

مقایسه ظرفیت باربری محوری شمع‌های استوانه‌ای، مخروطی و نیمه‌مخروطی در ماسه به روش اجزای محدود

واحد قیاسی*^۱، میثم حاج صفری^۲، احسان سابوته^۳
 ۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
 ۲-۳- کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

چکیده

با تغییر هندسه مقطع شمع یا مخروطی کردن شمع‌ها، می‌توان بدون افزایش حجم مصالح مصرفی، به ظرفیت باربری بیشتری دست یافت. شمع‌های مخروطی که دارای سطح مقطع بزرگتری نسبت به قسمت انتهایی شمع هستند، از نظر ظرفیت باربری، عملکرد لرزه‌ای و همچنین توزیع بهتر مصالح در طول شمع بسیار کارآمدتر از شمع‌های استوانه‌ای می‌باشند. شمع‌های نیمه‌مخروطی که فقط قسمت بالایی آن به صورت مخروطی می‌باشد، از عملکرد و سهولت اجرایی بهتری نسبت به دو نوع قبلی (مخروطی و استوانه‌ای) برخوردار هستند هدف از انجام این تحقیق تعیین میزان افزایش ظرفیت باربری شمع‌های مخروطی و نیمه‌مخروطی نسبت به شمع‌های استوانه‌ای هم‌حجم می‌باشد. در این پژوهش آنالیز عددی به روش اجزای محدود (نرم‌افزار $D 2$ *Plaxis*) به منظور بررسی اثر تغییر زاویه نوک شمع و ارتفاع مخروطی شمع در خصوص تعیین ظرفیت باربری محوری آنها نسبت به شمع‌های استوانه‌ای هم‌حجم در ماسه پرداخته شده است. همچنین ظرفیت باربری شمع‌های نیمه‌مخروطی که از نظر محققان دور مانده است نیز در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. آنالیزها برای شمع‌های با طول مختلف انجام شده است. مقایسه مقادیر ظرفیت باربری نهایی به دست آمده از نمودار بار-نشست شمع‌ها، حاکی از ظرفیت باربری بیشتر شمع‌های مخروطی و به خصوص نیمه‌مخروطی نسبت به شمع‌های استوانه‌ای داشته است. همچنین مشاهده شد که افزایش ظرفیت باربری، بیشتر در شمع‌های با طول کوتاه اتفاق می‌افتد.

کلمات کلیدی: شمع مخروطی، شمع نیمه‌مخروطی، ظرفیت باربری شمع، زاویه شمع، مدل سازی عددی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.102011.1356	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://10.22065/jsce.2018.102011.1356	۱۳۹۸/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۳/۰۴	۱۳۹۷/۳/۰۴	۱۳۹۶/۱۲/۰۶	۱۳۹۶/۸/۰۱
			واحد قیاسی		*نویسنده مسئول:	
			v.ghiasi@malayeru.ac.ir		پست الکترونیکی:	

Compare the axial bearing capacity piles cylindrical, tapered and semi-tapered in the sand by numerical method

V. Ghiasi^{1*}, M. Hajisafari², E. Sabooteh³

1- Assistant Prof., Geotechnical Eng. Dept., Faculty of Civil Eng., Malayer University, Malayer, Iran

2-3 M.Sc. of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Eng., Malayer University, Malayer, Iran

ABSTRACT

Use piles with variable section can improve the bearing capacity of the piles, due to the larger cross-section upper part of piles. The function and easy implementation of semi-tapered piles that only the top half is in the form of a cone are better than the previous one. The purpose of this paper is determine the bearing capacity increase tapered and semi-tapered tapered piles and comparing with the cylindrical piles in the same volume condition. The modeling of this research paper is based on finite element method (Plaxis 2D software) of numerical analysis for changing the angle and tapered height of mentioned piles, axial bearing capacity of these piles in sand is estimated. Linear elastic behavior is assumed for pile and the hardening soil criterion is considered for soil. The analysis was performed for piles with different lengths. Load carrying capacity and settlement at the given particular loading were examined. Influences of stresses are also discussed with respect to change in taper angle. The results show that settlement decreases with increase in taper angle. Load-displacement curve shows that the tapered pile can take more loads compared to cylindrical pile when the taper angle load- settlement curve of piles compare showed that tapered piles bearing capacity and especially semi-tapered piles greater than cylindrical piles. It was also observed that the increase in capacity, more piles occur with short length.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 October 2017

Revise Date: 25 February 2018

Accept Date: 25 May 2018

Keywords:

Taper piles,
Semi-taper piles,
Piles bearing capacity,
Taper angle,
Numerical modeling

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.102011.1356

*Corresponding author: V. Ghiasi

Email address: v.ghiasi@malayeru.ac.ir

۱- مقدمه

مطالعه ظرفیت باربری شمع‌ها به دلیل اهمیت بالای سازه‌هایی که بار خود را از طریق شمع‌ها به زمین منتقل می‌کنند ضرورت پیدا می‌کند. یکی از اقداماتی که به منظور افزایش باربری شمع‌ها انجام شده است، تغییر هندسه شمع‌ها یا به عبارتی مخروطی کردن شمع‌هاست که این شمع‌ها را شمع‌های مخروطی یا شمع‌های با مقطع متغیر می‌نامند. شمع‌های مخروطی که در آنها با افزایش عمق از سطح مقطع آنها کاسته می‌شود، دارای مزایای قابل توجهی نسبت به شمع‌های استوانه‌ای هستند [1]. همچنین مصالح تشکیل دهنده ی شمع‌های مخروطی نسبت به شمع‌های استوانه‌ای از توزیع کارآمدتری برخوردار هستند [2]. در شمع‌های با مقطع متغیر با افزایش صلبیت ناحیه‌ی بالایی شمع، می‌توان احتمال گسیختگی این قسمت تحت بار زلزله و یا بارهای جانبی را در گروه شمع کاهش داد. در این شمع‌ها اثر گروه شمع نیز به دلیل قرار گرفتن محل تداخل حباب تنش در ناحیه پایینی شمع، کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش سطح مقطع شمع در قسمت بالایی آن، اثرات مخرب نیروی دینامیکی ماشین شمع کوب بر روی شمع در هنگام کوبش کاهش می‌یابد.

از جمله اولین تحقیقاتی که روی ظرفیت باربری شمع‌های مخروطی انجام شده است، می‌توان به مطالعات پک اشاره نمود که به بررسی و ارزیابی اثر باریک شدگی شمع روی ظرفیت باربری شمع‌های مخروطی در خاک‌های ماسه‌ای پرداخت و به این نتیجه رسید که با باریک شدگی ۱٪ یا بیشتر، می‌توان ظرفیت باربری شمع را بین ۱,۵ تا ۲,۵ برابر افزایش داد [3]. مایر هوف ۱ در مطالعات خود به این نتیجه رسید که مقاومت جانبی شمع‌های مخروطی در خاک‌های درشت‌دانه ۱,۵ برابر مقاومت جانبی شمع‌های با قطر ثابت است [4]. در سال ۱۹۹۰ نشان داده شد که ظرفیت باربری شمع‌های مخروطی کوبشی، در خاک‌های ماسه‌ای به اندازه ۲۰۰ تا ۲۵۰ درصد بیشتر از ظرفیت باربری شمع‌های استوانه‌ای با حجم و شعاع متوسط یکسان است [5]. در مطالعات آزمایشگاهی، اثر فشار محصور کننده و همچنین زاویه‌ی باریک شدگی بر ظرفیت باربری فشاری شمع‌های مخروطی واقع در خاک ماسه‌ای بررسی و مشاهده شد که مقاومت جانبی شمع‌های مخروطی تا ۴۰٪ بیشتر از شمع‌های استوانه‌ای است [6]. کامران خان و همکاران با استفاده از یک کار آزمایشگاهی بزرگ مقیاس، ظرفیت باربری شمع‌های باریک شونده و استوانه‌ای درجا را در خاک‌های چسبنده لایه‌ای بررسی کردند و با مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل‌های خود با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیز ۲ به این نتیجه رسیدند که ظرفیت باربری شمع‌های مخروطی درجا با زاویه‌ی باریک‌شدگی بین ۰,۹۵ تا ۱,۹۱ درجه به اندازه‌ی ۲۸ تا ۵۰ درصد بیشتر از شمع‌های با مقطع یکنواخت است [1]. لی و همکاران ۳ با انجام آزمایش CPT۴ به بررسی ظرفیت باربری شمع‌های باریک شونده درجا در خاک‌های ماسه‌ای پرداختند و به این نتیجه رسیدند که ظرفیت باربری نهایی شمع‌های باریک شونده، بیشتر از ظرفیت باربری نهایی شمع‌های معمولی و استوانه‌ای می‌باشد. اما با افزایش زاویه‌ی باریک شدگی، ظرفیت باربری بدنه شمع به صورت متناوب افزایش و ظرفیت باربری نوک شمع کاهش می‌یابد [7].

در سال ۲۰۰۹ محققان با تحقیقات خود نشان دادند هنگامی که شمع به سمت عمق حرکت می‌کند، مقاومت کلی شمع‌های مخروطی هرچند با زاویه‌ی مخروطی ناچیز، افزایش پیدا می‌کند. در واقع هنگامی که شمع مخروطی در حالت اصطکاکی رو به پایین نفوذ می‌کند، مکانیزم عملکرد شمع نشان می‌دهد که یک فشار همه جانبه خیلی خوب بر روی آن اثر می‌کند. آن‌ها دریافتند که مخروطی و گوه‌ای کردن شمع سبب افزایش اصطکاک جداره و نیز تنش افقی نرمال می‌شود [8]. ژان و همکاران ۵ با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ۶ به تحلیل و ارزیابی ظرفیت باربری دو سری از شمع‌های مخروطی در خاک ماسه‌ای پرداخته و در نهایت به این نتیجه رسیدند که در خاک‌های ماسه‌ای با اتساع کم، شمع‌های مخروطی نسبت به شمع‌های استوانه‌ای هم‌طول و هم‌حجم، ظرفیت باربری بیشتری دارند [9].

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود دوبعدی، به بررسی اثر زاویه مخروطی و طول شمع‌های مخروطی بر روی ظرفیت باربری محوری آنها نسبت به شمع‌های استوانه‌ای هم‌حجم در ماسه پرداخته می‌شود. همچنین ظرفیت باربری شمع‌های نیمه‌مخروطی که از نظر محققان دور مانده است نیز در این تحقیق مورد بررسی واقع می‌گردد.

1- Meyerhof

2- PLAXIS

3- Lee et al

4- Cone Penetration Test

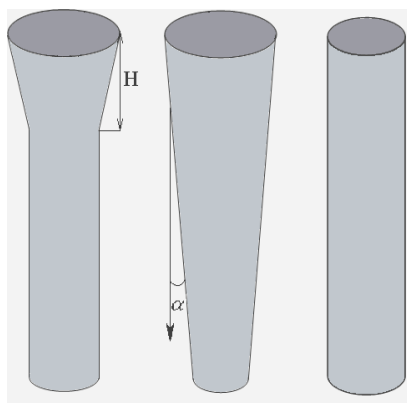
5- Gang zhan et al

6- ABAQUS

۲- مدل سازی

۲-۱- مشخصات مصالح و شرح مسأله

با استفاده از نرم افزار اجزای محدود پلکسیز دوبعدی [10]^۷، مدل سازی این تحقیق صورت پذیرفته شده است. شمع های مورد بررسی در این تحقیق شامل شمع استوانه ای، شمع مخروطی و شمع نیمه مخروطی می باشند. زاویه ی مخروطی α و ارتفاع مخروطی H شمع در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده است.



الف- شمع استوانه ای ب- شمع مخروطی ج- شمع نیمه مخروطی
شکل (۱) معرفی شمع های مورد بررسی

مشخصات مصالح خاک و شمع مورد استفاده به شرح جدول (۱) می باشد. خاک مورد استفاده در این تحقیق از نوع ماسه ای با چسبندگی ناچیز فرض شده و پارامترهای مورد استفاده برای آن بر اساس تحقیقات ژوان و همکاران انتخاب شده است [11].

جدول (۱) مشخصات مصالح خاک و شمع در حالت کلی [11]

واحد	شمع	ماسه	پارامتر
-	L-Elastic	HS	مدل مصالح
Kpa	-	1	چسبندگی
Degree	-	30	زاویه اصطکاک
-	0.15	0.35	ضریب پواسون
Mpa	35800	-	مدول یانگ
Mpa	-	15	E_{50}^{ref}
Mpa	-	15	E_{oed}^{ref}
Mpa	-	45	E_{ur}^{ref}
KN/m3	23.6	18	وزن مخصوص
Degree	-	0	زاویه اتساع

7- PLAXIS 2D

۸- سختی سکانت در آزمایش سه محوری زهکشی شده استاندارد

۹- سختی مماسی برای بارگذاری ادنومتر اولیه

۱۰- سختی باربرداری- بارگذاری مجدد

شمع‌های مورد استفاده در این تحقیق را می‌توان به چهار دسته ی کلی با طول‌های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متری تقسیم بندی کرد. شایان ذکر است که برای حفظ عملکرد مناسب شمع‌ها، طول شمع‌ها در حدود ۲۰ برابر قطر شمع لحاظ شده‌اند [12]. هر کدام از این دسته‌ها شامل سه نوع شمع استوانه‌ای، مخروطی و نیمه‌مخروطی می‌باشند که دارای زاویه و ارتفاع مخروطی مختلفی هستند. آنالیزهای لازم به منظور تعیین ظرفیت باربری شمع‌های فوق برای بررسی اثر طول و همچنین زاویه و ارتفاع مخروطی شمع‌ها بر روی میزان افزایش باربری شمع‌های با مقطع متغیر نسبت به شمع‌های استوانه‌ای انجام شده است. در جدول (۲) تقسیم‌بندی کلی شمع‌ها نشان داده شده است. در این جدول شمع‌های استوانه‌ای با C، شمع‌های مخروطی با T و شمع‌های نیمه‌مخروطی با TH نام‌گذاری شده‌اند.

جدول (۲) مشخصات هندسی شمع‌ها در حالت کلی

نوع شمع	طول شمع (m)	قطر بالایی (m)	قطر پایینی (m)	زاویه مخروطی (درجه)	ارتفاع مخروطی (m)	حجم شمع (m ³)
P5C	5	0.30	0.30	0	-	0.35
P5T1	5	0.32	0.27	0.29	-	0.35
P5T2	5	0.35	0.25	0.57	-	0.35
P5T3	5	0.37	0.22	0.86	-	0.35
P5TH1	5	0.75	0.25	14.1	1	0.35
P5TH2	5	0.57	0.25	6.09	1.5	0.35
P5TH3	5	0.50	0.25	3.57	2	0.35
P10C	10	0.50	0.50	0	-	1.96
P10T1	10	0.60	0.40	0.57	-	1.96
P10T2	10	0.70	0.30	1.14	-	1.96
P10T3	10	0.80	0.20	1.72	-	1.96
P10TH1	10	1.4	0.40	14.1	2	1.96
P10TH2	10	1.2	0.40	9.10	2.5	1.96
P10TH3	10	1.07	0.40	6.37	3	1.96
P20C	20	1	1	0	-	15.7
P20T1	20	1.20	0.80	0.57	-	15.7
P20T2	20	1.40	0.60	1.14	-	15.7
P20T3	20	1.60	0.40	1.72	-	15.7
P20TH1	20	2.25	0.90	12.7	3	15.7
P20TH2	20	1.90	0.90	7.12	4	15.7
P20TH3	20	1.70	0.90	4.57	5	15.7
P30C	30	1.50	1.50	0	-	53
P30T1	30	1.80	1.20	0.57	-	53
P30T2	30	2.20	0.80	1.33	-	53
P30T3	30	2.50	0.50	1.91	-	53
P30TH1	30	2.90	1.40	10.6	4	53
P30TH2	30	2.60	1.40	6.84	5	53
P30TH3	30	2.40	1.40	4.76	6	53

۲-۲- روش تحقیق

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار اجزای محدود پلکسیز به آنالیز شمع‌های با مقطع متغیر تحت بار محوری دینامیکی پرداخته شده است. برای هر دسته از شمع‌ها با طول مشخص، با تغییر زاویه جداره α شمع‌های مخروطی، به مقایسه این شمع‌ها با شمع استوانه‌ای نظیر پرداخته می‌شود. همچنین پارامتر متغیر شمع‌های نیمه مخروطی با طول ثابت، ارتفاع مخروطی H می‌باشد، که این شمع‌ها نیز با دو نوع قبلی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در نتیجه اثر زاویه و ارتفاع مخروطی شمع‌ها بر روی میزان افزایش باربری شمع‌های با مقطع متغیر نسبت به شمع‌های استوانه‌ای مشخص می‌شود. در نهایت روند فوق برای شمع‌های با طول مختلف نیز انجام شده، تا اثر طول شمع بر تغییر باربری این شمع‌ها نسبت به شمع استوانه‌ای نظیرشان هم مشخص گردد.

برای مدل‌سازی شمع‌ها در نرم‌افزار به دلیل تقارن شمع حول محور خود از مدل تقارن محوری استفاده شده است. برای خاک مورد استفاده نیز از مدل خاک سخت‌شونده استفاده شده است. پس از معرفی تنظیمات عمومی و ترسیم هندسه مدل، شرایط مرزی، گیرداری تعیین و یک نشست اولیه برای شمع تعریف می‌شود. همچنین به منظور مدل کردن نیروی شمع کوبی، باید یک بار دینامیکی در بالای شمع ایجاد شود. پس از این کار، با معرفی مصالح مورد نظر برای خاک و شمع انجام عملیات مش‌بندی میسر می‌گردد. در نهایت با اعمال شرایط اولیه مانند فشار خاک و آب وارد فازهای محاسباتی می‌گردد. مدل دینامیکی حاضر از چهار فاز محاسباتی تشکیل شده است: در فاز اول با استفاده از روش ساخت مرحله‌ای، مشخصات بتن به توده شمع نسبت داده می‌شود. در فاز دوم که یک فاز دینامیکی است، نیروی ضربه‌ای شمع کوب به بالای شمع با دوره $T=0.1$ ثانیه اعمال می‌شود. در این فاز شمع کوب ضربه‌ای با ضریب دامنه 5000 و فرکانس 50 سیکل بر ثانیه بر بالای شمع وارد می‌کند. در فاز سوم که این فاز هم یک فاز دینامیکی می‌باشد، از دوره زمانی 0.19 ثانیه برای ارتعاش آزاد شمع استفاده شده است. در این فاز برای شبیه سازی ارتعاش آزاد در نرم افزار از دامنه و ارتعاش صفر برای شمع استفاده شده است. در فاز چهارم نیز به روش ساخت مرحله‌ای نشست مورد نظر به بالای شمع اعمال می‌شود. پس از تکمیل فازهای محاسباتی و انجام محاسبات، نمودار بار- نشست و در نتیجه ظرفیت باربری شمع قابل تعیین است.

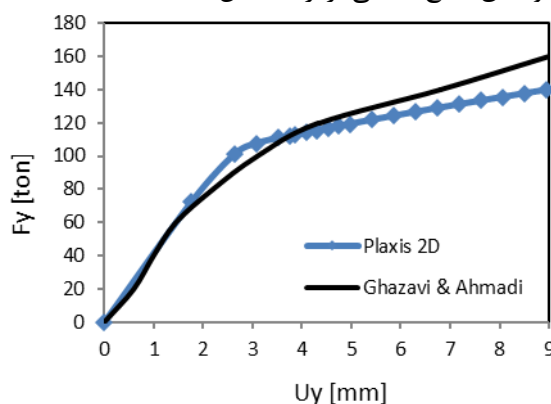
۲-۳- صحت‌سنجی

در این تحقیق برای اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده، نتایج به دست آمده از نرم‌افزار پلکسیز در حالت دینامیکی، با نتایج حاصل از کار میدانی قزافی و احمدی^{۱۱} برای شمع مخروطی که توسط ماشین شمع کوب در خاک چسبیده کوبیده شده است، مورد مقایسه قرار گرفته شده است [13]. در این شمع بتنی مخروطی، قطر سر شمع 57 سانتی‌متر، قطر نوک شمع 20 سانتی‌متر، طول شمع 12 متر و زاویه مخروط شدگی 9.9 درجه می‌باشد. از آنجا که خاک مورد نظر به صورت چسبیده است، از مدل موهر کولمب برای مدل‌سازی خاک استفاده شده است. سطح آب نیز در عمق یک متری سطح زمین قرار دارد. مشخصات خاک و شمع مورد نظر در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول (۳) مشخصات مصالح شمع و خاک [13]

واحد	شمع	خاک	پارامتر
Kpa	-	22	چسبندگی
Degree	-	31	زاویه اصطکاک
-	0.15	0.3	ضریب پواسون
Mpa	35800	50	مدول یانگ
KN/m ³	23.6	17	وزن مخصوص
Degree	-	1	زاویه اتساع

در شکل (۲) منحنی بار-نشست حاصل از مدل سازی این تحقیق توسط نرم افزار اجزا محدود با نتایج حاصل از کار میدانی مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود نمودار بار-نشست هر دو روش سازگاری خوبی با یکدیگر دارند. ظرفیت باربری در نشست ۹ میلی متر با استفاده از نرم افزار پلکسیز برابر ۱۳۸ تن و طبق نتایج میدانی برابر ۱۶۱ تن به دست آمده است که در حدود ۱۴٪ با هم اختلاف دارند.



شکل (۲) مقایسه منحنی بار-نشست حاصل از نرم افزار اجزا محدود و مطالعات میدانی

۳- تفسیر و تحلیل نتایج

در این بخش در ابتدا به تفسیر نتایج به دست آمده از آنالیز شمع های با طول مختلف به صورت مجزا پرداخته شده سپس نتایج آنالیزها برای همه ی شمع ها در یک نمودار کلی ترسیم و مورد تحلیل قرار گرفته است.

۳-۱- بررسی ظرفیت باربری شمع ها

۳-۱-۱- شمع های با طول ۵ متر

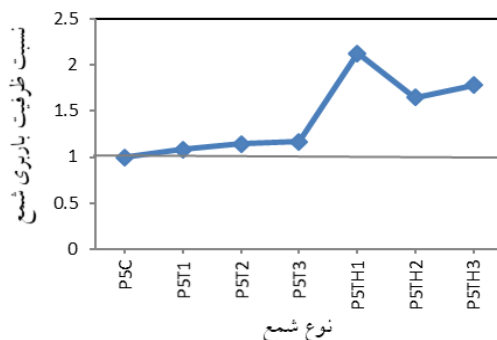
کوتاه ترین شمع های مورد بررسی در این تحقیق، شمع های ۵ متری هستند. در جدول (۴) ظرفیت باربری شمع های استوانه ای با شمع های مخروطی و نیمه مخروطی ۵ متری مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول (۴) ظرفیت باربری شمع های ۵ متری

نوع شمع	زاویه مخروطی (درجه)	ظرفیت باربری (کیلو نیوتون)	نسبت ظرفیت باربری
P5C	0	119.91	1
P5T1	0.29	130.11	1.08
P5T2	0.57	137.32	1.14
P5T3	0.86	140.92	1.17
P5TH1	14.03	255.78	2.13
P5TH2	6.09	197.63	1.65
P5TH3	3.57	212.71	1.78

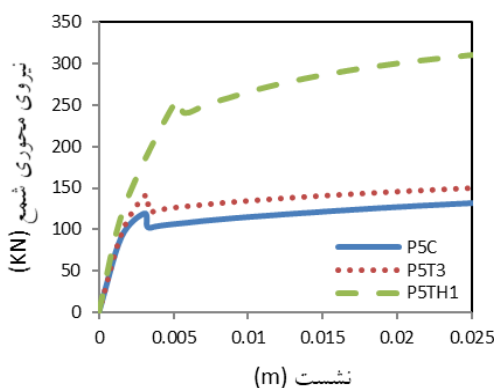
همانچنانکه از جدول (۴) مشاهده می شود، در شمع های مخروطی با افزایش زاویه مخروطی، ظرفیت باربری نیز افزایش پیدا یافته تا در نهایت در زاویه ۰٫۸۶ درجه به ۱٫۱۷ برابر شمع استوانه ای رسیده است. این در حالیست که با استفاده از شمع نیمه مخروطی در ارتفاع

مخروطی یک متر امکان افزایش زاویه مخروطی تا $14,03^\circ$ درجه فراهم گردیده، که نتیجه‌ی آن رسیدن به ظرفیت باربری قابل توجه $2,13$ برابر شمع استوانه‌ای می باشد. شکل (۳) نسبت ظرفیت باربری شمع‌های پنج متری به شمع استوانه‌ای نظیر و هم‌حجم نشان می دهد.



شکل (۳) نمودار نسبت ظرفیت باربری شمع‌های پنج متری به شمع استوانه‌ای نظیر

در شکل (۴) نمودار بار-نشست شمع استوانه‌ای ۵ متری با بهترین حالت شمع‌های مخروطی و نیمه‌مخروطی مقایسه شده است.



شکل (۴) نمودار بار-نشست شمع‌های پنج متری

با توجه به شکل (۴) افزایش ظرفیت باربری در شمع نیمه‌مخروطی، کاملاً محسوس است. همانطور که در شکل مشخص است، منحنی در نقطه‌ی قبل از 25 میلی‌متر دارای قله‌ی حداکثری و یا به اصطلاح انحنای موضعی است. لذا این نقطه به عنوان ظرفیت باربری انتخاب شده است. در سایر حالات نیز از همین نکته برای تعیین ظرفیت باربری استفاده شده است.

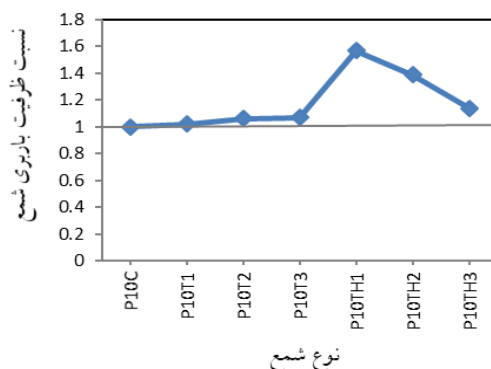
۳-۱-۲- شمع‌های با طول ۱۰ متر

در جدول (۵) ظرفیت باربری شمع استوانه‌ای با شمع‌های مخروطی و نیمه‌مخروطی 10 متری مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت، در شمع‌های مخروطی با افزایش زاویه مخروطی، ظرفیت باربری نیز افزایش پیدا کرده است تا در نهایت در زاویه $1,72^\circ$ درجه به $1,07$ برابر شمع استوانه‌ای رسیده است. این در حالیست که با استفاده از شمع نیمه‌مخروطی در ارتفاع مخروطی دو متر امکان افزایش زاویه مخروطی تا $14,03^\circ$ درجه فراهم گردیده، که نتیجه‌ی آن رسیدن به ظرفیت باربری قابل توجه $1,57$ برابر شمع استوانه‌ای بوده است.

جدول (۵) ظرفیت باربری شمع‌های ۱۰ متری

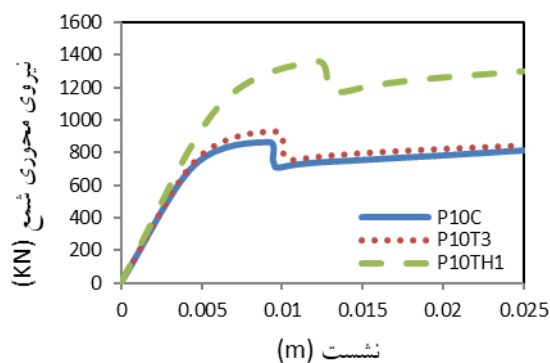
نوع شمع	زاویه مخروطی (درجه)	ظرفیت باربری (کیلو نیوتون)	نسبت ظرفیت باربری
P10C	0	866.38	1
P10T1	0.57	884.66	1.02
P10T2	1.14	922.34	1.06
P10T3	1.72	927.05	1.07
P10TH1	14.03	1361.94	1.57
P10TH2	9.10	1210.78	1.39
P10TH3	6.37	983.45	1.14

در شکل (۵) نسبت ظرفیت باربری شمع‌های ۱۰ متری به شمع استوانه‌ای نظیر و هم‌حجم نشان داده شده است.



شکل (۵) نمودار نسبت ظرفیت باربری شمع‌های ۱۰ متری به شمع استوانه‌ای نظیر

در شکل (۶) مقایسه‌ای بین نمودار بار-نشست شمع استوانه‌ای ۱۰ متری با بهترین حالت شمع‌های مخروطی و نیمه‌مخروطی انجام شده است. در این شکل افزایش ظرفیت باربری در شمع نیمه‌مخروطی، کاملاً محسوس است. همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزایش طول شمع از پنج متر به ۱۰ متر، ظرفیت باربری شمع‌های مخروطی نسبت به استوانه‌ای کاهش یافته است.



شکل (۶) نمودار بار-نشست شمع‌های ۱۰ متری

۳-۱-۳ - شمع‌های با طول ۲۰ متر

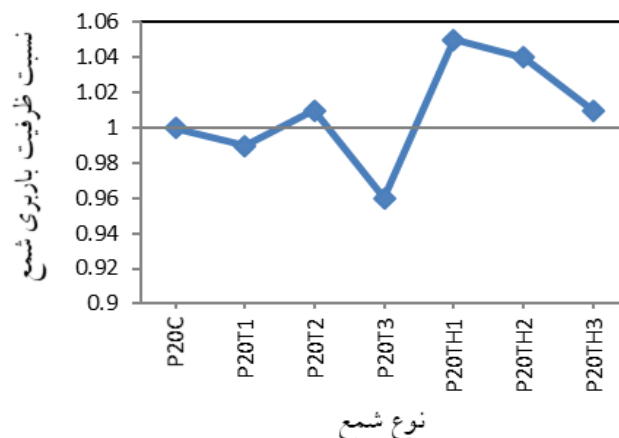
در جدول (۶) ظرفیت باربری شمع استوانه‌ای ۲۰ متری با شمع‌های مخروطی و نیمه‌مخروطی مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور

که مشاهده می‌شود در این حالت، در شمع‌های مخروطی با افزایش زاویه مخروطی، ظرفیت باربری تغییر چندانی پیدا نکرده و در برخی زوایا با کاهش باربری نیز همراه بوده است. شمع نیمه مخروطی در ارتفاع مخروطی سه متر تا پنج درصد ظرفیت باربری را افزایش داده است.

جدول (۶) ظرفیت باربری شمع‌های ۲۰ متری در حالت دینامیکی

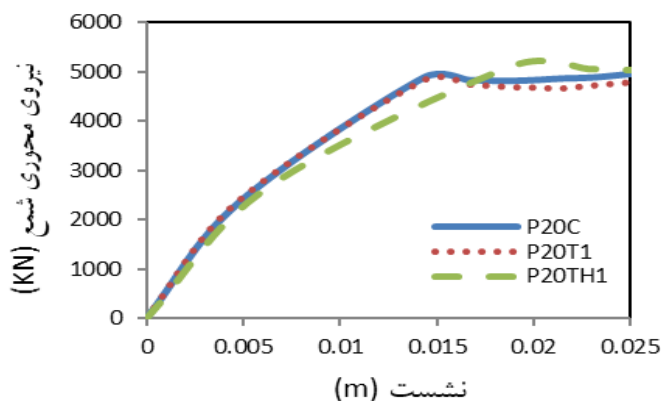
نوع شمع	زاویه مخروطی (درجه)	ظرفیت باربری (کیلو نیوتون)	نسبت ظرفیت باربری
P20C	0	4866	1
P20T1	0.57	4818	0.99
P20T2	1.14	4915	1.01
P20T3	1.72	4672	0.96
P20TH1	12.68	5109	1.05
P20TH2	7.12	5061	1.04
P20TH3	4.57	4915	1.01

در شکل (۷) نسبت ظرفیت باربری شمع‌های ۲۰ متری به شمع استوانه‌ای نظیر و هم‌حجم نشان داده شده است



شکل (۷) نمودار نسبت ظرفیت باربری شمع‌های ۲۰ متری به شمع استوانه‌ای نظیر

در شکل (۸) مقایسه‌ای بین نمودار بار-نشست نمونه‌ای از شمع‌های استوانه‌ای، مخروطی و نیمه مخروطی انجام گرفته است. در این شکل انطباق تقریبی شمع استوانه‌ای و مخروطی و همچنین افزایش ناچیز ظرفیت باربری در شمع نیمه مخروطی، نشان می‌دهد.



شکل (۸) نمودار بار-نشست شمع‌های ۲۰ متری

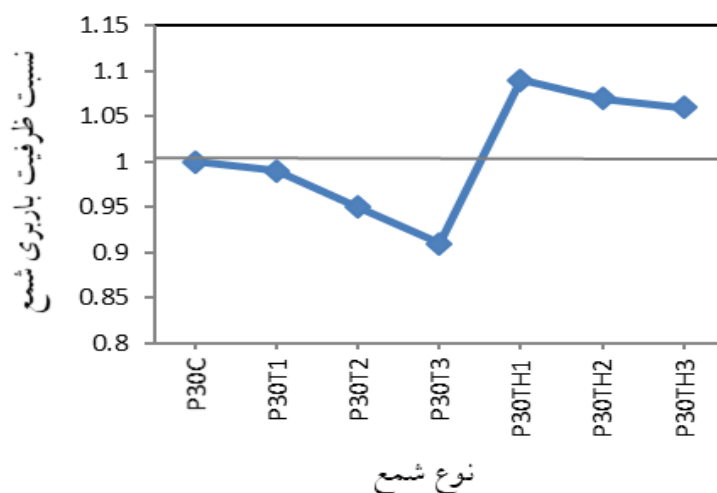
۴-۱-۳- شمع‌های با طول ۳۰ متر

در جدول (۷) ظرفیت باربری شمع استوانه‌ای با شمع‌های مخروطی و نیمه‌مخروطی ۳۰ متری مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شمع‌های طولی ۳۰ متری با افزایش زاویه مخروطی، ظرفیت باربری شمع‌های مخروطی کاهش پیدا کرده است. این در حالیست که با استفاده از شمع نیمه‌مخروطی در ارتفاع مخروطی چهار متر ظرفیت باربری حدود ۹ درصد بیشتر از شمع استوانه‌ای شده است.

جدول (۷) ظرفیت باربری شمع‌های ۳۰ متری

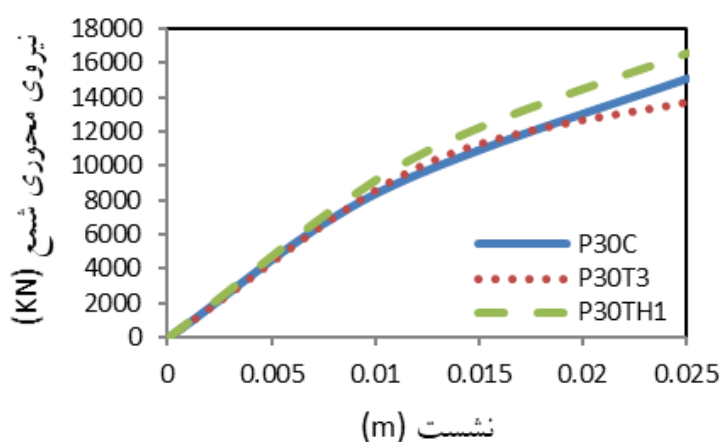
نوع شمع	زاویه مخروطی (درجه)	ظرفیت باربری (کیلو نیوتون)	نسبت ظرفیت باربری
P30C	0	15135	1
P30T1	0.57	14946	0.99
P30T2	1.33	14318	0.95
P30T3	1.91	13702	0.91
P30TH1	10.62	16522	1.09
P30TH2	6.84	16221	1.07
P30TH3	4.76	16001	1.06

در شکل (۹) نسبت ظرفیت باربری شمع‌های ۳۰ متری به شمع استوانه‌ای نظیر و هم‌حجم نشان داده شده است.



شکل (۹) نمودار نسبت ظرفیت باربری شمع‌های ۳۰ متری به شمع استوانه‌ای نظیر

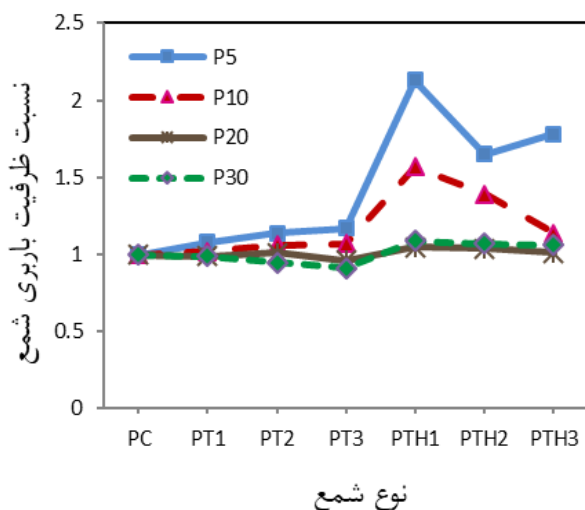
در شکل (۱۰) مقایسه‌ای بین نمودار بار-نشست نمونه‌ای از شمع‌های استوانه‌ای، مخروطی و نیمه‌مخروطی انجام گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، افزایش ظرفیت باربری در شمع نیمه‌مخروطی، کاملاً محسوس است. اما طبق شکل منحنی شمع مخروطی تقریباً بر منحنی شمع استوانه‌ای منطبق می‌باشد.



شکل (۱۰) نمودار بار- نشست شمع‌های ۳۰ متری در حالت دینامیکی

۳-۲- تحلیل نتایج ظرفیت باربری

در شکل (۱۱) نمودار نسبت ظرفیت باربری کلیه شمع‌ها نسبت به شمع استوانه‌ای هم‌حجمشان نشان می‌دهد.



شکل (۱۱) نمودار نسبت ظرفیت باربری شمع‌ها نسبت به شمع استوانه‌ای نظیر

با توجه به شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود که اثر مخروطی کردن شمع در شمع‌های کوتاه‌تر مانند شمع ۵ متری و ۱۰ متری اتفاق افتاده است. بیشترین تأثیر مربوط به شمع نیمه‌مخروطی پنج متری PTH1 می‌باشد که باربری آن ۲,۱۳ برابر شمع استوانه‌ای نظیر است. در شمع‌های ۱۰ متری نیز بیشترین تأثیر مربوط به شمع نیمه‌مخروطی PTH1 می‌باشد که باربری آن ۵۷٪ بیشتر از شمع استوانه‌ای نظیر است. در مورد شمع‌های مخروطی کامل در همه طول‌ها به جز شمع‌های ۲۰ و ۳۰ متری که ظرفیت باربری کمی کاهش یافته است، افزایش ظرفیت باربری ملاحظه می‌شود که این افزایش در مورد شمع‌های پنج متری محسوس‌تر است. اما در شمع‌های نیمه‌مخروطی در همه طول‌ها ظرفیت باربری افزایش یافته که البته این افزایش در شمع‌های ۲۰ و ۳۰ متری ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. پس در کل در شمع‌هایی که در ماسه ساخته می‌شوند، با تغییر مقطع و مخروطی کردن شمع می‌توان به ظرفیت باربری در حدود دو برابر حالت استوانه‌ای دست یافت. البته این کار در شمع‌های با طول کوتاه جنبه‌ی اقتصادی بیشتری دارد و همانطور که ملاحظه شد، ظرفیت باربری در شمع‌های ۵ و ۱۰ متری بیشتر از شمع‌های بلند ۲۰ و ۳۰ متری تحت اثر مخروطی شدن شمع قرار می‌گیرد.

جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از آنالیز عددی اجزای محدود، به مقایسه ظرفیت باربری محوری شمع‌های با مقطع متغیر و استوانه‌ای هم‌حجم با طول‌های مختلف در نوعی خاک ماسه پرداخته شده است. همچنین اثر طول، زاویه و ارتفاع مخروطی شمع‌های مخروطی و نیمه‌مخروطی بر ظرفیت باربری این شمع‌ها بررسی شده است. نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

۱- با استفاده از شمع‌های با مقطع متغیر در ماسه، می‌توان به ظرفیت باربری بیشتری نسبت به شمع‌های استوانه‌ای هم‌حجم دست یافت.

۲- به طور معمول با افزایش زاویه مخروطی شمع‌های مخروطی، ظرفیت باربری فشاری شمع افزایش می‌یابد. در شمع‌های نیمه‌مخروطی با کاهش ارتفاع مخروطی، زاویه مخروطی و در نتیجه ظرفیت باربری شمع بیشتر می‌شود.

۳- مخروطی کردن شمع بیشتر برای شمع‌های با طول کوتاه مؤثر است؛ به طوری که در شمع‌های با طول ۵ و ۱۰ متری افزایش ظرفیت باربری شمع‌ها مشهود است اما در شمع‌های با طول ۲۰ و ۳۰ متر در برخی موارد ظرفیت باربری کاهش یافته است. لذا برای شمع‌های با طول بلند، مخروطی کردن شمع توصیه نمی‌شود.

۴- ظرفیت باربری شمع‌های نیمه‌مخروطی به طور قابل ملاحظه‌ای از دو نوع دیگر بیشتر است. با وجود این که شمع‌های مخروطی کامل در برخی حالات با کاهش ظرفیت باربری همراه بودند، اما شمع‌های نیمه‌مخروطی در هیچ حالتی ظرفیت باربری کمتر از شمع استوانه‌ای را نتیجه ندادند. بیشترین افزایش باربری مربوط به شمع نیمه‌مخروطی P5TH1 بود که ظرفیت باربری را در حدود ۲,۱۳ برابر نمونه استوانه‌ای نظیرش افزایش داده است. این در حالیست که بیشترین ظرفیت باربری مربوط به شمع‌های مخروطی در شمع ۵ متری رخ داد که مقدار آن حدود ۱۷٪ بود.

مراجع

- [1] Khan, M. K., El Naggar, M. H., & Elkasabgy, M. (2008). Compression testing and analysis of drilled concrete tapered piles in cohesive-frictional soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 45,3, 377-392.
- [2] Wei, J., & El Naggar, M. H. (1998). Experimental study of axial behavior of tapered piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 35,4, 641-654.
- [3] Peck, R. B. (1959). A study of the comparative behavior of friction piles. *Highway Res Abstracts Hwy Res Board*, 29, 4, 30-39
- [4] Mayerhof, G. G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 102, 3, 195-228
- [5] Zil'berberg, S. D., & Sherstnev, A. D. (1990). Construction of compaction tapered pile foundations. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 27,3, 96-101.
- [6] Wei, J., & El Naggar, M. H. (1998). Experimental study of axial behavior of tapered piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 35, 4, 641-654.
- [7] Lee, J., Paik, K., Kim, D., & Hwang, S. (2009). Estimation of axial load capacity for bored tapered piles using CPT results in sand. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135, 9, 1285-1294.
- [8] Manandhar, S., Yasufuku, N., & Shomura, K. (2009). Skin Friction of taper-shaped piles in sands; In *ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 93-102.
- [9] Zhan, Y. G., Wang, H., & Liu, F. C. (2012). Numerical study on load capacity behavior of tapered pile foundations by Using ABAQUS. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, Bund N.
- [10] Plaxis Manual. Plaxis 2D-Version 8. Edited by R. B. J. B. Brinkgreve. (2006). *Delft University of Technology & Plaxis b.v. The Netherlands*.

- [11] Xuan, F., Xia, X. H., & Wang, J. H. (2009). The application of a small strain model in excavations. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 14, 4, 418-422.
- [12] Naggar, M. H. E., & Sakr, M. (2000). Evaluation of axial performance of tapered piles from centrifuge tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 6, 1295-1308.
- [13] Ghazavi, M., & Ahmadi, H. A. (2008). Long-term capacity of driven non-uniform piles in cohesive soil-field load tests. *Proceedings of the 8th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles*. Lisbon, Portugal, 139-132.