

بررسی آزمایشگاهی ظرفیت باربری شمع‌های مخروطی در خاک‌های ماسه‌ی تحت بارهای استاتیکی قائم

پیمان علی‌مردادی* (دانشجوی کارشناسی ارشد)

کاظم برخوردار (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه یزد

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۴)
دربی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۱۱۳-۱۲۰، (یادداشت فنی)

مطالعاتی که تاکنون بر روی شمع‌ها صورت گرفته است، عموماً بر روی شمع‌های استوانه‌یی بوده است. پژوهش‌های محدودی که بر روی شمع‌های مخروطی انجام شده است، بیانگر مزیت این نوع شمع‌ها از نظر ظرفیت باربری و سختی است. در این نوشتار به مقایسه‌ی ظرفیت باربری ۴ نوع شمع مخروطی با زاویه‌های مختلف در ماسه‌ریزدانه‌ی گردگوشه معروف به ماسه‌بادی یزد و ماسه‌شکسته‌شده به روش مصنوعی تحت نیروی استاتیکی که بر روی دستگاه نیروسنجی قرار گرفته‌اند، در محیط آزمایشگاهی پرداخته شده است. با داشتن بار سر، نوک و جداره‌ی شمع، نمودار متناظر با نشست برای نیروهای حاصل ترسیم و ظرفیت باربری تعیین شده است. نتیجه‌ی حاصله بیانگر این امر است که شمع ۲/۴۵ درجه در ماسه‌شکسته‌شده به روش مصنوعی بیشترین ظرفیت باربری را دارد و در ماسه‌بادی با افزایش زاویه‌ی مخروط‌شدگی، ظرفیت باربری کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری شمع مخروطی، شیب بهینه‌ی مخروطی، شمع با مقطع متغیر در خاک ماسه‌یی.

alimoradi.peyman@gmail.com
kbarkhordari@yazd.ac.ir

۱. مقدمه

در صورتی که پی‌های سطحی از نظر ظرفیت باربری و یا نشست‌پذیری مناسب نباشند، گزینه‌ی جایگزین استفاده از پی‌های عمیق (شمع‌ها) است. استفاده از شمع‌های با مقطع ثابت در طول (استوانه‌یی و منشوری) در عمل کاربرد فراوانی دارد. شمع‌های مخروطی به علت مطالعات کمتر موجود در مورد آن‌ها و همچنین کافی نبودن معیار مناسب، کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بررسی‌ها و مطالعاتی که تاکنون صورت پذیرفته است، حاکی از برتری نسبی شمع‌های مخروطی نسبت به شمع‌های استوانه‌یی است. در سال‌های ۱۹۶۳ الی ۱۹۹۸ نخستین پژوهشگران در این زمینه به مطالعه پرداخته‌اند^[۱-۴] بعد از آنها عموماً مطالعات بر روی مدل‌های عددی و با استفاده از نرم‌افزارهای مربوط انجام شده است. برای مثال پژوهشگری در سال ۱۳۸۵ به صورت آزمایشگاهی به مطالعه در این زمینه پرداخته است.^[۵] وی در آزمایش خود فقط به بررسی ظرفیت باربری شمع و نشست آن پرداخته است. پژوهشگرانی نیز در سال ۲۰۱۱ به بررسی تأثیر مخروط‌شدگی شمع در خاک پیرامون شمع و به بررسی نیروی وارد به ۴ نوع شمع در ۲ نوع خاک ماسه‌یی به صورت آزمایشگاهی پرداخته‌اند.^[۶]

در این مطالعه از ۴ نمونه شمع با زاویه‌های مخروطی مختلف و دو نمونه خاک

با زاویه‌ی اصطکاک داخلی متفاوت استفاده شده است. نحوه‌ی کار به این‌گونه است که شمع‌ها بر روی دستگاه نیروسنج^۱ و درون دو نوع خاک، که یکی ماسه‌ریزدانه و گردگوشه، معروف به ماسه‌بادی یزد و دیگری ماسه‌درشت‌دانه با گوشه‌های تیز، که به روش مصنوعی تولید شده است، قرار گرفته‌اند. سپس شمع‌ها تحت بارگذاری قرار گرفته و میزان نشست با استفاده از گیج، که در بالای سر شمع قرار داشت، اندازه‌گیری شده است. همچنین نیروی انتقال‌یافته به نوک شمع با استفاده از دستگاه نیروسنج اندازه‌گیری و نمودار نیرو - نشست ترسیم شده است.

۲. وسایل و نمونه‌های آزمایشگاهی مورد استفاده

ابتدا ۴ نمونه شمع بتنی مسلح‌شده با میلگرد (در میان آن‌ها) ساخته شده‌اند (شکل‌های ۱ و ۲). شمع‌ها دارای ۴ زاویه‌ی مخروط‌شدگی مختلف بودند که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

در جدول ۲، مشخصات خاک‌های مورد آزمایش ارائه شده است. دانه‌بندی خاک‌های مورد آزمایش که با استفاده از آزمایش دانه‌بندی به دست آمده است، در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۴ تصویر دو نوع خاک ارائه شده است. با آزمایش باربری کالیفرنیا، CBR با شماره‌ی استاندارد (ASTM D ۱۸۸۳-۸۷)،

* نویسنده مسئول

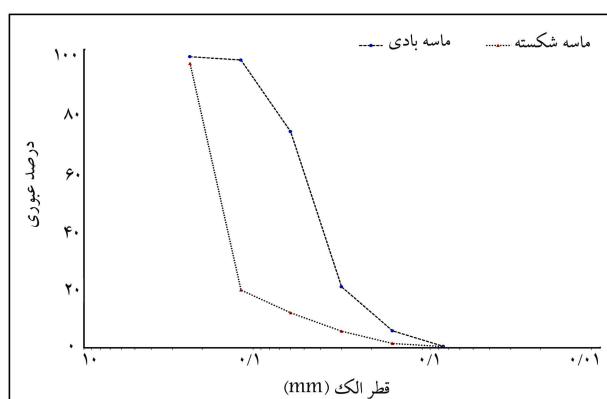
تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۰/۷، پذیرش ۱۳۹۲/۱۰/۱۷.

جدول ۱. مشخصات شمع‌های مورد آزمایش.

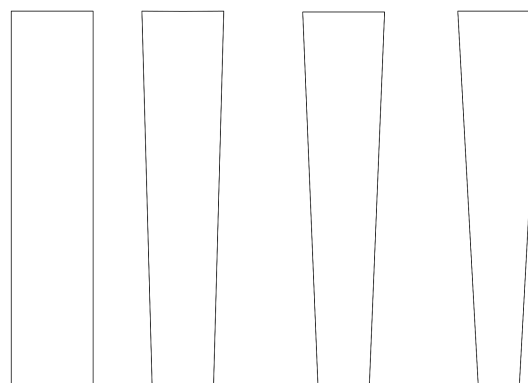
نام شمع بنتی	زاویه‌ی اصطکاک شمع با ماسه (درجه)		طول شمع (mm)	قطر بالایی (mm)	قطر پایینی (mm)	شیب مخروط‌شدگی (درجه)
	شکسته	بادی				
استوانه	۲۵٫۵	۳۴	۷۰۰	۸۰	۸۰	۰
۱ درجه	۲۵٫۵	۳۴	۷۰۰	۱۰۰	۶۰	۱٫۶۳۶
۲ درجه	۲۵٫۵	۳۴	۷۰۰	۱۱۰	۵۰	۲٫۴۵۰
۳ درجه	۲۵٫۵	۳۴	۷۰۰	۱۲۰	۴۰	۳٫۲۷۰

جدول ۲. مشخصات خاک‌های مورد آزمایش.

نوع ماسه	نوع دانه‌بندی	ضریب دانه‌بندی	ضریب یکنواختی	نیروی چسبندگی (KN)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (درجه)	جرم حجمی متوسط (gr/cm ³)
بادی	SP	۰٫۹۶	۳٫۴۴	۰	۳۳٫۵	۱٫۸۵۱
شکسته	SP	۰٫۹۷	۱٫۵۷	۰	۴۵٫۵	۱٫۷۴۶



شکل ۳. نمودار دانه‌بندی خاک‌های مورد آزمایش.



شکل ۱. شمع‌های مورد آزمایش.



شکل ۴. خاک‌های مورد آزمایش.

خاک به دست آمده و با استفاده از رابطه‌ی ۱، مدول کشسانی ماسه‌های مورد آزمایش تعیین شده است، [۸] همچنین جرم حجمی بیشینه نیز با همین آزمایش تعیین شده است.

$$E = 22.4 \text{ CBR}^{0.5} \quad (1)$$

همچنین با استفاده از روش استاندارد، پارامتر چگالی ذرات جامد (G_s) تعیین شده است. در جدول ۳، مشخصات دیگر خاک ارائه شده است.

در شکل ۵، دستگاه بارگذاری نشان داده شده است، که طول بازوی محل



شکل ۲. تصویر شمع‌های ساخته شده.



شکل ۷. نحوه‌ی قرارگیری شمع بر روی نیروسنج.



شکل ۸. سیستم بارگذاری.

با توجه به اینکه بارگذاری به صورت دستی بوده است، بار وارده به سر شمع توسط وزنه‌ها اعمال شده است. به همین دلیل در هر مرحله بارگذاری بعد از مدت ۵ الی ۷ دقیقه (در صورت ثابت شدن نشست به مدت ۲ دقیقه) میزان نشست یادداشت شده است. با توجه به اینکه نسبت بازوها ۱ به ۳ است، نیروی وارد به شمع ۳ برابر خواهد شد، یعنی در صورت قراردادن وزنه‌ی ۱۰ کیلوگرمی، نیروی وارده به سر شمع ۳۰ کیلوگرم است. در شکل ۷، نحوه‌ی قرارگیری شمع درون مخزن نشان داده شده است.

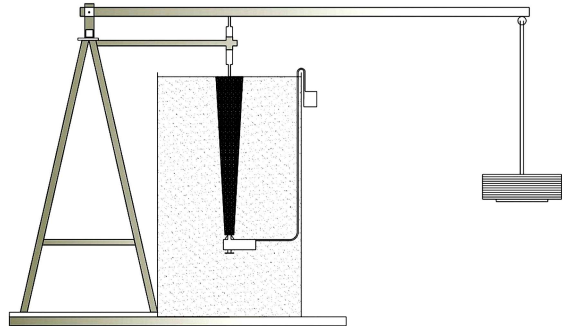
۴. نتایج آزمایش

برای بالابردن دقت در آزمایش، بارگذاری‌های انجام شده بر روی هر شمع ۲ الی ۳ بار تکرار و با میانگین‌گیری، نتیجه‌ی هر مورد از آزمایش‌ها نوشته شده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودارهای نیرو وارده به سر شمع و نشست متناظر با آن در هر شمع نشان داده شده است.

تاکنون روش‌هایی برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها تحت بار استاتیکی محوری، از روی نمودار نیرو - نشست طرح شده است، که بررسی‌های فلتنیوس نشان می‌دهد که چند مورد از آنها بیشتر از سایر روش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند.^{[۹]، [۱۰]} این

جدول ۳. مشخصات خاک‌های مورد آزمایش.

نوع ماسه	مدول کشسانی (Mpa)	چگالی ذرات جامد (%)	رطوبت طبیعی (%)	جرم حجمی بیشینه (gr/cm ³)
بادی	۸۹٫۶	۲٫۶۸	۰٫۲۹۴	۱٫۹۱۸
شکسته	۱۴۵٫۲	۲٫۶۲	۰٫۰۸۸	۱٫۷۷۹



شکل ۵. سیستم بارگذاری.

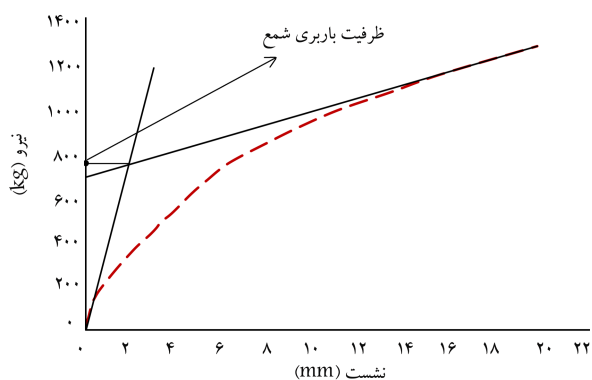


شکل ۶. محل قرارگیری نشست‌سنج روی سر شمع.

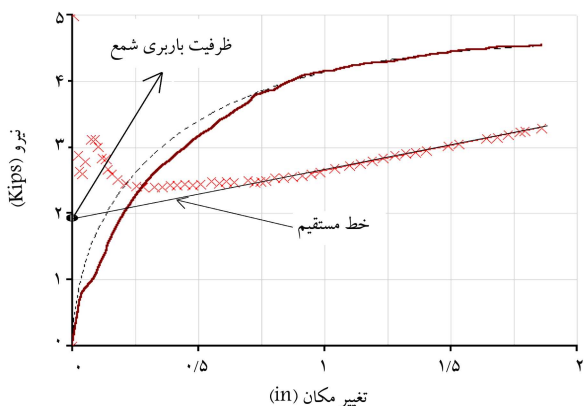
بارگذاری، ۳ برابر بازوی محل اعمال بار به سر شمع است. در شکل ۶، نحوه‌ی قراردادن نشست‌سنج روی سر شمع نشان داده شده است. همچنین در شکل ۷ نحوه‌ی قرارگیری نوک شمع بر روی نیروسنج نشان داده شده است. در شکل ۸ سیستم بارگذاری که به صورت دستی و مرحله‌به‌مرحله انجام می‌شود نشان داده شده است.

۳. نحوه‌ی انجام آزمایش

ابتدا درون مخزن که به ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر و قطر ۶۴ سانتی‌متر است، توسط خاک پر شده است. نحوه‌ی پرکردن مخزن به این صورت است که ارتفاع مخزن به دو قسمت ۱۷٫۵ سانتی‌متری در کف و ۴ لایه‌ی ۱۶٫۲۵ در بالا تقسیم و به صورت بارشی (با استفاده از یک الک) و به آرامی هر لایه پر و با چکش استاندارد ۴۰ ضربه بر روی آن وارد شده است. این کار در هر لایه تکرار شده است، تا اینکه مخزن پر شود. این تذکر لازم است که شمع بعد از ۳۵ سانتی‌متر خاک‌ریزی بر روی خاک قرار گرفته است. بعد از انجام این کار شمع تحت بارگذاری قرار گرفته است.



شکل ۱۲. تعیین ظرفیت باربری شمع نوردلند. [۹]



شکل ۱۳. نمودار تعیین ظرفیت هسنن.

خط راست در شکل ۱۱، شیئی برابر با قسمت کشسان نمودار دارد و از نقطه‌یی به معادله‌ی ۲ شروع شده است:

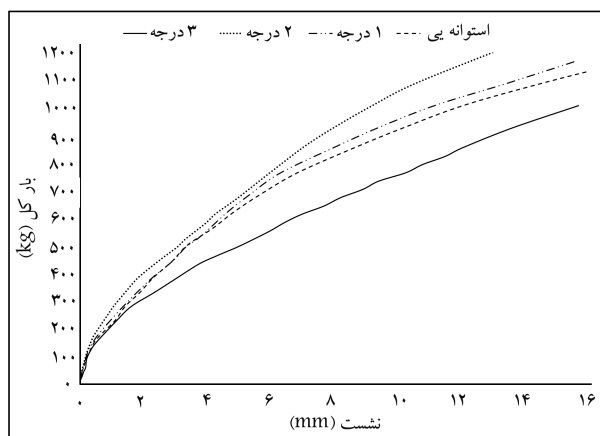
$$offset = 4 + \frac{b}{120} \quad (2)$$

که در آن، b قطر شمع است. نوردلند - باتر و هولی نیز از تلاقی امتداد دو قسمت خطی نمودار نیرو - نشست به تعیین ظرفیت باربری شمع پرداخته‌اند. قسمت خطی اول مماس بر منحنی در محدوده‌ی کشسان و قسمت خطی دوم مماس بر قسمتی است که تغییر مکان‌های بالا دارد. در شکل ۱۲، این روش نشان داده شده است. هسنن برای تعیین ظرفیت باربری، نموداری بر حسب تقسیم تغییر مکان بر نیرو و تغییر مکان ترسیم کرده است، که مطابق شکل ۱۳ است. مقدار بار نهایی با استفاده از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

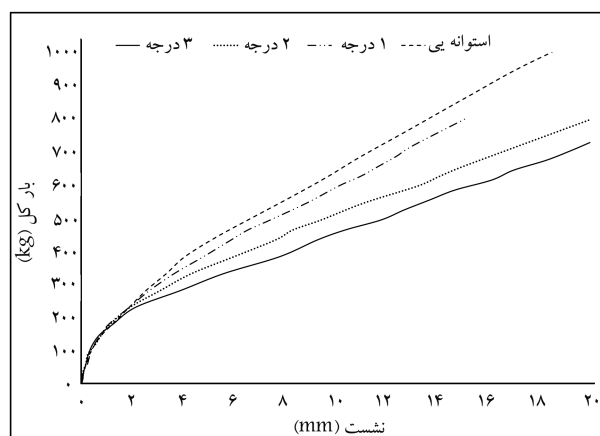
$$Q_u = \frac{1}{2\sqrt{C_1 \cdot C_2}}, \quad \delta_u = \frac{C_1}{C_2} \quad (3)$$

که در آن، C_1 و C_2 به ترتیب شیب و عرض از مبدأ خط و δ_u نشست متناظر با بار نهایی است. [۹] ظرفیت باربری حاصل از روش‌های بالا برای شمع‌های مورد آزمایش در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

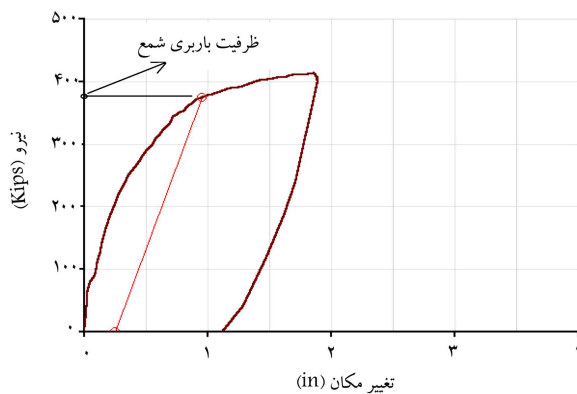
با به دست آمدن ظرفیت باربری و نشست متناظر با آن در شمع‌ها و نیز با توجه به داشتن نمودارهای نیرو - نشست مربوط به نوک و جداره‌ی شمع اکنون می‌توان سهم بار نوک و جداره را در ظرفیت باربری نهایی تعیین کرد، که در جدول‌های ۶ و ۷ مقادیر مربوطه ارائه شده است.



شکل ۹. نمودار نیرو - نشست در ماسه شکسته.



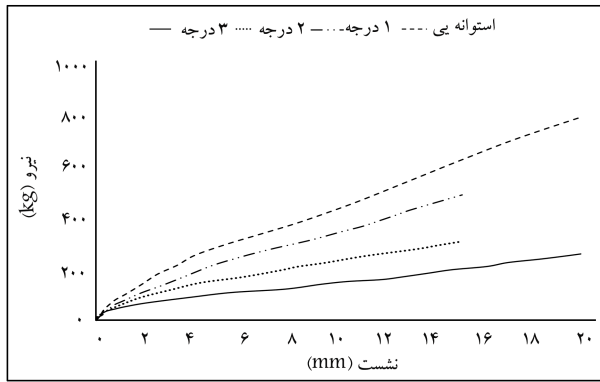
شکل ۱۰. نمودار نیرو - نشست در ماسه بادی.



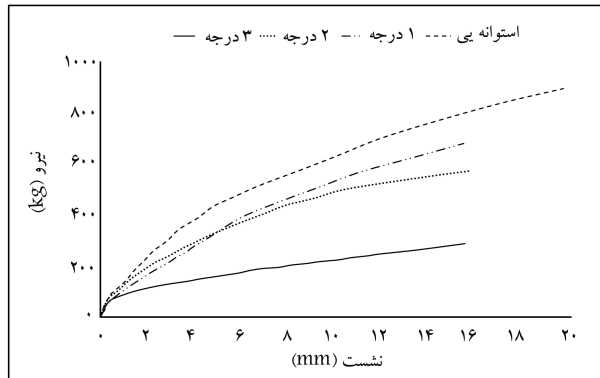
شکل ۱۱. نمودار تعیین ظرفیت باربری. [۹]

روش‌ها عبارت‌اند از: روش حدی دیویسون^۲، روش مازورکیویکز^۳، روش نوردلند - باتر و هولی^۴، روش بار نهایی هسنن^۵، روش برون‌یابی چن - کوندنر^۶، روش بار تسلیم دی بییر^۷، روش بیشینه‌ی انحاء شن و نیو^۸ [۱۰]. در این نوشتار از برخی روش‌ها نام برده استفاده شده است. با داشتن نمودار نیرو - نشست و با توجه به روش‌های ارائه شده جهت تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها به بررسی نمودارهای حاصل پرداخته شده است.

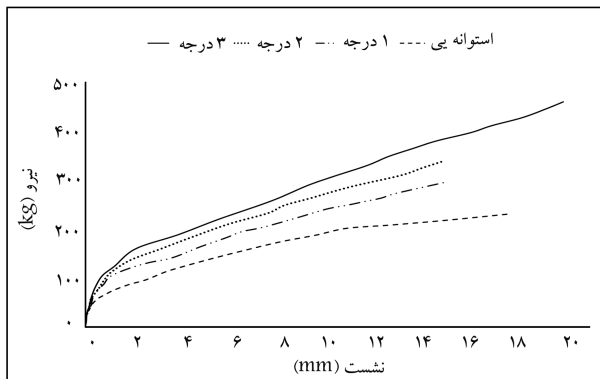
دیویسون ظرفیت باربری شمع را با استفاده از روش نشان داده شده در شکل ۱۱ به دست آورده است.



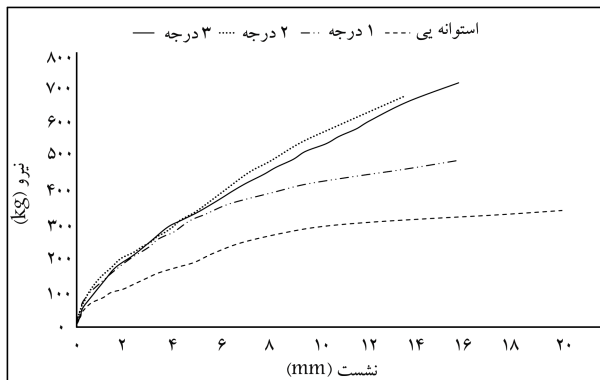
شکل ۱۴. نمودار بار نوک - نشست شمع‌ها در ماسه شکسته.



شکل ۱۵. نمودار بار جداره - نشست شمع‌ها در ماسه شکسته.



شکل ۱۶. نمودار بار نوک - نشست شمع‌ها در ماسه بادی.



شکل ۱۷. نمودار بار جداره - نشست شمع‌ها در ماسه بادی.

جدول ۴. ظرفیت باربری شمع‌ها در ماسه شکسته (کیلوگرم).

نوع شمع	نوردلند	هنسن	دیویسون	میانگین	نشست (mm)
درجه ۳	۴۰۰	۴۴۳	۵۰۹	۴۵۱	۳٫۹۳
درجه ۲	۹۱۷	۷۷۴	۸۳۸	۸۴۳	۵٫۸۵
درجه ۱	۷۸۳	۷۳۴	۷۷۴	۷۶۳	۶٫۴۱
استوانه‌یی	۷۵۹	۷۱۸	۷۴۱	۷۳۹	۶٫۵۳

جدول ۵. ظرفیت باربری شمع‌ها در ماسه بادی (کیلوگرم).

نوع شمع	نوردلند	هنسن	دیویسون	میانگین	نشست (mm)
درجه ۳	۲۰۹	۲۷۱	۳۱۱	۲۶۳	۳٫۲
درجه ۲	۲۴۲	۳۳۶	۳۶۸	۳۱۶	۳٫۹
درجه ۱	۲۶۰	۳۸۳	۴۲۱	۳۵۵	۴٫۲
استوانه‌یی	۳۰۳	۴۲۹	۴۸۱	۴۰۴	۴٫۶

جدول ۶. ظرفیت باربری نوک و جداره (کیلوگرم) شمع‌ها در ماسه شکسته.

نیرو کیلوگرم	درجه ۳	درجه ۲	درجه ۱	استوانه‌یی
ظرفیت باربری نوک	۱۴۹	۳۶۲	۴۰۴	۵۰۳
ظرفیت باربری جداره	۳۰۲	۴۸۱	۳۵۹	۲۳۶
بار نوک به بار جداره	۰٫۴۹۳	۰٫۷۵۲	۱٫۱۲۵	۲٫۱۳۱

جدول ۷. ظرفیت باربری نوک و جداره (کیلوگرم) در ماسه بادی.

نیرو کیلوگرم	درجه ۳	درجه ۲	درجه ۱	استوانه‌یی
ظرفیت باربری نوک	۸۸	۱۴۸	۲۰۸	۳۰۳
ظرفیت باربری جداره	۱۷۵	۱۶۸	۱۴۷	۱۰۱
بار نوک به بار جداره	۰٫۵۰۳	۰٫۸۸۱	۱٫۴۱۵	۳

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، نمودار مربوط به بارهای نوک و جداره‌ی متناظر با نشست در ماسه شکسته مشاهده شده است.

در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، نمودار مربوط به بارهای نوک و جداره‌ی متناظر با نشست در ماسه بادی نشان داده شده است.

با توجه به نمودارهای ارائه شده و با توجه به داشتن نشست متناظر با نهایی کل، ظرفیت باربری نوک و جداره از روی نمودارها قابل تعیین است.

۵. تفسیر نتایج آزمایش‌ها

با توجه به اینکه روابط تئوریک مختلفی برای تعیین ظرفیت باربری نوک شمع ارائه شده است،^[۱۱] در این قسمت نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با تعدادی از این روابط مورد مقایسه قرار گرفته است. در جدول‌های ۸ و ۹ به مقایسه‌ی ظرفیت باربری به دست آمده از روابط پژوهشگران مختلف و ظرفیت باربری حاصل از این آزمایش پرداخته شده است.

جدول ۸. ظرفیت باربری (کیلوگرم) نوک شمعیها در ماسه شکسته.

روش	درجه ۱	درجه ۲	درجه ۳	استوانه‌یی
ترزاقی	۶۹۲	۴۸۱	۳۰۷	۱۲۳۰
وسیک	۵۹۷	۴۱۵	۲۶۵	۱۰۶۲
هنسن	۱۳۱۵	۹۱۳	۵۸۴	۲۳۳۸
باولز	۱۳۸۴	۹۶۱	۶۱۵	۲۴۶۱
اسکمپتن	۱۷۳۰	۱۲۰۲	۷۶۹	۳۰۷۷
میانگین	۱۱۴۴	۷۹۵	۵۰۸	۲۰۳۴
آزمایشگاه	۴۰۴	۳۶۲	۱۴۹	۵۰۳

جدول ۹. ظرفیت باربری نوک شمعیها در ماسه بادی.

روش	درجه ۱	درجه ۲	درجه ۳	استوانه‌یی
ترزاقی	۱۵۸	۱۱۰	۷۱	۲۸۱
وسیک	۱۵۶	۱۰۸	۷۰	۲۷۷
هنسن	۲۹۴	۲۰۵	۱۳۱	۵۲۳
باولز	۱۲۹	۹۰	۵۸	۲۲۹
اسکمپتن	۳۳۱	۲۳۰	۱۴۷	۵۸۸
میانگین	۲۱۴	۱۴۹	۹۵	۳۷۹
آزمایشگاه	۲۰۸	۱۴۸	۸۸	۳۰۳

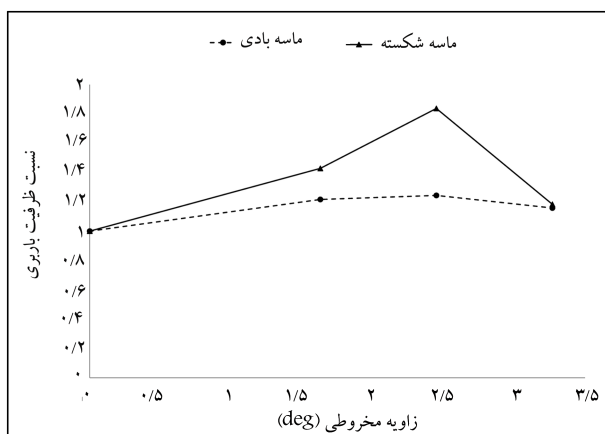
جدول ۱۰. تبدیل ظرفیت باربری نوک شمعی (کیلوگرم) در روابط تئوریک به ظرفیت باربری نوک شمعی در آزمایشگاه (در ماسه شکسته).

ظرفیت باربری	درجه ۱	درجه ۲	درجه ۳	استوانه‌یی
روابط تئوریک	۱۱۴۴	۷۹۵	۵۰۸	۲۰۳۴
نتایج آزمایشگاه	۴۰۴	۳۶۲	۱۴۹	۵۰۳
تبدیل شده	۲۸۳	۱۹۷	۱۲	۵۰۳

جدول ۱۱. مقایسه‌ی ظرفیت باربری نوک شمعی (کیلوگرم) در روابط تئوریک به ظرفیت باربری نوک شمعی در آزمایشگاه (در ماسه بادی).

ظرفیت باربری	درجه ۱	درجه ۲	درجه ۳	استوانه‌یی
روابط تئوریک	۲۱۴	۱۴۹	۹۵	۳۷۹
نتایج آزمایشگاه	۲۰۸	۱۴۸	۸۸	۳۰۳
تبدیل شده	۱۷۱	۱۱۹	۷۶	۳۰۳

با توجه به اینکه روابط تئوریک ظرفیت باربری نوک شمعی برای شمعیهای استوانه‌یی طرح شده است، لذا ظرفیت باربری شمعی استوانه‌یی به‌عنوان حالت مرجع در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور بررسی اثر مخروط‌شدگی در ظرفیت باربری نوک شمعیها، ظرفیت باربری حاصل از روابط تئوریک برای شمعی استوانه‌یی بر ظرفیت باربری متناظر آن در حالت آزمایشگاهی تقسیم شده است. سپس عدد به‌دست‌آمده بر ظرفیت باربری حاصل از روابط سایر حالت‌ها تقسیم شده است تا میزان اختلاف آن‌ها به‌دست آید. در جدول ۹ عملیات مذکور نشان داده شده است. با توجه به جدول‌های ۱۰ و ۱۱ و با تقسیم حالت تبدیل شده به نتایج آزمایشگاه می‌توان به تأثیر زاویه‌ی مخروطی در ظرفیت باربری نوک شمعی پی برد. در جدول ۱۱ نتایج ارائه شده است. در شکل ۱۸، جدول ۱۲ ترسیم شده است تا میزان تأثیر زاویه‌ی مخروطی در ظرفیت باربری نوک شمعی از روی نمودار مشخص شود.



شکل ۱۸. تأثیر زاویه‌ی مخروطی بار ظرفیت باربری نوک شمعیهای مورد آزمایش.

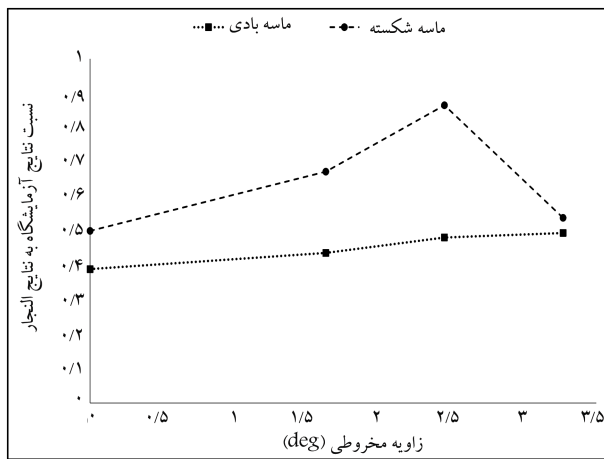
جدول ۱۲. تأثیر زاویه‌ی مخروطی در ظرفیت باربری نوک شمعیها.

نوع ماسه	درجه ۱	درجه ۲	درجه ۳	استوانه‌یی
بادی	۱/۲۱۶	۱/۲۴۴	۱/۱۵۸	۱
شکسته	۱/۴۲۸	۱/۸۳۷	۱/۱۸۳	۱

با توجه به شکل ۱۸، شمعی ۲ درجه ظرفیت بیشتری را نسبت به نمونه‌ی خود در حالت استوانه‌یی به دست آورده است. و این روند افزایشی ظرفیت باربری به گونه‌یی است که با افزایش زاویه‌ی مخروطی حالت صعودی به خود می‌گیرد تا وقتی که به شمعی ۲ درجه (۲/۴۵ درجه) برسد، و بعد از آن روند نزولی پیدا می‌کند. علت اینکه با افزایش زاویه‌ی مخروطی ظرفیت باربری شمعی نسبت به حالت استوانه‌یی مینا افزایش پیدا کرده است، این است که در این شمعی اصطکاک جداره به سرعت شمعی استوانه‌یی به میزان نهایی خود نمی‌رسد و نسبت بیشتری از بار کل را اصطکاک جداره دریافت می‌کند، که این امر باعث شده است هم شمعی نشست کمتری داشته باشد و هم با افزایش زاویه‌ی مخروطی، ظرفیت باربری بیشتری نسبت به نوع استوانه‌یی خود نشان دهد. در شکل ۱۸، نمودار بعد از شمعی ۲ درجه دچار افت شده است. این حالت را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که به دلیل زیاد بودن زاویه‌ی مخروطی، حتی با وجود استفاده از ماسه شکسته با زاویه‌ی اصطکاک بالا نسبت به ماسه بادی باز هم مخروط‌شدگی نتوانسته است روند صعودی نمودار قبل را طی کند. می‌توان این رفتار را این‌گونه توجیه کرد که با افزایش زاویه‌ی مخروطی، سطح مقطع شمعی در نوک آن نسبت به سطح مقطع متوسط شمعی بسیار کوچک شده است و ماسه قرارگرفته در زیر نوک شمعی طوری رفتار می‌کند که رفتار شمعی همانند رفتار شمعی با زاویه‌ی مخروطی ۳/۲۷ درجه است، ولی به شکل مخروط کامل شده است.^[۱] این رفتار در شکل ۱۹ ملاحظه می‌شود.

بنابراین با توجه به اینکه نحوه‌ی فرورفتن مخروط کامل در خاک همانند فرورفتن گوه در خاک است، در نتیجه فرورفتن شمعی به شکل مخروط کامل در خاک حتی در ماسه‌ی درشت‌دانه، نسبت به شکل استوانه‌یی راحت‌تر است و بنابراین میزان نشست آن نیز بیشتر و به تبع آن ظرفیت باربری آن کمتر می‌شود.^[۵]

ولی علاوه بر اینکه شمعی ۳ درجه این چنین حالتی را از خود نشان می‌دهد، باز هم در نمودار قبلی مقدار بیشتری از شمعی استوانه‌یی مشابه خود دریافت می‌کند، که می‌توان این حالت را نیز همانند رفتار شمعی ۱ و ۲ درجه تفسیر کرد، با این تفاوت که در اینجا اثر گوه‌یی شدن تأثیر منفی در ظرفیت باربری نوک شمعی می‌گذارد. در این بخش ظرفیت باربری جداره، که براساس نشست متناظر با آن به‌دست



شکل ۲۰. مقایسه‌ی نسبت ظرفیت باربری جداره در دو نوع خاک مورد آزمایش.

در شکل ۲۰ ظرفیت باربری حالت آزمایشگاهی تقسیم بر مقدار متناظر آن در رابطه‌ی النجار در زاویه‌ی مخروطی‌های مختلف نشان داده شده است. این موارد با بررسی نمودار حاصل از باربری جداره در دو نوع خاک نتیجه شده است:

-- با افزایش زاویه‌ی مخروطی در ماسه بادی ظرفیت باربری جداره نیز افزایش می‌یابد، ولی در ماسه شکسته این حالت افزایشی تا شمع ۲ درجه ادامه پیدا می‌کند و بعد از آن شروع به کاهش می‌کند.

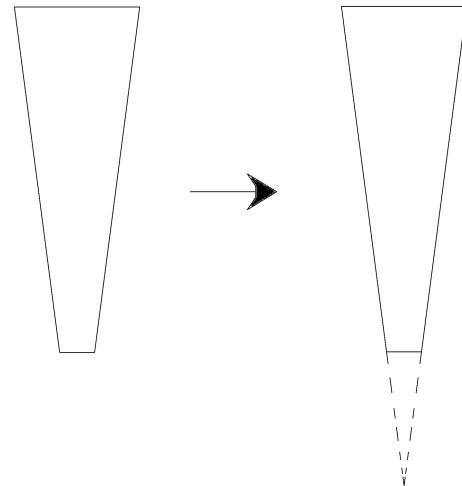
-- با بررسی دقیق نمودار می‌توان به این نکته دست یافت که در هر دو خاک شیب افزایش ظرفیت باربری تا شمع ۲ درجه روند افزایش دارد، ولی بعد از آن این شیب روند کاهشی به خود می‌گیرد، که این روند در ماسه بادی کمتر و در ماسه شکسته با شدت بیشتری صورت پذیرفته است.

-- علت کاهش شیب نمودار بعد از شمع ۲ درجه را می‌توان به دلیل اثر گوی‌بی بودن شمع ۳ درجه دانست.

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های صورت‌گرفته در این نوشتار و نمودارهای حاصل شده از نتایج حاصل از آزمایش می‌توان به این نتایج دست یافت:

- ظرفیت باربری شمع‌های مخروطی قرارگرفته در ماسه بادی با زاویه‌ی اصطکاک ۳۴ درجه کمتر از ظرفیت باربری نوع استوانه‌یی خود است که حجم مدفون یکسان دارد، و این کاهش ظرفیت باربری با افزایش زاویه‌ی مخروطی مشهود است.
- ظرفیت باربری شمع‌های مخروطی قرارگرفته در ماسه شکسته با زاویه‌ی اصطکاک ۴۵ درجه در زاویه‌های مخروطی ۱/۶۳ و ۲/۴۵ درجه بیشتر از نوع استوانه‌یی با حجم مدفون یکسان است و در شمع ۳/۲۷ درجه ظرفیت باربری شمع از نوع استوانه‌یی یادشده کمتر است.
- شمع ۳/۲۷ درجه به دلیل داشتن مساحت کوچک نوک در مقایسه با انواع دیگر شمع‌های موجود در آزمایش موجب شده است که حالتی همچون مخروط کامل داشته باشد، در نتیجه همانند گوه در خاک فرو می‌رود، به همین دلیل نشست



شکل ۱۹. نمایش رفتار شمع با زاویه‌ی مخروطی ۳/۲۷ در ماسه.

جدول ۱۳. ظرفیت باربری جداره‌ی (کیلوگرم) شمع‌ها در ماسه شکسته.

روش	درجه ۱	درجه ۲	درجه ۳	استوانه‌یی
النجار	۵۳۴	۵۵۶	۵۶۱	۴۷۲
آزمایشگاه	۳۵۹	۴۸۱	۳۰۲	۲۳۶
نسبت	۰/۶۷۲	۰/۸۶۵	۰/۵۳۸	۰/۵۰۰

جدول ۱۴. ظرفیت باربری جداره‌ی (کیلوگرم) شمع‌ها در ماسه بادی.

روش	درجه ۱	درجه ۲	درجه ۳	استوانه‌یی
النجار	۳۳۷	۳۴۹	۳۵۴	۲۶۰
آزمایشگاه	۱۴۷	۱۶۸	۱۷۵	۱۰۱
نسبت	۰/۴۳۶	۰/۴۸۱	۰/۴۹۴	۰/۳۸۹

آمده است، با ظرفیت باربری جداره‌ی حاصل از فرمول ارائه‌شده توسط النجار، که برای شمع‌ها در محیط آزمایشگاهی مطرح شده است، مقایسه شده است.^[۴]

$$Q_s = \int_0^L K_t K_s \sigma_v \tan(\delta) p dz$$

$$K_t = \frac{\tan(\theta + \delta) \cdot \cot(\delta)}{1 + (2\xi \cdot \tan(\theta) \cdot \tan(\theta + \delta))} + \frac{4G \cdot \tan(\theta + \delta) \cdot \tan(\theta) \cdot \cot(\delta) \cdot S_r}{[\lambda + (2\xi \cdot \tan(\theta) \cdot \tan(\theta + \delta))] k_s \cdot \sigma_v} \quad (4)$$

که در آن، Q_s ظرفیت باربری جداره، K_t ضریبی برای اثر دادن زاویه‌ی مخروطی است که در شمع استوانه‌یی برابر ۱ است، K_s ضریب فشار جانبی خاک است که در جابجایی‌های بالا مساوی ۱ در نظر گرفته شده است، σ_v تنش قائم مؤثر در عمق موردنظر، θ زاویه‌ی مخروط‌شدگی، δ زاویه‌ی اصطکاک شمع و خاک، G مدول برشی خاک، S_r نشست شمع تحت بار نهایی (نشست در حدود ۰/۱ قطر نوک شمع)، ξ ضریبی برابر با $\ln(r_1/r_m)$ است که در آن، r_1 قطری است که در آن تنش برشی مقداری ناچیز و معادل با $2.5L(1-\nu)$ است، که در آن، L طول شمع و ν ضریب پواسون و نیز r_m قطر میانگین شمع است.

در جدول‌های ۱۳ و ۱۴ به مقایسه‌ی ظرفیت باربری جداره در ماسه بادی بین نتایج آزمایشگاه و نتایج النجار پرداخته شده است.

- ظرفیت باربری نوک شمع‌های مخروطی در مقایسه با شمع‌های استوانه‌یی با قطر نوک یکسان افزایش می‌یابد و این افزایش در ماسه‌بادی با شیبی افزایشی (تقریباً مثبت) ادامه پیدا می‌کند و بعد از آن تقریباً منحنی منفی و شیب آن کم شده است، شیب این نمودار تابع زاویه اصطکاک داخلی خاک است، به طوری که هر چه زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش یابد، تقریباً نیز چه در حالت مثبت و چه در حالت منفی افزایش می‌یابد.
- ظرفیت باربری جداره با افزایش زاویه مخروطی افزایش می‌یابد و این افزایش به شدت تابع زاویه اصطکاک داخلی خاک است، ظرفیت باربری جداره نیز همانند ظرفیت باربری نوک شمع با افزایش زاویه مخروطی تا ۲/۴۵ درجه حالت افزایشی دارد و بعد از آن شیب نمودار دچار کاستی می‌شود (تقریباً منفی) و این تغییر شیب تابع زاویه اصطکاک داخلی خاک است، که هر چه زاویه اصطکاک داخلی خاک بیشتر باشد، شیب منحنی چه در تقریباً مثبت و چه در تقریباً منفی افزایش می‌یابد.
- بیشتر نسبت به سایر شمع‌ها دارد و به تبع آن ظرفیت باربری کمتری از خود نشان می‌دهد.
- ظرفیت باربری نوک شمع‌های مخروطی در ماسه‌ها در مقایسه با نوع استوانه‌یی خود که حجم یکسان و میانگین قطر یکسان دارد، کمتر است و این کاهش با افزایش زاویه مخروطی رابطه‌ی مستقیم دارد، یعنی با افزایش زاویه مخروطی ظرفیت باربری نوک شمع کمتر شده است.
- شمع‌های با مساحت نوک یکسان و زاویه‌های مخروطی مختلف، همواره ظرفیت باربری بالاتری نسبت به نمونه‌ی استوانه‌یی خود دارند، اما اگر حجم مدفون یکسان باشد و قطر نوک شمع مخروطی کوچک‌تر از نمونه‌ی استوانه‌یی باشد، در زاویه اصطکاک داخلی ۳۳/۴ درجه ظرفیت باربری با افزایش زاویه مخروطی کمتر شده است، ولی در زاویه اصطکاک ۴۵/۶ درجه ظرفیت باربری تا زاویه مخروطی ۲/۴۵ درجه افزایش یافته و بعد از آن روند کاهشی به خود گرفته است.

پانوشتها

1. loadcell
2. Divission offset limit
3. Mazurkiewics
4. Nordland- Butler & Hoy
5. Hansen ultimate load
6. Chin- Kondner
7. De Beer
8. Shen & Niu Maximum curvature

منابع (References)

1. Nourland, R.L. "Bearing capacity of piles cohesionless soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, **89**(3), pp. 1-36 (1963).
2. Rybnikov, A.M. "Experimental investigation of bearing capacity of bored- cast- in placed tapered piles", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **27**(2), pp.48-52 (1990).
3. Kodikara, J. and Moore, I. "Axial response of tapered piles in cohesive frictional ground", *J. Geotech. Engrg.*, **119**(4), pp. 675-693 (1993).
4. Hesham, M., El Naggar, M.S. "Evaluation of axial performance of tapered piles from centrifuge tests", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(6), pp. 1295-1308 (2000).
5. Ghasemi, M. "Experimental investigation of bearing capacity of nonprismatic piles in sand", Thesis of MSc. Civil Engineering, Soil & Foundation Mechanic, Yazd University (2006).
6. Manandhar, S. and Yasufuku, N. "End bearing capacity of tapered piles in sands using cavity expansion theory", *End Bearing Capacity of Tapered Piles in Sands Using Cavity Expansion Theory*, No. 4, pp.77-99 (2011).
7. Manandhar, S. and Yasufuku, N. "Evaluation of skin friction of tapered piles in sands based on cavity expansion theory", *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, **71**(4), pp.101-126 (2011).
8. Putri, E.E., Kameswara Rao, N.S.V. and Mannan, M.A. "Evaluation of modulus of elasticity and modulus of subgrade reaction of soils using CBR test", *Journal of Civil Engineering Research*, **2**(1), pp. 34-40 (2012).
9. Institute of Transportation, *Bearing Capacity of Piles*, Department of Transportation Research Center (2005).
10. Fellenius, B.H., *Basics of Foundation Design*, Electronic Edition, pp. 199-208 (www. Fellenius.net, 346 p.) (2006).
11. Atiabi, A., *Principles of Foundation Engineering*, Jouybar Publication (2008).