقادیر پیشنهادی k_{hmax} ۳۶
جدول ۳-۱ زاویه اصطکاک داخلی بدست آمده از آزمایش برش مستقیم ۴۳
جدول ۳-۲ مشخصات لوله‌های مورد استفاده ۴۵
جدول ۳-۳ رفتار شمع‌های مورد آزمایش ۵۲
جدول ۴-۱ پیش‌بینی رفتار شمع‌ها ۷۶
جدول ۴-۲ فشار خاک در لایه‌های مختلف از رابطه هانسن ۷۷
جدول ۴-۳ فشار خاک در لایه‌های مختلف از رابطه پتراسوویت ۷۸
جدول ۴-۴ تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها ۷۹
جدول ۴-۵ نقطه دوران شمع نسبت به سطح خاک تحت اثر بار جانبی ۹۵
جدول ۴-۶ نقطه مفصل شمع نسبت به سطح خاک تحت اثر بار جانبی ۱۰۸

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ شمع کوتاه تحت بار جانبی ۷
شکل ۲-۲ شمع بلند تحت بار جانبی ۷
شکل ۲-۳ ضرایب هانسن بر حسب زاویه اصطکاک و نسبت عمق به عرض ۱۰
شکل ۲-۴ شمع کوتاه تحت اثر بار جانبی ۱۱
شکل ۲-۵ مقاومت نهایی خاک برای شمع های کوتاه تحت اثر بار جانبی . حالت های تغییر شکل: a) شمع بدون پی، b) شمع دارای پی . واکنش خاک و لنگرخمشی در خاک چسبنده: c) شمع بدون پی، d) شمع با پی . واکنش خاک و لنگرخمشی در خاک غیر چسبنده: e) شمع بدون پی، f) شمع با پی ۱۳
شکل ۲-۶ مقاومت نهایی خاک برای شمع‌های بلند تحت اثر بار جانبی . شمع در خاک چسبنده a) بدون پی، b) با پی . شمع در خاک غیر چسبنده c) بدون پی، d) دارای پی ۱۴
شکل ۲-۷ حداکثر ظرفیت بار جانبی شمع‌های کوتاه و بلند در خاک غیر چسبنده . a) مقاومت جانبی نهایی شمع کوتاه در خاک غیر چسبنده با طول مدفون ارتباط داده شده است b) مقاومت جانبی نهایی شمع بلند در خاک غیر چسبنده با لنگر مقاوم نهایی ارتباط داده شده است ۱۵
شکل ۲-۸ حداکثر ظرفیت بار جانبی شمع‌های کوتاه و بلند در خاک چسبنده . a) شمع کوتاه b) شمع بلند ۱۶
شکل ۲-۹ فرضیه توزیع فشار خاک در طول شمع ۱۷
شکل ۲-۱۰ ضریب شکل برای شمع تحت اثر بار جانبی در ماسه ۱۸
شکل۲-۱۱ ضریب فشار جانبی خاک برای رس ۱۹
شکل ۲-۱۲ ضریب فشار جانبی خاک برای ماسه ۲۰
شکل ۲-۱۳ شکل شماتیک دستگاه آزمایش ۲۰
شکل ۲-۱۴ توزیع فشار خاک ۲۱
شکل ۲-۱۵ شمع به طول L مدفون در خاک، تحت اثر نیروهای Q_g و M_g a) تغییر شکل، b) شیب، c) لنگر، d)برش، e) واکنش خاک ۲۵
شکل ۲-۱۶ ضرایب شمع‌های بدون پی مدفون در خاک غیر چسبنده ۲۸
شکل ۲-۱۷ ضرایب جابجایی و لنگر برای شمع با پی ۲۹
شکل ۲-۱۸ مقادیر I'_{ph} با فرض تغییرات خطی مدول خاک ۳۱
شکل ۲-۱۹ مقادیر I'_{pM} با فرض تغییرات خطی مدول خاک ۳۱
شکل ۲-۲۰ مقادیر F'_p با فرض تغییرات خطی مدول خاک ۳۲
شکل ۲-۲۱ لنگر حداکثر با فرض تغییرات خطی مدول خاک ۳۲
شکل ۲-۲۲ با فرض تغییرات خطی مدول خاک a) مقادیر I'_{pF} ، b) مقادیر F'_{pF} ۳۳
شکل ۲-۲۳ لنگر اتصال پی به شمع با فرض تغییرات خطی مدول خاک ۳۳
شکل ۲-۲۴ تغییرات مدول افقی واکنش بستر با کرنش ۳۴

شکل ۲-۲۵ مدول افقی واکنش بستر در برابر کرنش ۳۵
شکل ۲-۲۶ مقایسه منحنی میانگین با منحنی رابطه ۲-۶۸ ۳۵
شکل ۲-۲۶ منحنی اندازه‌گیری شده و منحنی های پیش بینی شده حد بالا و پایین با استفاده از نظریه k_{hmax} بر روی شمع پیش ساخته ۳۶
شکل ۳-۱ نمودار دانه بندی خاک مورد استفاده ۴۱
شکل ۳-۲ نمودار تنش برشی – تغییر مکان برای ماسه با وزن مخصوص $13/8\ kN/m^3$ ۴۱
شکل ۳-۳ نمودار تنش برشی – تغییر مکان برای ماسه با وزن مخصوص $15\ kN/m^3$ ۴۲
شکل ۳-۴ نمودار تنش برشی- تنش قائم برای ماسه با وزن مخصوص $13/8\ kN/m^3$ ۴۲
شکل ۳-۵ نمودار تنش برشی- تنش قائم برای ماسه با وزن مخصوص $15\ kN/m^3$ ۴۲
شکل ۳-۶ دستگاه کشش ۴۴
شکل ۳-۷ میلگردهای تراشکاری شده ۴۴
شکل ۳-۸ نمودار تنش-کرنش لوله آلمینیومی و لوله گالوانیزه ۴۵
شکل ۳-۹ پایه و گیج‌های نصب شده بر روی آن ۴۶
شکل ۳-۱۰ نحوه انتقال نیرو به شمع ۴۷
شکل ۳-۱۱ تراز مورد استفاده جهت قرار دادن شمع در خاک به صورت قائم ۴۹
شکل ۳-۱۲ هادی جهت کاهش اصطکاک سیم با بدنه ۴۹
شکل ۳-۱۳ تصویر و طرح شماتیک آزمایش ۵۰
شکل ۳-۱۴ نمودار نیرو – جابجایی با دقت متفاوت ۵۱
شکل ۳-۱۵ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک ۵۳
شکل۳-۱۶ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۳
شکل۳-۱۷ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۴۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۳
شکل۳-۱۸ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک ۵۳
شکل۳-۱۹ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۴
شکل ۳-۲۰ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۴۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۴
شکل ۳-۲۱ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک ۵۵
شکل ۳-۲۲ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۵

شکل ۳-۲۳ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در۴۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۵
شکل ۳-۲۴ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در۶۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۵
شکل ۳-۲۵ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک ۵۶
شکل ۳-۲۶ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۶
شکل ۳-۲۷ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۴۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۷
شکل ۳-۲۸ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۶۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۷
شکل ۳-۲۹ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک ۵۸
شکل ۳-۳۰ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۸
شکل ۳-۳۱ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۴۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۸
شکل ۳-۳۲ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۶۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۸
شکل ۳-۳۳ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۸۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۹
شکل۳-۳۴ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک ۵۹
شکل ۳-۳۵ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متر زیر سطح خاک ۵۹
شکل ۳-۳۶ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۴۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۵۹
شکل ۳-۳۷ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۸۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۶۰
شکل ۳-۳۸ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب
در سطح خاک ۶۰
شکل ۳-۳۹ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۰

مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۴۰ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۰
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۴۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۴۱ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۲
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک
شکل ۳-۴۲ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۲
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۴۳ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۲
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۴۰۰ میلی‌متر زیر سطح خاک
شکل ۳-۴۴ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۲
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک
شکل ۳-۴۵ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۳
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۴۶ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۳
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۴۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۴۷ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۳
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۶۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۴۸ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۳
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک
شکل ۳-۴۹ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۴
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل۳ -۵۰ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۴
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۴۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۵۱ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۴
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۶۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۵۲ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۴
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک
شکل ۳-۵۳ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۱/۷ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۵
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۵۴ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۵
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک
شکل ۳-۵۵ نمودار نیرو – جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۶
مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۵۶ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۲ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۶

مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک
شکل ۳-۵۷ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۲ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۷
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۵۸ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۲ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۷
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۴۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۵۹ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۸
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک
شکل ۳-۶۰ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۸
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۶۱ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۸
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۴۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۶۲ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۲ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۸
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک
شکل ۳-۶۳ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۲ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۹
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۶۴ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۶۹
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک
شکل ۳-۶۵ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۷۰
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۶۶ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۷۰
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۴۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۶۷ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۷۰
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۶۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۶۸ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۲ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۷۰
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک
شکل ۳-۶۹ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۲ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۷۱
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۷۰ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۷۱
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک
شکل ۳-۷۱ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۷۲
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۷۲ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۷۲
مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۴۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۷۳ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن ۷۲

مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۸۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک
شکل ۳-۷۴ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک ۷۲
شکل ۳-۷۵ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۲۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۷۳
شکل ۳-۷۶ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در ۴۰۰ میلی‌متری زیر سطح خاک ۷۳
شکل ۳-۷۷ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک ۷۴
شکل ۳-۷۸ نمودار نیرو – جابجایی لوله آلمینیومی با قطر ۲۴/۸ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح خاک ۷۴
شکل ۴-۱ جابجایی افقی شمع Ga-L40-D21.7-0 در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ به همراه تئوری‌های بیان شده ۸۰
شکل ۴-۲ جابجایی افقی شمع Ga-L60-D21.7-0 در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ به همراه تئوری‌های بیان شده ۸۰
شکل ۴-۳ جابجایی افقی شمع Ga-L80-D21.7-0 در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ به همراه تئوری‌های بیان شده ۸۰
شکل ۴-۴ جابجایی افقی شمع Ga-L40-D27-0 در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ به همراه تئوری‌های بیان شده ۸۱
شکل ۴-۵ جابجایی افقی شمع Ga-L60-D27-0 در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ به همراه تئوری‌های بیان شده ۸۱
شکل ۴-۶ جابجایی افقی شمع Ga-L80-D27-0 در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ به همراه تئوری‌های بیان شده ۸۱
شکل ۴-۷ جابجایی افقی شمع Ga-L40-D21.7-0 در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۵ به همراه تئوری‌های بیان شده ۸۲
شکل ۴-۸ جابجایی افقی شمع Ga-L60-D21.7-0 در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۵ به همراه تئوری‌های بیان شده ۸۳
شکل ۴-۹ جابجایی افقی شمع Ga-L40-D27-0 در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۵ به همراه تئوری‌های بیان شده ۸۳
شکل ۴-۱۰ جابجایی افقی شمع Ga-L60-D27-0 در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۵ به همراه تئوری‌های بیان شده ۸۳
شکل ۴-۱۱ جابجایی افقی شمع Al-L40-D24.8-0 در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ به همراه تئوری‌های بیان شده ۸۴
شکل ۴-۱۲ جابجایی افقی شمع Al-L60-D24.8-0 در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ به همراه ۸۴

تئوری‌های بیان شده
شکل ۴-۱۳ جابجایی افقی شمع Al-L80-D24.8-0 در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ به همراه تئوری‌های بیان شده ۸۵
شکل ۴-۱۴ تغییرات طول و قطر شمع در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ ۸۶
شکل ۴-۱۵ تغییرات طول و قطر شمع در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۵ ۸۶
شکل ۴-۱۶ تغییرات طول شمع در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ ۸۷
شکل ۴-۱۷ جابجایی افقی شمع با طول مدفون ۸۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ ۸۸
شکل ۴-۱۸ جابجایی افقی شمع با طول مدفون ۶۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ ۸۸
شکل ۴-۱۹ جابجایی افقی شمع با طول مدفون ۴۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ ۸۹
شکل ۴-۲۰ جابجایی افقی شمع با طول مدفون ۸۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ ۹۰
شکل ۴-۲۱ جابجایی افقی شمع با طول مدفون ۶۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ ۹۰
شکل ۴-۲۲ جابجایی افقی شمع با طول مدفون ۴۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ ۹۱
شکل ۴-۲۳ تغییرات وزن مخصوص خاک و قطر شمع به طول ۴۰۰ میلی‌متر ۹۲
شکل ۴-۲۴ تغییرات وزن مخصوص خاک و قطر شمع به طول ۶۰۰ میلی‌متر ۹۲
شکل ۴-۲۵ تغییر قطر شمع به طول ۸۰۰ میلی‌متر ۹۳
شکل ۴-۲۶ تغییرات وزن مخصوص خاک و طول شمع به قطر ۲۱/۷ میلی‌متر ۹۳
شکل ۴-۲۷ تغییرات وزن مخصوص خاک و طول شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر ۹۴
شکل ۴-۲۸ مقایسه نمودار آزمایشگاهی شمع تحت اثر بار جانبی در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۵ با نظریه الاستیک و مدول افقی واکنش بستر ۹۹
شکل ۴-۲۹ مقایسه نمودار آزمایشگاهی شمع تحت اثر بار جانبی در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۵ با نظریه حداکثر مدول افقی واکنش بستر و روش برامز ۱۰۰
شکل ۴-۳۰ مقایسه نمودار آزمایشگاهی شمع تحت اثر بار جانبی در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۵ با نظریه الاستیک و مدول افقی واکنش بستر ۱۰۱
شکل ۴-۳۱ مقایسه نمودار آزمایشگاهی شمع تحت اثر بار جانبی در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۵ با نظریه حداکثر مدول افقی واکنش بستر و روش برامز ۱۰۱
شکل ۴-۳۲ مقایسه نمودار آزمایشگاهی شمع تحت اثر بار جانبی در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ با نظریه الاستیک و مدول افقی واکنش بستر ۱۰۲
شکل ۴-۳۳ مقایسه نمودار آزمایشگاهی شمع تحت اثر بار جانبی در خاک با وزن مخصوص kN/m^3 ۱۳/۸ ۱۰۳

با نظریه حداکثر مدول افقی واکنش بستر و روش برامز
شکل ۴-۳۴ مقایسه نمودار آزمایشگاهی شمع تحت اثر بار جانبی در خاک با وزن مخصوص $15\ kN/m^3$ با نظریه الاستیک و مدول افقی واکنش بستر ۱۰۳
شکل ۴-۳۵ مقایسه نمودار آزمایشگاهی شمع تحت اثر بار جانبی در خاک با وزن مخصوص $15\ kN/m^3$ با نظریه حداکثر مدول افقی واکنش بستر و روش برامز ۱۰۴
شکل ۴-۳۶ رفتار شمع‌های آلمینیومی در خاک با وزن مخصوص $15\ kN/m^3$ ۱۰۵
شکل ۴-۳۷ جابجایی افقی شمع با طول مدفون ۸۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت در خاک با وزن مخصوص $15\ kN/m^3$ ۱۰۶
شکل ۴-۳۸ جابجایی افقی شمع با طول مدفون ۶۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت در خاک با وزن مخصوص $15\ kN/m^3$ ۱۰۶
شکل ۴-۳۹ جابجایی افقی شمع با طول مدفون ۴۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت در خاک با وزن مخصوص $15\ kN/m^3$ ۱۰۷
شکل ۴-۴۰ رفتار شمع‌های آلمینیومی در خاک با وزن مخصوص $13/8\ kN/m^3$ ۱۰۷
شکل ۴-۴۱ رفتار شمع‌های گالوانیزه‌ای در خاک با وزن مخصوص $15\ kN/m^3$ ۱۰۸

فهرست نمادها

طول مدفون شمع	L
پهنای شمع	B
مدول افقی واکنش بستر	n_h
مدول یانگ شمع	E
ممان اینرسی شمع	I_p
مدول یانگ خاک	E_s
نسبت پواسون خاک	υ_s
مدول برشی خاک	G_s
مقاومت نهایی خاک	P_{xu}
فشار موثر سربار قائم	σ_v
چسبندگی خاک	c
ضرایب هانسن	K_c و K_q
نیروی افقی اعمال شده به شمع	Q
حداکثر نیروی افقی اعمال شده به شمع	Q_u
حداکثر نیروی افقی اعمال شده به شمع در سطح زمین	Q_g
لنگر اعمال شده بر روی شمع	M
حداکثر لنگر اعمال شده بر روی شمع در سطح زمین	M_g
فاصله اعمال نیرو تا سطح خاک	e
مدول خاک زمانی که با افزایش عمق ثابت درنظر گرفته می‌شود	k
وزن مخصوص موثر خاک	γ
ضریب فشار مقاوم رانکین	k_p
ضریب فشار محرک رانکین	k_a
زاویه اصطکاک داخلی خاک	φ
عمق	x
عمقی از سطح زمین است که واکنش خاک به حداکثر می‌رسد	$x0$
نقطه دوران نسبت به سطح خاک	x_r
سختی خاک در رابطه میرهوف	K_b
پارامتر مقاومت جانبی تحت تاثیر سختی نسبی لایه‌ها و ضخامت آنها	F_b
پارامتر کاهش ظرفیت باربری در اثر لنگر	r_b
ضریب شکل	S_b
ضرایب فشار جانبی خاک در رابطه میرهوف	K_{cr} و K_{br}

پارامترهای ظرفیت باربری برای پی‌های نواری	N_c و N_q
سختی خاک در هر عمق	k_x
مدول افقی واکنش بستر	k_h
مدول افقی واکنش بستر در کرنش ۰/۰۰۲	k_{hmax}
ضرایب بکار رفته در نظریه مدول واکنش بستر	A و B و C
نرخ افزایش مدول یانگ خاک نسبت به عمق	N_h
ضرایب بکار رفته در نظریه الاستیک	I' و F'
کرنش	ε
جابجایی افقی	y

۱

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

شمع‌ها اعضایی از جنس فولاد، بتن، بتن مسلح و چوب می‌باشند که در صورت مناسب نبودن ظرفیت باربری زمین برای استفاده از پی‌های سطحی، از آن ها برای ساخت پی‌های عمیق استفاده می‌شود. در بعضی موارد همچون وجود بارهای جانبی و سنگین، وجود لایه‌های فوقانی خاک با قابلیت فشردگی زیاد، وجود خاک‌های قابل تورم یا رمبنده، و بخاطر وجود مسئله آب شستگی در محل پایه‌های پل کاربرد شمع را ایجاب می‌کند. شمع‌ها عموما عضوهای قائم یا اندکی مایل سازه‌ای هستند و در مقایسه با طول خود دارای سطح مقطع بسیار کمی می‌باشند. شمع‌ها به داخل خاک وارد می‌گردند تا بارها و نیروهای ناشی از سازه فوقانی را به خاک منتقل نمایند. طول، روش جاگذاری و عملکرد شمع‌ها در دامنه بسیار وسیعی تغییر می‌نماید، بنابراین شمع‌ها را می‌توان برای رفع نیازهای مختلف و در شرایط کاملا متفاوت به کار برد. شمع ها از هزاران سال پیش در خدمت بشر بوده و در طی این سالیان، بخصوص از زمانی که علم مکانیک خاک بوجود آمده است، سیر تکاملی پیچیده‌ای را طی نموده است همچنین موارد استفاده شمع‌ها بسیار متنوع و پیچیده تر از قبل شده است. شمع‌های چوبی و چکش‌های شمع‌کوبی دستی جای خود را به ماشین‌های بسیار پیچیده و روش‌های کاملا تخصصی واگذار نموده‌اند.

هرگاه خاک زیرین سازه واقع بر پی‌های سطحی برای تحمل وزن بنا ضعیف باشد، باید عمق پی را افزایش داده تا به خاک مناسب رسید. در چنین مواردی بارهای ناشی از وزن بنا را می‌توان با استفاده از شمع به لایه‌های زیرین خاک انتقال داد. بسته به نحوه کارگیری، شمع‌ها به چندین نوع تقسیم می‌شوند که شامل شمع‌های اتکایی، شمع‌های اصطکاکی، شمع‌های تحت بار جانبی، شمع‌های کششی، شمع‌های تراکمی و ریزشمع‌ها می‌باشند.