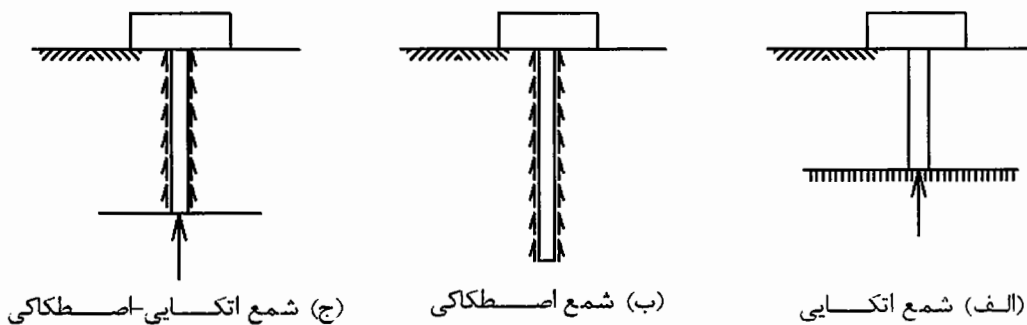


فصل دهم

طرح پی‌های عمیق
(شمع‌ها)

مقدمه:

شمع‌ها اعضای سازه‌ای از جنس چوب، بتن، فولاد یا ترکیبی از آنها هستند که اساساً جهت انتقال بارها از سطح زمین به لایه‌های عمیق خاک بکار می‌روند.



(ج) شمع اتکایی-اصطکاکی

(ب) شمع اصطکاکی

(الف) شمع اتکایی

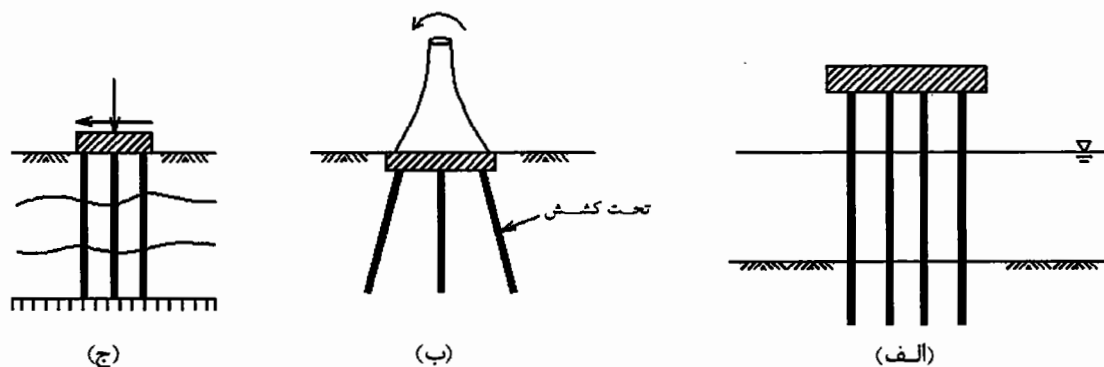
شکل (۱۰-۱): مکانیزم‌های انتقال بار در شمع‌ها

انتقال بار به خاک یا از طریق اعمال مستقیم بار از نوک شمع به لایه باربر در عمق زمین صورت می‌گیرد که در این صورت شمع را ته باربر (End Bearing) یا اتکایی می‌نامند (شکل (۱۰-الف)) و یا از طریق تنش‌های اصطکاکی در جداره یا پوسته‌ی جانبی شمع انجام می‌شود که در این صورت شمع را اصطکاکی (Friction Bearing) می‌گویند (شکل (۱۰-ب)). در عمل اگر شمع در عمق نسبتاً کمی به لایه‌ی سخت یا باربری برسد چون تغییر مکان شمع در خاک ناچیز است لذا تنش‌های برشی (اصطکاکی) قابل توجهی در جداره شمع ایجاد نمی‌شود و می‌توان از اصطکاک جانبی صرف‌نظر نمود و شمع را اتکایی در نظر گرفت. اگر عمق لایه‌ی سخت خیلی زیاد باشد به

طوری که اصولاً متکی کردن شمع به لایه باربر ممکن و یا اقتصادی نباشد در آن صورت انتقال بار از طریق ته شمع ناچیز بوده و شمع با کمی فرورفتن در خاک و ایجاد تنش‌های اصطکاکی بار وارده را تحمل می‌نماید. شمع در این حالت اصطکاکی عمل می‌نماید. در شمع‌های نسبتاً بلند که انتهای آنها بر روی لایه سختی متکی می‌شود هر دو سازوکار فوق در باربری شمع مؤثر هستند (شکل (۱۰-۱-ج)).

موارد کاربرد شمع‌ها:

- شمع‌ها کاربردهای زیادی دارند که مهمترین آنها را می‌توان به صورت زیر نام برد:
۱. انتقال بار روسازه به لایه‌های تحتانی خاک (بار می‌تواند قائم یا افقی و یا مورب باشد).
 ۲. تحمل بارهای کششی یا واژگونی که به پی سطحی وارد می‌شود.
 ۳. برای کاهش نشست پی هنگامی که پی‌های سطحی روی لایه‌های خاک نرم قرار دارند.
 ۴. قرار گرفتن در زیر پی یا کوله‌ی پل‌ها خصوصاً زمانی که خطر آب‌شستگی خاک‌های اطراف پی توسط جریان آب وجود دارد.
 ۵. در سازه‌های دریایی مثل اسکله‌ها و سکوه‌های دور از ساحل جهت انتقال بار از بالای سطح آب به خاک بستر دریا.
 ۶. برای ایجاد ارتعاش و متراکم کردن خاک‌های دانه‌ای در بهسازی زمین. این نوع شمع‌ها را در پایان کار از زمین بیرون می‌کشند.



شکل (۱۰-۲): برخی از انواع کاربرد پی عمیق (شمع‌ها)

الف) کاربرد شمع در سازه‌های دریایی

ب) کاربرد شمع به عنوان عضو تحت کشش

ج) کاربرد شمع در انتقال بار به لایه‌های تحت‌الارضی

انواع شمع‌ها از نظر روش ساخت:

شمع‌ها به طور کلی به دو روش ساخته می‌شوند:

۱. کوبشی: در این روش شمع‌های آماده شده چوبی، فلزی یا بتن‌آرمه با چکش‌های مخصوص (شمع‌کوب) با ضربات متوالی که بر سر شمع وارد می‌شود در خاک کوبیده می‌شوند. برای جلوگیری از خردشدن سر شمع در اثر ضربات شمع‌کوب کلاهک‌های فلزی در سر شمع تعبیه می‌نمایند. سر و صدا و ارتعاش در شمع‌کوبی زیاد است لذا برای محیط‌های شهری مناسب نیست. گاهی برای حل این مشکل از شمع‌کوب‌های لرزشی استفاده می‌کنند که سر و صدای آن کمتر از شمع‌کوب‌های معمولی است. شمع‌کوب‌های لرزشی در خاک‌های دانه‌ای کاربرد خوبی دارند.

۲. درجا ریز (Cast in Place/Cast in situ): در این روش ابتدا در محل موردنظر جهت ساخت

شمع، چاهی با قطر و عمق موردنظر کنده شده و سپس داخل آن با بتن یا بتن مسلح پر می‌شود. این روش ساخت شمع بسیار معمول است چون نیازی به شمعکوب ندارد.

اگر زمین ریزشی باشد ابتدا یک لوله‌ی فلزی با قطری معادل قطر شمع موردنظر در زمین کوبیده شده و سپس داخل آن در محل با بتن (مسلح یا غیرمسلح) پر می‌شود. هم‌زمان با ریختن بتن، لوله به تدریج از خاک بیرون کشیده می‌شود. از این روش جهت ساخت شمع در زمین‌های ماسه‌ای استفاده می‌شود.

پی‌های عمیق عموماً نسبت به پی‌های سطحی گران‌تر تمام می‌شوند، لذا انتخاب این سیستم پی باید با شناخت کافی نسبت به پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های خاک و مقایسه‌ی فنی و اقتصادی سیستم‌های مختلف پی همراه باشد.

لازم به ذکر است که شمع هیچگاه به تنهایی بکار نمی‌رود. آیین نامه‌ها حداقل تعداد شمع را در یک گروه شمع ۲ و یا ۳ شمع عنوان کرده‌اند.

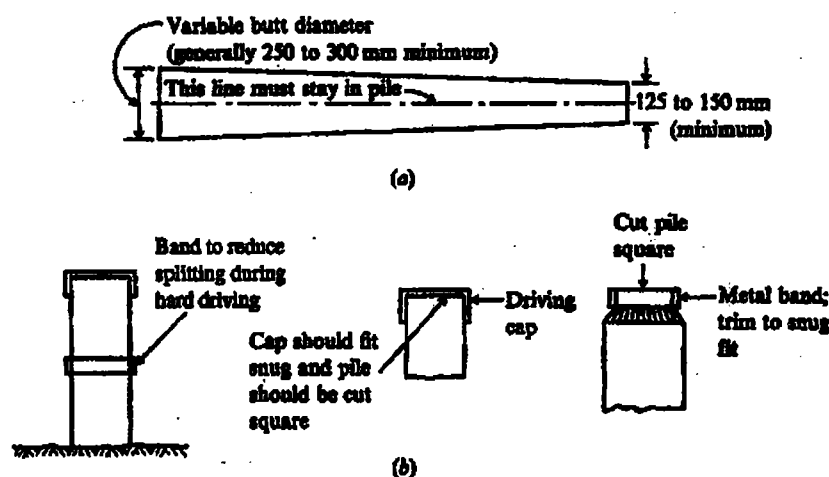
جدول (۱۰-۱): جدول مقایسه شمع‌ها

نوع شمع	بازرسی	کشور سازنده	بازرسی	کشور سازنده	نوع شمع
شمع فولاد (HPI)	۲۵	نامحدود	۳۰ (پیش‌تنیده=۶۰)	۳۶	نامحدود
شمع فولاد (HPI)	۹-۲۰	۱۲-۵۰	۱۲-۱۵ (۱۸-۳۰)	۸-۱۲	۱۲-۳۶
شمع فولاد (HPI)	۳۰۰-۵۰۰	-	۳۰۰-۶۰۰	۳۰۰-۵۰۰	۲۰۰-۹۰۰
آیین نامه مصالح	ASTM-D25	ASTM-A36	ACI	ACI	ACI
حداکثر بار (kN)	۲۷۰	سطح مقطع×تنش مجاز	۹۰۰ (۸۵۰۰)	۱۳۰۰	۱۸۰۰
بار مجاز (kN)	۱۳۰-۲۲۵	۳۵۰-۱۰۵۰	۳۵۰ (۳۵۰۰)	۳۵۰-۹۰۰	۷۰۰-۱۱۰۰
مزایا	✓ وصله مشکل ✓ آسیب‌پذیر در زمین‌های سفت ✓ آسیب‌پذیر در برابر شرایط محیطی	✓ آسیب‌پذیر در مقابل خوردگی ✓ آسیب‌پذیر در برخورد با سنگ	✓ حمل و نقل مشکل ✓ وصله مشکل ✓ دست‌خوردگی زیاد خاک	✓ کیفیت بتن چندان خوب نیست	✓ گران ✓ دست‌خوردگی خاک با لوله ته بسته
معایب	✓ نسبتاً ارزان ✓ بادوام در زیر سطح آب ✓ مناسب در خاک‌های دانه‌ای	✓ سهولت در وصله کردن ✓ ظرفیت زیاد ✓ دست‌خوردگی کم	✓ مقاوم در برابر عوامل خورنده ✓ قابل کوبیدن در زمین‌های سخت	✓ نسبتاً ارزان ✓ مناسب در هر دو حالت انکابی و اصطکاکی	✓ سهولت وصله کردن ✓ ظرفیت زیاد ✓ قابل کنترل در حین نصب

انواع شمع‌ها به لحاظ نوع مصالح:

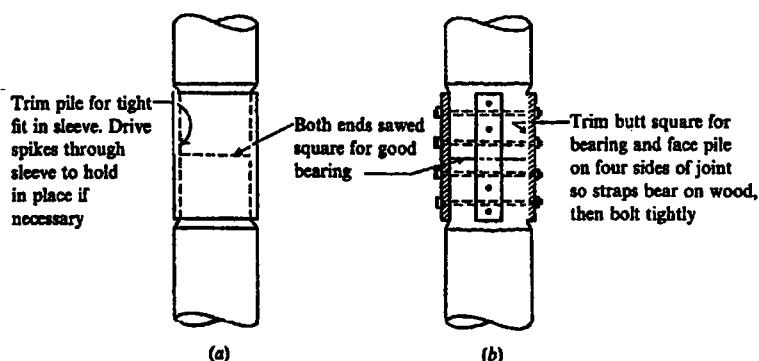
۱. شمع‌های چوبی:

این شمع‌ها معمولاً از تنه‌ی درختان صاف که شاخه‌های آنها به دقت هرس شده ساخته می‌شوند. شمع‌های چوبی معمولاً از سر باریک‌تر در داخل زمین کوبیده می‌شوند. برای جلوگیری از خرابی نوک شمع در برخورد با قلوه سنگ یا زمین سخت یک کفشک فلزی در نوک شمع قرار می‌دهند.



شکل (۱۰-۳): شکل شماتیکی از یک شمع چوبی

مشخصات لازم برای شمع‌های چوبی در ASTM D25 آمده است. اگر شمع چوبی به طور دائم زیر سطح سفره آب قرار گیرد عمر آن زیاد است ولی اگر همین شمع در معرض خیس شدن و خشک شدن پیاپی قرار گیرد عمر آن شدیداً کاهش خواهد یافت. قسمتی از شمع‌های چوبی که در خارج از خاک قرار می‌گیرند در معرض فساد و پوسیدگی ناشی از حمله‌ی حشرات چوب‌خوار (borers) مانند موربانه می‌باشند. برای جلوگیری از کاهش عمر شمع‌های چوبی آنها را به طرق صنعتی عمل‌آوری می‌کنند. شمع‌های چوبی را در روغن‌های خاص قرار داده و حرارت می‌دهند و جدار شمع‌ها را با مشتقات نفتی نفوذ ناپذیر می‌کنند. لازم به ذکر است در صورتی که زمین سفت یا قلوه‌سنگی باشد امکان شکستن شمع‌های چوبی در حین شمع‌کوبی وجود دارد. بهتر است شمع‌های چوبی یک‌پارچه باشند و باید از وصله کردن آنها حتی‌المقدور خودداری نمود ولی در صورت لزوم می‌توان آنها را مطابق شکل (۱۰-۴) وصله کرد.

شکل (۱۰-۴): نحوه‌ی وصله کردن شمع‌های چوبی
(a) وصله با ورق فلزی، (b) وصله با تسمه‌های فلزی

حداکثر باری که شمع چوبی به لحاظ مصالح می‌تواند تحمل نماید عبارت است از:

$$P_a = A_p \cdot f_a$$

که در این رابطه:

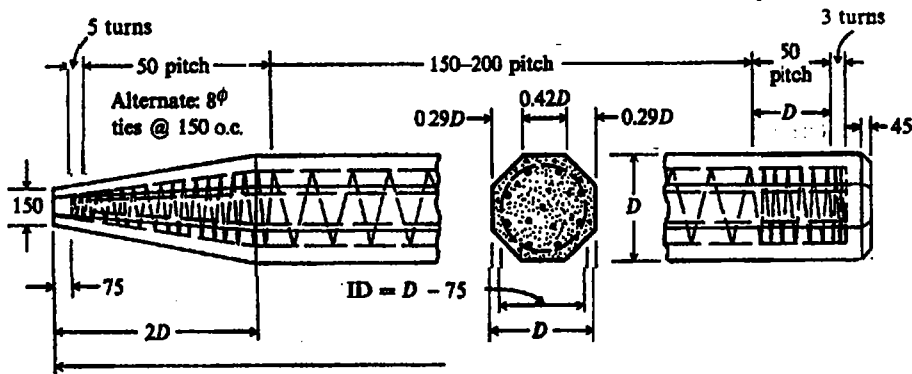
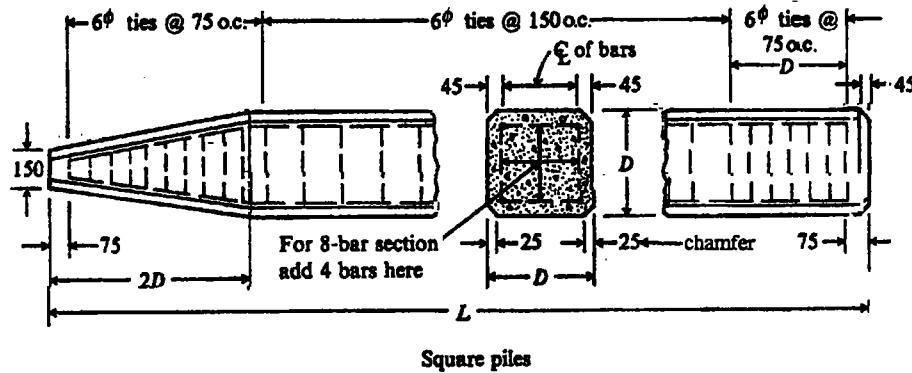
A_p : سطح مقطع شمع

f_a : تنش مجاز فشاری چوب بر طبق آئین‌نامه

می‌باشد.

۲. شمع‌های بتنی:

الف) پیش‌ساخته: این شمع‌ها ابتدا در کارگاه ساخته شده و سپس به محل شمع‌کوبی حمل می‌شوند. برای ساخت شمع به تعداد زیاد لازم است از قالب‌های فلزی استفاده شود. شمع‌ها پس از بتن‌ریزی در قالب باید به مدت کافی در استخر آب به صورت غرقاب باقی بمانند. مقطع تیپ شمع‌های بتنی در شکل (۱۰-۵) نشان داده شده است.



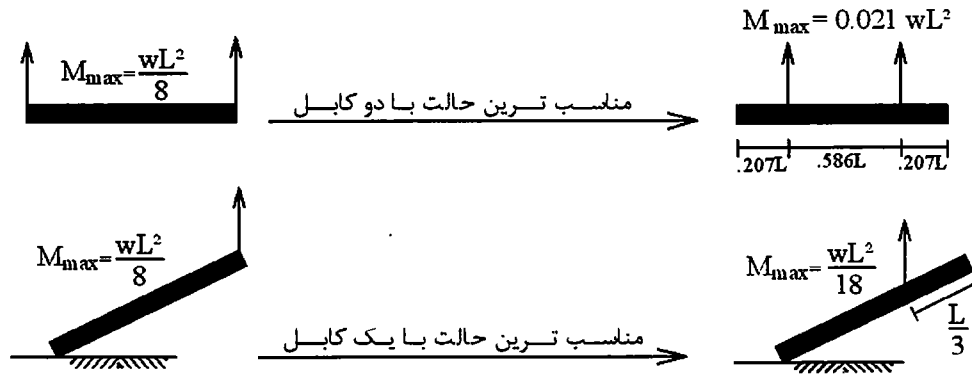
شکل (۱۰-۵): شمع‌های بتنی پیش‌ساخته

شمع‌های بتنی پیش‌ساخته را می‌توان به صورت پیش‌تنیده ساخت. گاهی شمع‌های بتنی با مقاطع مجوف (سوراخ دار در وسط) نیز به کار می‌روند.

فولادهای اصلی در شمع‌های بتنی بر اساس معیارهای زیر طراحی می‌شوند:

- حداکثر لنگر خمشی ایجاد شده در شمع در حین حمل و نقل
- حداکثر لنگر خمشی ایجاد شده در شمع در حین کوبش
- حداکثر بار محوری و لنگر خمشی ایجاد شده در اثر اعمال بارهای سازه
- حداقل فولاد توصیه شده توسط آئین‌نامه

لازم است که بیشترین درصد فولاد که بر اساس معیارهای مذکور به دست می‌آید در شمع به کار برده شود. نکته‌ی مهم در مورد شمع‌های بتنی آن است که در حالت سرویس این شمع‌ها غالباً تحت اثر نیروی محوری قرار دارند. در این حالت حداکثر لنگر خمشی در این شمع‌ها معمولاً هنگام بلند کردن و حمل و نقل شمع در آنها ایجاد می‌شود، لذا فولادهای اصلی باید با توجه به این لنگر کنترل شوند. برای کاهش لنگر حمل و نقل، محل‌هایی را در روی شمع علامت‌گذاری کرده و شمع‌ها را منحصراً از این نقاط بلند می‌کنند.



شکل (۱۰-۶): مناسب‌ترین حالت بلندکردن شمع‌های بتنی

شمع‌های بتنی باید دارای عمر زیادی باشند لذا باید اثرات زیان‌آور خاک‌های سولفاته، آب‌های زیرزمینی شور، تر و خشک شدن پی‌ایی (مثلاً در سازه‌های دریایی) و یخ‌زدن و آب‌شدن مداوم را در آنها به حداقل ممکن کاهش داد. برای این کار آئین‌نامه‌ها توصیه‌های خاصی را معمول می‌دارند برای مثال در برخی شمع‌های بتنی عیار سیمان در بتن تا ۵۰۰ کیلوگرم در مترمکعب بتن بوده و پوشش بتن روی فولاد ۷۵ میلیمتر می‌باشد. کاهش نسبت وزنی آب به سیمان، ساخت بتن با حباب هوا و استفاده از افزودنی‌های شیمیایی خاص از دیگر تمهیداتی است که برای ساخت شمع‌های بتنی به کار می‌رود.

ب) درجا: شمع‌های بتنی درجا به دو صورت کلی ساخته می‌شوند: با لوله جدار (casing) و بدون لوله جدار. در حالت اول یک لوله‌ی فلزی در خاک کوبیده شده و پس از خارج کردن خاک داخل لوله (با اوگر یا mandrel) بتن در لوله ریخته می‌شود. در حالت دوم سوراخ مستقیماً در زمین حفاری شده شبکه‌ی فولاد نصب و بتن در داخل آن قرار می‌گیرد. در خاک‌های دانه‌ای گاهی برای پایدار کردن جداره‌ی چاه حفر شده از گل حفاری یا بنتونیت استفاده می‌کنند؛ و بتن‌ریزی با استفاده از لوله‌ی Teremi از پایین به بالا انجام می‌شود.

حداکثر بار مجازی که شمع بتنی به لحاظ مصالح می‌تواند تحمل نماید از فرمول زیر بدست می‌آید.

$$P_a = A_c \cdot f_c + A_s \cdot f_s$$

که در این رابطه:

A_c : سطح مقطع بتن در مقطع شمع

A_s : سطح مقطع فولاد در مقطع شمع

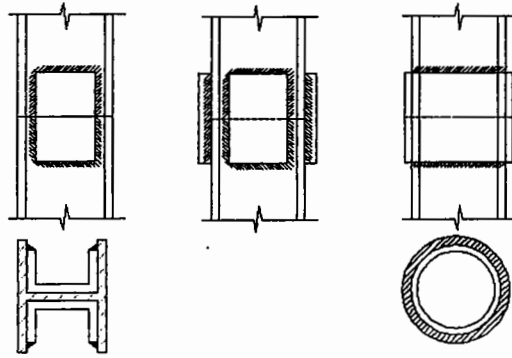
f_c : تنش مجاز فشاری بتن

f_s : تنش مجاز فشاری فولاد

می‌باشد.

۳. شمع‌های فلزی:

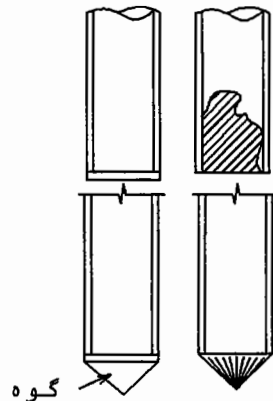
کاربرد مقاطع H ، I و لوله در مورد شمع‌های فلزی معمول‌تر هستند. مقطع لوله را به دو صورت ته باز و ته بسته می‌توان کوبید. مقاطع فلزی H و I حداقل جابجایی و دست خوردگی در خاک را ایجاد می‌نماید. وصله کردن شمع‌های فلزی مشابه وصله کردن ستون‌های فلزی است.



شکل (۷-۱۰): نمونه‌هایی از وصله کردن شمع‌های فلزی

برای جلوگیری از آسیب دیدگی و نیز برای تسلیح نوک شمع در خرد کردن سنگ‌های کوچک هنگام فرورفتن در زمین‌های سخت، از کفشک‌های فلزی استفاده می‌کند. گاهی نیز در محل کارگاه نوک شمع را تقویت می‌کنند.

نکته: مقاومت شمع لوله‌ای ته باز در خاک‌های سفت و متراکم مشابه شمع لوله‌ای ته بسته است چرا که پس از چند متر کوبیدن، خاک وارد انتهای لوله‌ی ته باز شده و به علت اصطکاک جداره همان‌جا حبس می‌شود. همچنین مقاومت شمع نوک تیز با شمع تخت تفاوت زیادی ندارد زیرا در زیر شمع تخت یک گوه خاکی ایجاد می‌شود.



شکل (۸-۱۰): مقایسه‌ی کوبش شمع‌های لوله‌ای ته باز و ته بسته

حداکثر بار مجازی که شمع فلزی به لحاظ مصالح می‌تواند تحمل نماید از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$P_a = A_p \cdot f_s$$

که در این رابطه:

A_p : سطح مقطع مؤثر شمع فلزی

f_s : تنش مجاز فولاد

می‌باشد.

در صورتی که شمع فلزی در معرض آب دریا یا آب‌های زیرزمینی شور و یا خاک‌های نباتی یا خورنده قرار دارد که PH آنها کمتر از ۵/۰ یا بالاتر از ۹/۰ است باید الزاماً شمع را با یک سیستم رنگ مناسب (نظیر اپوکسی) پوشانید و یا یک غلاف محافظ بتنی در اطراف شمع قرار داد. اضافه کردن ضخامت فولاد یعنی اعمال رواداری خوردگی (Corrosion allowance) و یا استفاده از سیستم حفاظت کاتدیک روش‌های دیگر حفاظت شمع‌های فولادی در مقابل خوردگی می‌باشد.

تعیین ظرفیت باربری شمع به روش استاتیکی:

در این قسمت در مورد طراحی شمع‌ها تحت اثر نیروی محوری گفتگو می‌شود. فرض بر آن است که توزیع بارها به نحوی صورت می‌گیرد که در شمع‌ها فقط نیروهای فشاری یا کششی ایجاد می‌شود. (طراحی شمع‌ها تحت اثر بار جانبی و لنگر به درس مهندسی پی پیشرفته مربوط می‌شود).
ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها را می‌توان از فرمول‌های زیر تعیین کرد.

$$P_U = P_b + \sum P_s - W \longrightarrow P_a = \frac{P_U}{F.S} = \frac{P_b}{F_b} + \frac{\sum P_s}{F_s}$$

$$T_U = \sum P_s + W \longrightarrow T_a = \frac{T_U}{F.S}$$

که در روابط بالا:

P_U : ظرفیت باربری نهایی شمع در فشار

T_U : ظرفیت باربری نهایی شمع در کشش

P_a : ظرفیت باربری مجاز در فشار

T_a : ظرفیت باربری مجاز در کشش

P_b : مقاومت انتهایی (نوک) شمع

P_s : مقاومت اصطکاکی جداره‌ی شمع

W : وزن خود شمع (که معمولاً از آن صرف‌نظر می‌شود)

$F.S.$: ضریب اطمینان کلی در طراحی شمع

F_b : ضریب اطمینان مربوط به باربری نوک

F_s : ضریب اطمینان مربوط به مقاومت اصطکاکی

می‌باشد.

۱- مقاومت انتهایی (نوک) شمع:

ظرفیت باربری نوک شمع از فرمول زیر بدست می‌آید.

$$P_b = A_b (C_b N_c + P_d N_q)$$

در این رابطه:

A_b : سطح مقطع نوک شمع

C_b : چسبندگی خاک در انتهای شمع

P_d : فشار روبار مؤثر در تراز نوک شمع

می‌باشد.

ضرایب N_c و N_q را می‌توان از جداول ترزاقی بدست آورد ولی از آنجا که این ضرایب برای پی‌های سطحی پیشنهاد شده‌اند استفاده از آنها برای پی‌های عمیق محافظه‌کارانه است.

میرهوف پیشنهاد می‌کند که N_c برای شمع‌ها در خاک چسبنده عدد ثابت ۹/۰ در نظر گرفته شود مشروط بر آنکه طولی معادل ۵B از شمع در داخل لایه‌ی خاک برابر وارد شده باشد. در مورد N_q در شمع‌های کوبشی نیز میرهوف منحنی خاصی را پیشنهاد می‌کند* که مقادیر بیشتری را نسبت به روابط ترزاقی بدست می‌دهد. ولی بررسی‌ها نشان داده‌اند شمع‌هایی که بر اساس منحنی پیشنهادی میرهوف طرح می‌شوند تحت اثر بار سرویس نشست زیادی خواهند داشت.

* این منحنی در بخش پیوست آمده است.

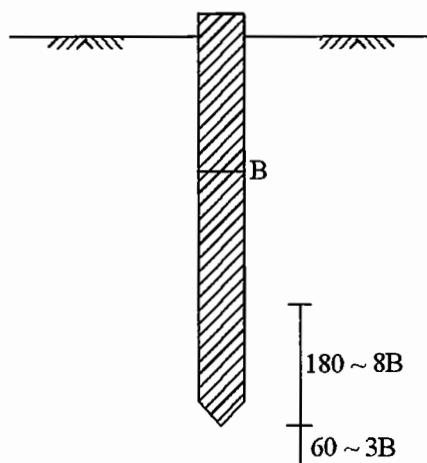
برزانتسف (Berezantsev) برای محاسبه‌ی N_q در شمع‌ها منحنی‌هایی را بر اساس ϕ و نسبت $\frac{D}{B}$ پیشنهاد کرده است. D عمق قرارگیری شمع در لایه‌ی انتهایی (لایه‌ی باربر) و B قطر شمع می‌باشد. نسبت $\frac{D}{B}$ حداکثر ۲۰ در نظر گرفته می‌شود.

نکته: بنا به پیشنهاد تاملینسون (Tomlinson) حاصل ضرب $P_d \cdot N_q$ باید به $\frac{MN}{m^2}$ ۱۰٪ محدود شود.

غیر از استفاده از رابطه‌ی P_b بر اساس نتیجه آزمایش SPT یا CPT نیز می‌توان ظرفیت باربری نهایی نوک شمع را بدست آورد.

$$\text{SPT} \longrightarrow P_b = A_b (40N) \frac{L_b}{B} \leq A_b (380N)$$

$$\text{CPT} \longrightarrow P_b = A_b \cdot q_c$$



شکل (۹-۱۰): محدوده‌ی مؤثر در انتخاب N و q_c

q_c و N به ترتیب متوسط آماری عدد SPT و متوسط آماری مقاومت انتهایی مخروط در ناحیه $3B$ تا $18B$ در شکل (۹-۱۰) هستند. $\frac{L_b}{B}$ متوسط $\frac{L}{B}$ در لایه‌های مختلف خاک در محدوده‌ی نوک شمع می‌باشد. هنگامی که شمع در خاک لایه‌ای کوبیده می‌شود.

۲- اصطکاک جداره شمع:

اصطکاک جداره شمع از فرمول‌های زیر بدست می‌آید.

$$P_s = \frac{1}{2} k_s \cdot P_d \cdot \tan \delta \cdot A_s \quad \text{در خاک دانه‌ای}$$

$$P_s = \begin{cases} \alpha \cdot \overline{C_U} \cdot A_s \\ \beta \cdot \bar{q} \cdot A_s \\ \lambda \cdot (\bar{P}_o + 2\overline{C_U}) \cdot A_s \end{cases} \quad \text{در خاک چسبنده}$$

رابطه‌ی سطر اول مقاومت اصطکاک جداره‌ی شمع در خاک‌های دانه‌ای را نشان می‌دهد و رابطه‌های سطر دوم مقاومت اصطکاک جداره شمع در خاک‌های چسبنده را نشان می‌دهد. باید توجه داشت با توجه به غالب بودن ϕ یا C در یک لایه خاک، در هر لایه‌ی خاک، در جهت اطمینان یکی از روابط فوق به کار برده می‌شود.

در رابطه‌ی اول برای خاک‌های دانه‌ای، فشار مؤثر روباره در انتهای شمع، K_s ضریب فشار جانبی خاک، δ زاویه‌ی اصطکاک بین خاک و شمع و A_s سطح جانبی شمع در تماس با خاک می‌باشد. K_s و δ را از جدول (۲-۱۰) تعیین می‌کنند.

جدول (۲-۱۰): مقادیر K_s و δ

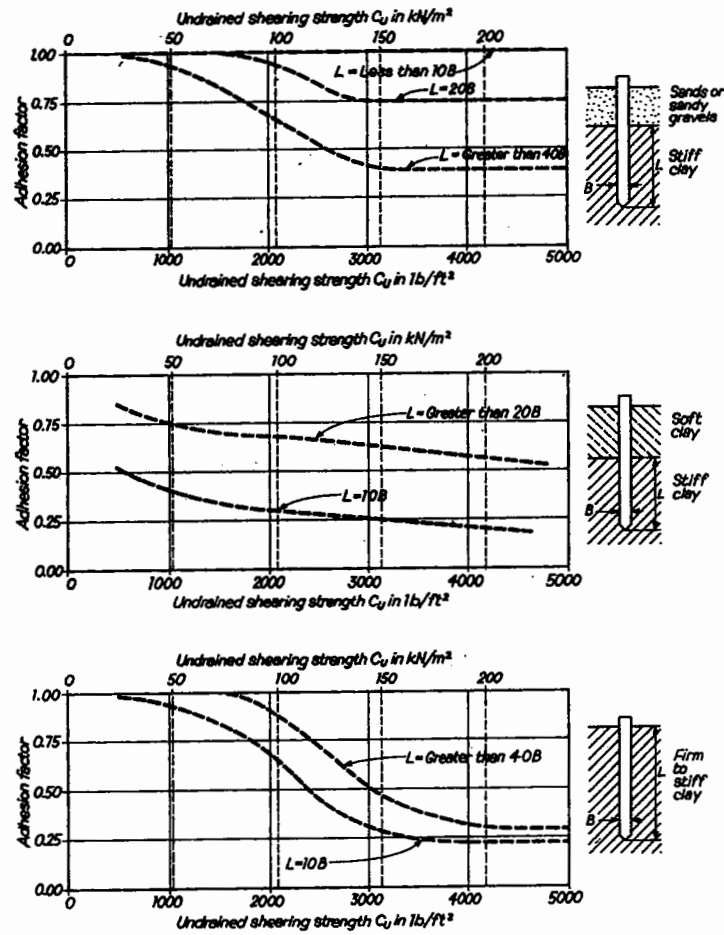
فلزی	20°	0.5	1.0
بتنی	$\frac{3}{4}\phi$	1.0	2.0
چوبی	$\frac{2}{3}\phi$	1.5	4.0

در شمع‌های بتنی درجاریز می‌توان K_s را معادل K_0 ، یعنی ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون که از رابطه‌ی $K_0 = (1 - \sin \phi') \sqrt{OCR}$ به دست می‌آید در نظر گرفت ولی در شمع‌های کوبشی K_s معمولاً از K_0 بزرگتر است.

در محاسبه‌ی اصطکاک جداره‌ی شمع با خاک چسبنده در حال حاضر سه روش کلی وجود دارد که به روش‌های α ، β و λ موسومند.

روش α پیشنهاد تاملینسون (Tomlinson) می‌باشد. در این رابطه α ضریب چسبناکی (adhesion)، \bar{C}_U چسبندگی زهکشی نشده متوسط در اطراف شمع و A_s سطح جانبی شمع در تماس با خاک می‌باشد. حدود صحت نتایج این روش که به وسیله‌ی تاملینسون گزارش شده است $\pm 25\%$ می‌باشد. از روش α برای محاسبه‌ی اصطکاک جانبی شمع در خاک‌های چسبنده که رفتار زهکشی نشده دارند، استفاده می‌شود. ضریب α از نمودار (۱-۱۰) به دست می‌آید.

در روش β ، \bar{q} تنش قائم مؤثر در وسط ارتفاع شمع می‌باشد و ضریب β نیز $\beta = K \cdot \tan \delta$ می‌باشد که K در آن عددی مابین K_0 و حداکثر $1/75$ می‌باشد و δ نیز زاویه‌ی اصطکاک بین جداره‌ی شمع و خاک است. تفاوت روش β با روش‌های α و λ این است که در این روش \bar{q} تنش قائم مؤثر می‌باشد بنابراین وضعیت خاک در حالت زهکشی شده (Drained) مورد نظر است و میزان اصطکاک جانبی در خاک‌های چسبنده را پس از زهکشی شدن آب منفذی اضافی نشان می‌دهد.



نمودار (۱۰-۱): نمودارهای تعیین ضریب α

نکته: اگر روی سطح خاک سربار داشته باشیم رابطه β را می‌توان با در نظر گرفتن اثر سربار q_s به شرح زیر اصلاح کرد:

$$P_s = \beta(\bar{q} + q_s) \cdot A_s$$

روش λ پیشنهاد Vijayvergiya و Focht می‌باشد. در این فرمول λ ضریب ورجیا و p_0 تنش موثر قائم متوسط بین سطح زمین و انتها (نوک) شمع می‌باشد (یعنی p_0 در وسط شمع محاسبه می‌گردد). C_U چسبندگی زهکشی نشده متوسط در اطراف شمع است. ضریب λ از منحنی پیشنهادی افراد فوق بر حسب عمق نفوذ شمع در خاک تعیین می‌شود. اگر عمق نفوذ شمع در خاک در ابتدای حل مسأله معلوم نباشد باید مسأله را با آزمون و خطا حل نمود. حدود صحت نتایج روش $\pm 10\%$ گزارش شده است. از روش λ در خاک‌های چسبیده و اشباع در حالت زهکشی شده و زهکشی نشده استفاده می‌شود. روش λ خصوصاً در شمع‌های بلند کوبیده شده در خاک رس یکنواخت مناسب است. ضریب λ از نمودار (۱۰-۲) به دست می‌آید.

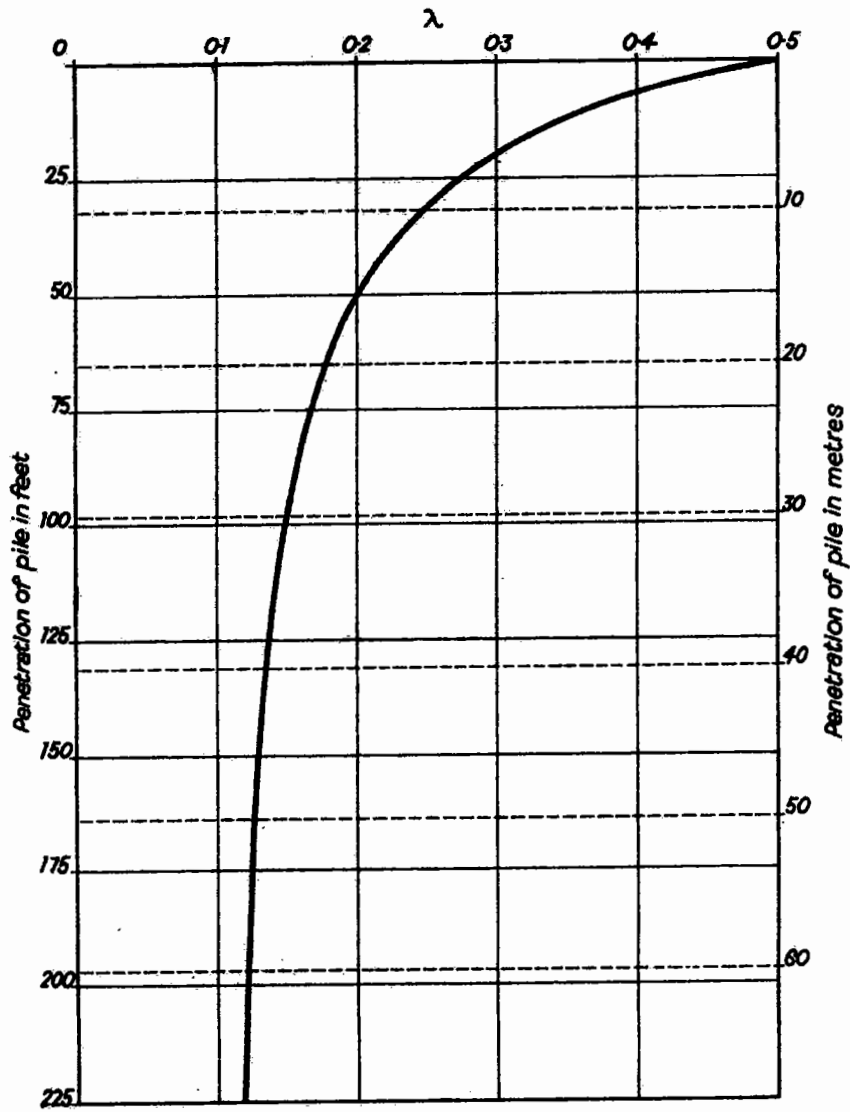
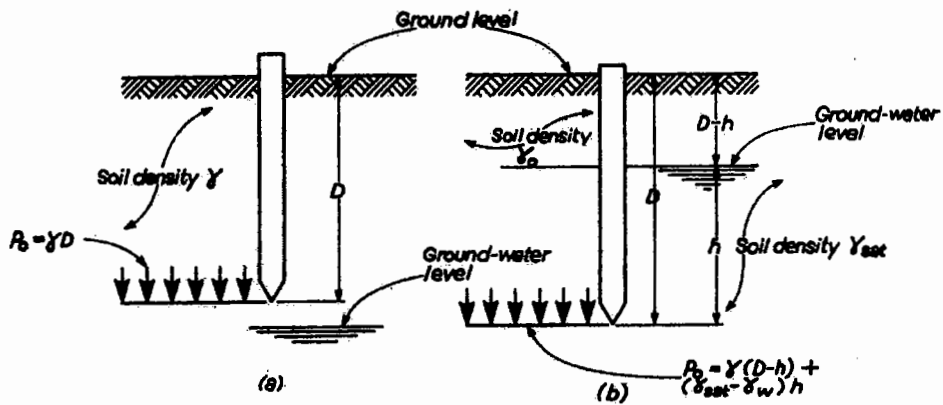


Fig. 4.10 Value of coefficient λ for various penetration depths (after Vijayvergiya and Focht^(1,1))



Determination of effective overburden pressure
 (a) Ground-water level below pile toe (b) Ground-water level above pile toe

نمودار (۱۰-۲): نمودارهای تعیین ضریب λ

شمع در خاک اشباع: شمعکوبی در خاکهای رسی نرم و حساس، معمولاً موجب کاهش چسبندگی خاک شده و ظرفیت باربری شمع‌های کوبیده شده در این نوع خاکها در ابتدا ناچیز است. به مرور زمان، چسبندگی از دست رفته بصورت ایجاد چسبناکی (adhesion) بین خاک رس و جداره شمع جبران شده و ظرفیت باربری شمع تدریجاً افزایش می‌یابد.

بارگذاری بر روی گروه شمع‌های مستقر بر خاکهای رس اشباع، بعلت کم بودن ضریب نفوذپذیری در این خاکها باعث پاسخ خاک بصورت زهکشی نشده (undrained) می‌شود. در نتیجه فشار آب منفذی در لایه رسی اشباع بالا می‌رود. بنابراین ظرفیت باربری شمع‌ها در کوتاه مدت باید براساس پارامترهای حالت زهکشی نشده خاک انجام شود. فشار آب منفذی ایجاد شده در اثر پدیده تحکیم تدریجاً زائل شده و وضعیت خاک بصورت زهکشی شده (drained) در می‌آید. بنابراین ظرفیت باربری شمع‌ها در دراز مدت باید براساس پارامترهای زهکشی شده (پارامترهای تنش موثر ϕ' و c') صورت گیرد. بعبارت دیگر هنگام طراحی شمع‌ها لازم است که باربری شمع در هر دو حالت زهکشی نشده و زهکشی شده کنترل شود.

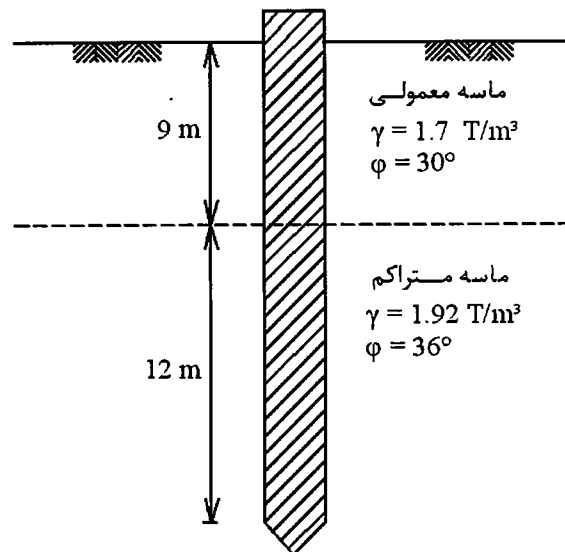
بارگذاری بر روی گروه شمع‌های مستقر در خاکهای درشت دانه اشباع بعلت بالا بودن ضریب نفوذپذیری در این نوع خاکها موجب افزایش فشار منفذی و ایجاد شرایط undrained نمی‌شود (مگر آنکه درصد رس یا سیلت در این خاکها زیاد باشد) بهمین دلیل برای طراحی شمع‌ها در خاکهای ماسه‌ای اشباع معمولاً درنظر گرفتن حالت زهکشی شده و پارامترهای مربوط به آن کفایت می‌کند.

اثر نوع ساخت شمع بر پارامترهای خاک: در انتخاب پارامترهای مقاومتی خاک برای طراحی شمع، باید به نوع ساخت شمع (کوبشی یا درجا ریز) توجه داشت. کوبیدن شمع در خاک موجب می‌شود که خاک در محدوده ۳ تا ۵ برابر قطر شمع در پیرامون آن بشدت دست خورده شود بهمین دلیل استفاده از پارامترهای ϕ و c خاک براساس آزمایش بر روی نمونه‌های دست نخورده در آزمایشگاه صحیح نیست. در استفاده از پارامترهای خاک در حالت دست خورده (remolded) قضاوت مهندسی می‌تواند نقش مهمی را ایفا کند. بعلت عدم اطمینانی که بر روی پارامترهای مقاومتی خاک در شمع‌های کوبشی وجود دارد در عمل غالباً از آزمایش بارگذاری بر روی شمع‌ها استفاده می‌شود تا ظرفیت باربری واقعی شمع‌ها در سایت بر روی چند شمع آزمایشی اندازه‌گیری شود. در صورتی که شمع بصورت درجاریز و در سوراخ حفاری شده ساخته می‌شود در صورتی که بتن مستقیماً با خاک اطراف سوراخ در تماس است می‌توان از پارامترهای دست نخورده خاک استفاده کرد. در صورتی که در حفاری سوراخ چاه برای حفظ پایداری جداره چاه از گل حفاری (بتونیت) استفاده شود احتمال دارد که وجود گل حفاری در دیواره چاه موجب کاهش تنشهای اصطکاکی بین شمع و خاک دیواره چاه گردد. در صورتی که از لوله جدار (casing) برای پایداری سوراخ چاه در حین حفاری استفاده شود و هنگام بتن‌ریزی در چاه، لوله جدار تدریجاً بیرون کشیده شود تنشهای اصطکاکی بین شمع و خاک پیرامون چاه کاهش نمی‌یابد.

نکته: در شمع‌های نسبتاً بلند که بر روی لایه مقاومتی اتکا کرده‌اند و مقاومت انتهایی p_b و مقاومت اصطکاکی p_s هر دو در تعیین باربری آنها درنظر گرفته می‌شوند باید بخاطر داشت که حداکثر p_b و حداکثر p_s الزاماً توأمأ ایجاد نمی‌شوند. برای ایجاد حداکثر اصطکاک جانبی شمع باید شمع در اثر بار وارده ۵ تا ۱۰ میلیمتر در خاک جابجا شود. این جابجایی که برای بسیج شدن تنشهای اصطکاکی در جداره شمع لازم است مستقل از قطر شمع و عمق فرورفتگی شمع در خاک است. لازم به ذکر است که اصطکاک جانبی به محیط مقطع (سطح جانبی شمع) بستگی دارد.

برای ایجاد مقاومت انتهایی حداکثر (p_b)، لازم است شمع به اندازه $B/10$ تغییر مکان داشته باشد. بهمین دلیل در این شمعها تحت بارهای سرویس، اصطکاک جانبی نقش اصلی را در باربری شمع ایفا می‌کند.

مثال (۱-۱۰): شمعی به قطر ۴۰ سانتیمتر از جنس بتن آرمه در یک خاک دو لایه مطابق شکل کوبیده شده است. حداکثر بار مجازی که با ضریب اطمینان ۳ می‌توان به شمع وارد کرد چقدر است؟



شکل (۱۰-۱۰): مشخصات خاک و شمع در مثال (۱-۱۰)

حل:

$$P_U = P_b + P_s - W$$

$$P_b = A_b (C_b N_c + P_d N_q)$$

$$\phi = 36^\circ \longrightarrow \begin{cases} N_q = 49 & \text{Terzaghi} \\ N_q = 280 & \text{Meyerhof} \\ N_q = 55 \left(\frac{D}{B} = \frac{12}{0.4} = 30 \right) & \text{Brezantsev} \end{cases}$$

$$P_b = \frac{\pi(0.4)^2}{4} [0 + (9 \times 1.7 + 12 \times 1.92) 55] = 265 \text{ ton}$$

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot k_s \cdot P_d \cdot \tan \delta \cdot A_s$$

$$\begin{cases} \delta = \frac{3}{4} \phi \\ K_s = \begin{cases} 1.0 & \text{لایه فوقانی} \\ 2.0 & \text{لایه تحتانی} \end{cases} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{1}{2} \times 1.0 \times (9 \times 1.7) \times \tan(3/4 \times 30^\circ) \times (0.4 \times \pi \times 9) \\ &\quad + (9 \times 1.7 + 1/2 \times 12 \times 1.92) \times 2.0 \times \tan(3/4 \times 36^\circ) \times (0.4 \times \pi \times 12) \\ &= 448 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$P_U = 265 + 448 = 713$$

$$P_a = \frac{713}{3} = 238 \text{ ton}$$

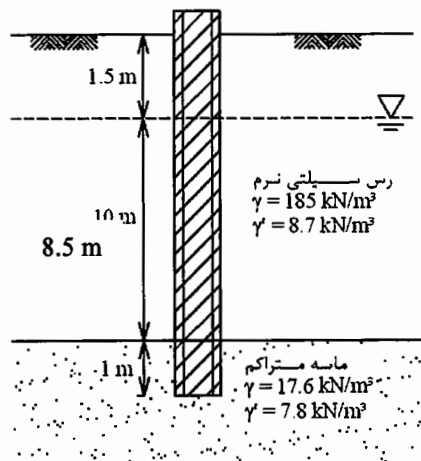
این بار باید از حداکثر باری که شمع بتنی به لحاظ مصالح می‌تواند تحمل نماید کمتر باشد. اگر فرض کنیم که ۰.۲٪ سطح مقطع شمع فولادگذاری می‌شود، مقدار این بار خواهد بود:

$$\begin{cases} f'_c = 90 \text{ kg/cm}^2 \\ f_s = 0.6 \times 3500 \end{cases}$$

$$P_a = A_c \cdot f'_c + A_s \cdot f_s = \frac{0.98 \times \pi(0.4)^2}{4} \times 90 + 0.02 \times \frac{\pi(0.4)^2}{4} \times 2100/10^3 = 166.7 \text{ ton}$$

بنابراین حداکثر بار مجاز این شمع ۱۶۶/۷ تن می‌باشد. در چنین شرایطی که بار مجاز شمع به لحاظ مصالح از ۳ کمتر می‌شود باید درصد فولاد در مقطع شمع را بیشتر کرد یا از بتن مرغوب‌تری استفاده نمود و یا قطر شمع را افزایش داد.

مثال (۱۰-۲): یک شمع فلزی IPB350 به طول ۱۱ متر در زمین کوبیده شده است. ۱۰ متر از طول شمع در داخل رس سیلتی نرم و یک متر از آن در داخل یک لایه ماسه متراکم فرو رفته است. سفره‌ی آب زیر زمینی به فاصله‌ی ۱/۵ متری از سطح زمین قرار دارد. آزمایشات صحرایی نشان داده‌اند که عدد SPT در لایه‌ی رسی بین ۳ تا ۱۰ و در لایه‌ی ماسه متراکم بین ۴۰ تا ۶۰ بوده است. ظرفیت باربری نهایی شمع را تعیین کنید.



شکل (۱۰-۱۱): مشخصات خاک برای مثال (۱۰-۲)

حل:

الف) مقاومت انتهایی شمع

$$P_b = A_b (C_b N_c + P_d N_q)$$

با فرض اینکه خاک بین بال‌های تیرآهن را پر می‌کند، می‌توان نوشت:

$$A_b = 35 \times 35 = 1225 \text{ cm}^2$$

با استفاده از نمودار Brezantsev نیز می‌توان نوشت:

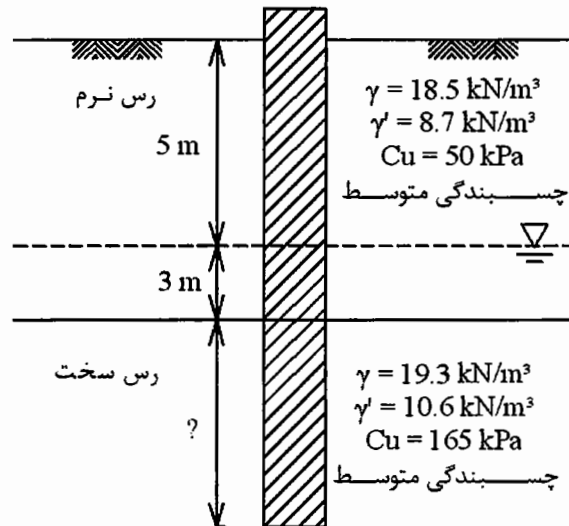
$$N = 40 \sim 60 \longrightarrow \phi \approx 40^\circ \xrightarrow{\frac{D}{B} = \frac{1}{0.36} = 3} N_q = 180$$

$$P_b = 0.1225 [0 + (1.5 \times 18.5 + 8.5 \times 8.7 + 1 \times 7.8) \times 180]$$

$$P_b = 2414 \text{ kN}$$

با توجه به کوتاه بودن طول شمع و وجود رس نرم که چسبندگی زیادی ندارد بهتر است از اصطکاک جانبی شمع صرف‌نظر شود (اصولاً به کار بردن شمع‌های پروفیل فلزی به صورت صرفاً اصطکاکی توصیه نمی‌شود).

مثال (۳-۱۰): طول لازم برای شمع به قطر ۵۰۰ میلی‌متر را برای تحمل بار مجاز $P_a = 300 \text{ kN}$ با ضریب اطمینان ۴ در وضعیت خاک مطابق شکل (۱۲-۱۰) بدست آورید.



شکل (۱۲-۱۰): مشخصات لایه‌های خاک در مثال (۳-۱۰)

حل:

$$P_U = P_a \times F.S. = 300 \times 4 = 1200 \text{ kN}$$

چون طول شمع معلوم نیست پس باید از آزمون و خطا استفاده شود.

$$\text{حدس اول: } L = 12.00 \text{ m}$$

$$P_U = P_b + P_s$$

$$P_b = A_b (C_b N_c + P_d N_q)$$

$$\phi = 0^\circ \longrightarrow \begin{cases} N_c = 9.0 \\ N_q = 1.0 \end{cases}$$

$$P_b = \frac{\pi(0.5)^2}{4} [165 \times 9 + (5 \times 18.5 + 3 \times 8.7 + 4 \times 10.6) \times 1.0]$$

$$= \frac{\pi(0.5)^2}{4} (1485 + 158.4) = 291.6 \text{ kN}$$

$$P_s = \frac{1}{2} k_s \cdot P_d \cdot \tan \delta \cdot A_s + \lambda (\bar{P}_0 + 2\bar{C}_U) A_s$$

از آنجا که در روش λ خاک یک لایه فرض می‌شود و بنابراین S_U متوسط دو لایه‌ی خاک چسبنده را حساب می‌کنیم تا بتوان از این روش استفاده نمود.

توجه: متوسط‌گیری بین یک لایه‌ی خاک چسبنده و یک لایه‌ی خاک دانه‌ای مجاز نیست.

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{S}_U = \bar{C}_U &= \frac{50(8) + 165(4)}{12} = 88.3 \text{ kpa} \\ \lambda &= 0.22 \quad (\text{برای } L = 12 \text{ m}) \\ \bar{P}_0 &= \frac{1}{2} [0 + (18.5 \times 5 + 8.7 \times 3 + 10.6 \times 4)] = 80.5 \end{aligned} \right.$$

$$P_s = 0.22(80.5 + 2 \times 88.3) \times (\pi \times 0.5 \times 12) = 1066 \text{ kN}$$

$$P_U = 291.6 + 1066 = 1357.8 > 1200$$

مشاهده می‌شود فرض انجام شده اندکی غیراقتصادی است. بنابراین فرض دوم را با اندکی کاهش در نظر می‌گیریم.

حدس دوم: $L = 11.0 \text{ m}$

$$P_b = 291.6 \text{ kN}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{S}_U &= \frac{50(8) + 165(3)}{11} = 81.3 \\ \lambda &= 0.24 \\ \bar{P}_0 &= \frac{1}{2} [0 + (18.5 \times 5 + 8.7 \times 3 + 10.6 \times 3)] = 75.2 \end{aligned} \right.$$

$$P_s = 0.24(75.2 + 2 \times 81.3) \times (\pi \times 0.5 \times 11) = 986.1 \text{ kN}$$

$$P_U = 291.6 + 986.1 = 1277.7 > 1200 \text{ O.K.} \Rightarrow L = 11.0 \text{ m}$$

→ use $L = 11.0 \text{ m}$

حل به روش α :

$$P_s = \frac{1}{2} K_s \cdot P_d \cdot \tan \delta \cdot A_s + \alpha \cdot \bar{C}_U \cdot A_s = \alpha \cdot \bar{C}_U \cdot A_s$$

حدس اول: $L = 12 \text{ m}$

$$\longrightarrow (\text{در نمودار } \alpha) L = 4 \text{ m} \longrightarrow \frac{L}{B} = \frac{4}{0.5} = 8 \xrightarrow{\bar{C}_U = 88.3} \alpha = 0.32$$

$$P_s = 0.32 \times 88.3 \times (\pi \times 0.5 \times 12) = 532 \text{ kN}$$

$$P_U = 291.6 + 532 = 824.2 \text{ kN} < 1200$$

حدس دوم: $L = 16 \text{ m}$

$$\longrightarrow (\text{در نمودار } \alpha) L = 8 \text{ m} \longrightarrow \frac{L}{B} = \frac{8}{0.5} = 16 \xrightarrow{\bar{C}_U = 107.5} \alpha = 0.4$$

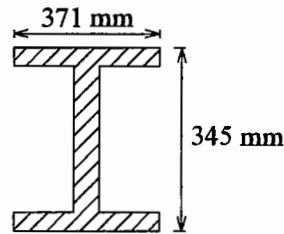
$$\bar{C}_U = \frac{50(8) + 165(8)}{16} = 107.5$$

$$P_s = 0.4 \times 107.5 \times (\pi \times 0.5 \times 16) = 1080.7 \text{ kN}$$

$$P_U = 291.6 + 1080.7 = 1373.3 \text{ kN} > 1200 \longrightarrow \text{O.K.}$$

→ use $L = 15.0 \text{ m}$

مثال (۴-۱۰): مثال (۳-۱۰) را با به کار بردن شمع فلزی H حل کنید.



شکل (۱۰-۱۳): پروفیل مورد استفاده به عنوان شمع در مثال (۱۰-۴)

حل:

با توجه به مشخصات داده شده در شکل (۱۰-۱۳) برای پروفیل HP۳۶۰×۱۰۹ می‌توان نوشت:

$$\text{محیط} = 2(345 + 371) = 1432 \text{ mm} = 1.43 \text{ m}$$

$$\text{مساحت} = 0.345 \times 0.371 = 0.128 \text{ m}^2$$

چون مساحت و محیط شمع نسبت به حالت قبل کاهش یافته طول آن را بیشتر در نظر می‌گیریم.

$$\text{حدس اول: } L = 13 \text{ m}$$

$$P_b = 0.128 [165 \times 9 + (5 \times 18.5 + 3 \times 8.7 + 4 \times 10.6) \times 1] = 210.4 \text{ kN}$$

$$\bar{C}_U = \frac{50 \times 8 + 165 \times 5}{13} = 94.23$$

$$\lambda = 0.21$$

$$\bar{P}_0 = \frac{1}{2} (18.5 \times 5 + 8.7 \times 3 + 10.6 \times 5) = 85.8$$

$$P_s = 0.21 (85.5 + 2 \times 94.23) (1.43 \times 13) = 1070.7$$

$$P_U = 210.4 + 1070.7 = 1281.1 \text{ kN}$$

$$\text{حدس دوم: } L = 12.5 \text{ m}$$

$$P_b = 190.1 \text{ kN}$$

$$\bar{C}_U = \frac{50 \times 8 + 165 \times 4.5}{12.5} = 91.4$$

$$\lambda = 0.215$$

$$\bar{P}_0 = \frac{1}{2} (18.5 \times 5 + 8.7 \times 3 + 10.6 \times 4.5) = 83.15$$

$$P_s = 0.215 \times (81.9 + 2 \times 91.4) (1.43 \times 12.5) = 1022$$

$$P_U = 210.4 + 1022 = 1232.4 \text{ kN}$$

$$\longrightarrow \text{ use } L = 12.5 \text{ m}$$

طراحی شمع در خاکهای چسبنده - اصطکاکی:

اگر شمع در خاک‌های رسی ماسه‌دار که ویژگی چسبندگی در آنها غالب است قرار دارد، معمولاً از مؤلفه‌ی زاویه اصطکاکی (ϕ) در محاسبه ظرفیت باربری شمع صرف‌نظر می‌شود. به همین ترتیب در ماسه‌های رس‌دار که ویژگی چسبندگی در آنها کم است معمولاً محاسبات باربری شمع با فرض $C = 0$ صورت می‌گیرد.

با این حال در رس‌های ماسه‌دار، سیلت‌های ماسه‌دار و نیز ماسه‌های رسی و سیلتی که هر دو ویژگی چسبندگی و اصطکاک در آنها قابل توجه است (خاک‌های $\phi - C$) در محاسبه‌ی باربری نوک و جداره می‌توان مؤلفه‌های ϕ و C را توأمأ در نظر گرفت.

طراحی شمع در خاک‌هایی که از لایه‌های متناوب چسبنده و اصطکاکی تشکیل شده‌اند:

باید دانست که شمع‌هایی که در خاک چسبنده قرار دارند دارای اصطکاک جانبی نسبتاً بالایی بوده و مقاومت اتکایی آنها پائین است ولی در خاک‌های دانه‌ای هر دو مکانیزم مقاومت نوک (انتها) و اصطکاک جانبی می‌توانند اهمیت داشته باشند. بنابراین وقتی که شمع در لایه‌های متناوب چسبنده و دانه‌ای قرار می‌گیرد محل نوک شمع از اهمیت زیادی برخوردار است. اگر مقاومت انتهایی بالایی موردنیاز است باید انتهای شمع روی یک لایه‌ی خاک درشت‌دانه متراکم قرار داده شود. برای این کار باید تصویر دقیق و روشنی از تغییرات جنس و ضخامت لایه‌های خاک زیر سطحی داشته باشیم. این تصویر به کمک آزمایشات صحرایی نظیر SPT یا CPT در گمانه‌ها به دست می‌آید. باید توجه داشت اگر ضخامت لایه‌ها کم باشد این امکان وجود دارد که نوک شمع روی لایه‌ی متراکم قرار نگرفته و وارد لایه‌ی سست بعدی شود و ظرفیت باربری شمع یک‌باره کاهش پیدا کند. در این نوع زمین‌ها می‌توان فرض کرد که همواره نوک شمع بر روی لایه‌ی سست قرار می‌گیرد. البته این فرض در زمین‌هایی که دارای لایه‌های دانه‌ای متراکم با ضخامت قابل‌توجه هستند، غیر اقتصادی است.

ضریب اطمینان در تعیین بار مجاز:

آزمایشات انجام شده با مقیاس واقعی بر روی شمع‌ها نشان داده است که به کار بردن ضریب اطمینانی حداقل به اندازه‌ی ۲/۵ در تعیین بار مجاز فشاری لازم است.

$$P_a = \frac{P_U}{2.5}$$

در بعضی از آیین‌نامه‌ها بر روی مقاومت انتهایی شمع ضریب اطمینان ۳ و بر روی اصطکاک جانبی ضریب اطمینان ۲ اعمال می‌کنند. در مورد شمع‌های تحت بار کششی ضریب اطمینان ۲/۵ یا ۳ روی T_U اعمال می‌شود.

محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع‌ها به روش دینامیکی:

با توجه به عدم اطمینان‌های موجود در تعیین پارامترها در روابط ذکر شده در مورد باربری نوک و اصطکاک جانبی شمع معمول بر آن است که هنگام کوبیدن شمع‌ها با توجه به مشخصات شمع و شمع‌کوب، باربری تعدادی از شمع‌ها در محل نیز تعیین می‌شود. اساس فرمول‌های این روش مقدار فرورفتن شمع تحت اثر انرژی ضربه و ممنتوم مشخصی است که از طرف چکش شمع‌کوب به شمع انتقال می‌یابد. به روابط محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع‌ها هنگام کوبش روش دینامیکی می‌گویند. ذیلاً به تعدادی از این فرمول‌های اشاره می‌شود.

Several dynamic pile formulas (use any consistent set of units)

Many (of the more progressive) building codes no longer specify the pile-driving equation(s) to use to estimate pile capacity. A suitable equation is left to the designer (who may have to justify it to the local building official). Several other dynamic formulae are given in Young (1981).

Canadian National Building Code (use SF = 3) as used in Table 17-5 but C_3 simplified to that shown here

$$P_u = \frac{e_h E_h C_1}{s + C_2 C_3} \quad C_1 = \frac{W_r + n^2(0.5W_p)}{W_r + W_p}$$

$$C_2 = \frac{3P_u}{2A} \quad C_3 = \frac{L}{E} + C_4$$

$$C_4 = 0.0001 \text{ in.}^3/\text{k (Fps)}$$

$$= 3.7 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{kN (SI)}$$

Note that product of $C_2 C_3$ gives units of s .

Danish formula [Olson and Flaate (1967)] (use SF = 3 to 6)

$$P_u = \frac{e_h E_h}{s + C_1} \quad C_1 = \sqrt{\frac{e_h E_h L}{2AE}} \quad (\text{units of } s)$$

Eytelwein formula (use SF = 6) [Chellis (1961)]

$$P_u = \frac{e_h E_h}{s + C(W_p/W_r)} \quad C = 2.5 \text{ mm} = 0.1 \text{ in.}$$

Gates formula [Gates (1957)] (use SF = 3)

$$P_u = a \sqrt{e_h E_h (b - \log s)}$$

$$P_u = \text{kips or kN} \quad E_h = \text{kips} \cdot \text{ft or kN} \cdot \text{m}$$

	s	a	b
Fps	in.	27	1.0
SI	mm	104.5	2.4

$e_h = 0.75$ for drop and 0.85 for all other hammers

Janbu [see Olson and Flaate (1967), Mansur and Hunter (1970)] (use SF = 3 to 6)

$$P_u = \frac{e_h E_h}{k_u s} \quad C_d = 0.75 + 0.15 \frac{W_p}{W_r}$$

$$K_u = C_d \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{C_d}} \right) \quad \lambda = \frac{e_h E_h L}{AE s^2}$$

Use consistent units to compute P_u . There is some disagreement of using e_h since it appears to be in C_d ; however, a better statistical fit tends to be obtained by using e_h as shown.

Modified ENR [ENR (1965)] formula (use SF = 6)

$$P_u = \left[\frac{1.25 e_h E_h}{s + C} \right] \left[\frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \right] \quad C = 2.5 \text{ mm} = 0.1 \text{ in.}$$

Navy-McKay formula (use SF = 6)

$$P_u = \frac{e_h E_h}{s(1 + 0.3C_1)} \quad C_1 = \frac{W_p}{W_r}$$

Pacific Coast Uniform Building Code (PCUBC) (from Uniform Building Code,² Chap. 28) (use SF = 4)

$$P_u = \frac{e_h E_h C_1}{s + C_2} \quad C_1 = \frac{W_r + kW_p}{W_r + W_p}$$

$$k = 0.25 \text{ for steel piles}$$

$$= 0.10 \text{ for all other piles}$$

$$C_2 = \frac{P_u L}{AE} \quad (\text{units of } s)$$

In general start with $C_2 = 0.0$ and compute value of P_u ; reduce value by 25 percent; compute C_2 and a new value of P_u . Use this value of P_u to compute a new C_2 , etc. until P_u used $\approx P_u$ computed.

در فرمول‌های فوق:

P_a : بار مجاز شمع

h : ارتفاع سقوط چکش

W_r : وزن چکش

W_p : وزن شمع و بالشتک

e_h : راندمان شمع کوب

$E_h (= W_r \cdot h)$: انرژی منتقل شده از طرف شمع کوب

S : مقدار فرورفتگی شمع به ازای هر ضربه

A : سطح مقطع شمع

L : طول شمع

E : مدول ارتجاعی شمع

n : ضریبی است بسته به جنس شمع که از جدول (۱۰-۳) تعیین می‌شود

می‌باشد.

جدول (۱۰-۳): تعیین مقدار n بر اساس مصالح

مصالح	n
شمع چوبی	۰/۲۵
شمع فلزی	۰/۳۲
شمع فلزی یا بتنی با کلاهدک چوبی فلزی	۰/۵۰
شمع بتنی بدون کلاهدک	۰/۴۰

مقادیر E_h و e_h از مشخصات دستگاه تعیین می‌شود. برای شمع کوب با شرایط کاری نسبتاً خوب می‌توان ضرایب کارایی زیر را در نظر گرفت:

جدول (۱۰-۴): تعیین مقدار e_h بر اساس نوع شمع کوب

نوع شمع کوب	e_h
چکش‌های وزنی	۰/۷۵ - ۱/۰۰
چکش‌های تک‌ضربه‌ای	۰/۷۵ - ۰/۸۵
چکش‌های دوضربه‌ای	۰/۸۵
چکش‌های دیزلی	۰/۸۵ - ۱/۰۰

اصطکاک منفی در شمع‌ها (Negative skin friction):

گاهی شمع در لایه‌ای از خاک دپو شده (fill) یا خاک دستی کوبیده می‌شود و یا شمع در لایه‌ای از خاک رسی قرار می‌گیرد که تحکیم کامل پیدا نکرده است و در حال تحکیم و نشست می‌باشد. در این موارد، خاکریز دستی یا خاک رسی تحت اثر وزن خود نشست کرده و نشست خاک نسبت به شمع موجب ایجاد تنش‌های اصطکاکی رو به پائین در جداره‌ی شمع می‌شود که به آن اصطکاک منفی می‌گویند. اصطکاک منفی موجب افزایش نیروی محوری در شمع می‌شود. آزمایشات نشان داده‌اند که مقدار این افزایش قابل توجه بوده و گاهی نیروی محوری ایجاد شده در

شمع بیشتر از مقاومت نهایی شمع به لحاظ مصالح آن خواهد بود. در تحلیل ظرفیت باربری شمع‌هایی که تحت اصطکاک منفی هستند نکات زیر حائز اهمیت هستند.

۱- در صورتی که شمع در خاکریز دستی یا لایه‌ی رس تراکم‌پذیر کوبیده می‌شود نباید در برآورد ظرفیت باربری، بر روی اصطکاک جانبی شمع حساب کرد.

۲- گرچه اصطکاک منفی می‌تواند موجب افزایش ظرفیت باربری شمع‌های کششی گردد ولی در محاسبه‌ی شمع‌های کششی اثر آن در نظر گرفته نمی‌شود.

محاسبه‌ی مقدار اصطکاک منفی به صورت دقیق مشکل است زیرا به موارد زیر بستگی دارد.

- حرکت نسبی بین شمع و خاکریز
- حرکت نسبی بین شمع و لایه‌های تراکم‌پذیر تحتانی
- تغییر شکل الاستیک شمع تحت بار سرویس
- سرعت تحکیم لایه‌های رسی تراکم‌پذیر

مواردی که در آن‌ها اصطکاک منفی ایجاد می‌شوند را می‌توان به صورت زیر نام برد:

الف) اگر خاکریز رسی اشباع در اطراف شمعی ریخته شود که قبلاً در خاک ماسه‌ای کوبیده شده است، خاکریز رسی اشباع تحکیم می‌یابد و نشست می‌کند به همین دلیل اصطکاک منفی در قسمتی از جداره‌ی شمع که در داخل خاک رسی قرار دارد ایجاد می‌شود.

$$f_n = K_0 \cdot \sigma'_v \cdot \tan \delta$$

$$Q_n = \int_0^{H_f} (K_0 \cdot \gamma'_f \cdot Z \cdot \tan \delta) P \cdot dZ = \frac{P \cdot K_0 \cdot \gamma'_f \cdot H_f^2 \cdot \tan \delta}{2}$$

که در این روابط:

K_0 : ضریب فشار در حالت سکون ($K_0 = 1 - \sin \phi_f$)

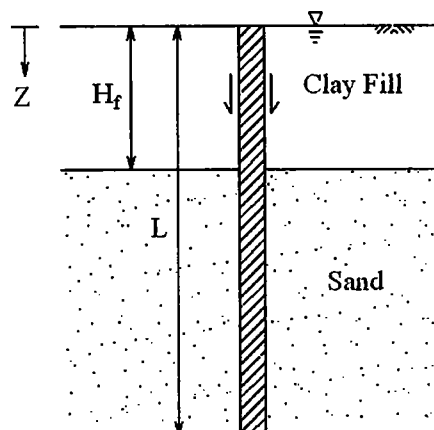
σ'_v : تنش قائم مؤثر در عمق Z ($\sigma'_v = \gamma'_f \cdot Z$)

δ : زاویه‌ی اصطکاک بین شمع و خاک ($\delta_f = (0.5 - 0.7)\phi_f$)

P : محیط شمع

می‌باشد.

اگر خاکریز در بالای سطح آب زیرزمینی باشد، به جای γ'_f باید γ_f مرطوب به کار رود (زیرنویس f مربوط به Fill می‌باشد).



شکل (۱۰-۱۴): خاکریز رسی اشباع در اطراف شمعی که در ماسه کوبیده شده باشد

ب) اگر خاکریزی روی یک لایه‌ی رس نرم ریخته شود، وزن خاکریز موجب تحکیم و پائین رفتن لایه‌ی رسی می‌شود، لذا در قسمتی از بدنه‌ی شمع که در تماس با خاک رسی قرار دارد اصطکاک منفی ایجاد می‌شود. (در اینجا از اصطکاک منفی در اثر نشست خاکریز ماسه‌ای صرف‌نظر شده است ولی می‌توان اثر آن را نیز در محاسبات در نظر گرفت).

شواهد کافی وجود دارد که تأثیر اصطکاک منفی بر جداری شمع از عمق $Z=0$ تا عمق $Z=L_1$ رخ می‌دهد که به عمق L_1 ، عمق خنثی (Neutral Depth) می‌گویند. عمق خنثی را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد (Bowles 1982):

$$L_1 = \frac{L - H_f}{L_1} \left(\frac{L - H_f}{2} + \frac{\gamma'_f \cdot H_f}{\gamma'} \right) - \frac{2\gamma'_f \cdot H_f}{\gamma'}$$

که در این رابطه:

γ'_f : وزن مخصوص مؤثر Fill (لایه‌ی بالایی)

γ' : وزن مخصوص مؤثر لایه‌ی تحتانی

می‌باشد.

مقدار L_1 با سعی و خطا از رابطه‌ی فوق به دست می‌آید.

آنگاه خواهیم داشت:

$$f_n = K_0 \cdot \sigma'_v \cdot \tan \delta$$

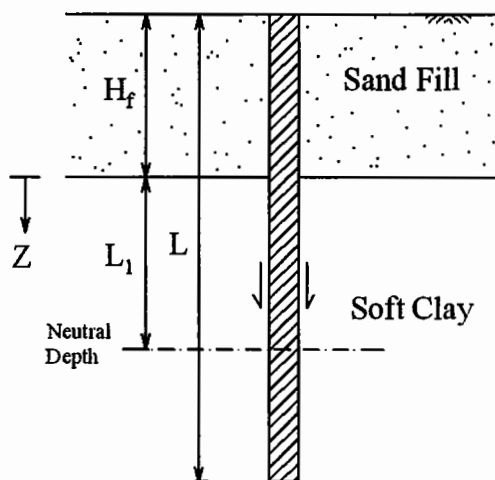
$$K_0 = 1 - \sin \phi_c$$

$$\sigma'_v = \gamma'_f \cdot H_f + \gamma' \cdot Z$$

$$\delta = (0.5 - 0.7)\phi_c$$

$$Q_n = \int_0^{L_1} P \cdot f_n \cdot dZ = \int_0^{L_1} P \times K_0 (\gamma'_f \cdot H_f + \gamma' \cdot Z) \times \tan \delta \cdot dZ$$

$$= (P \cdot K_0 \cdot \gamma'_f \cdot H_f \cdot \tan \delta) L_1 + \frac{L_1^2 \cdot P \cdot K_0 \cdot \gamma' \cdot \tan \delta}{2}$$

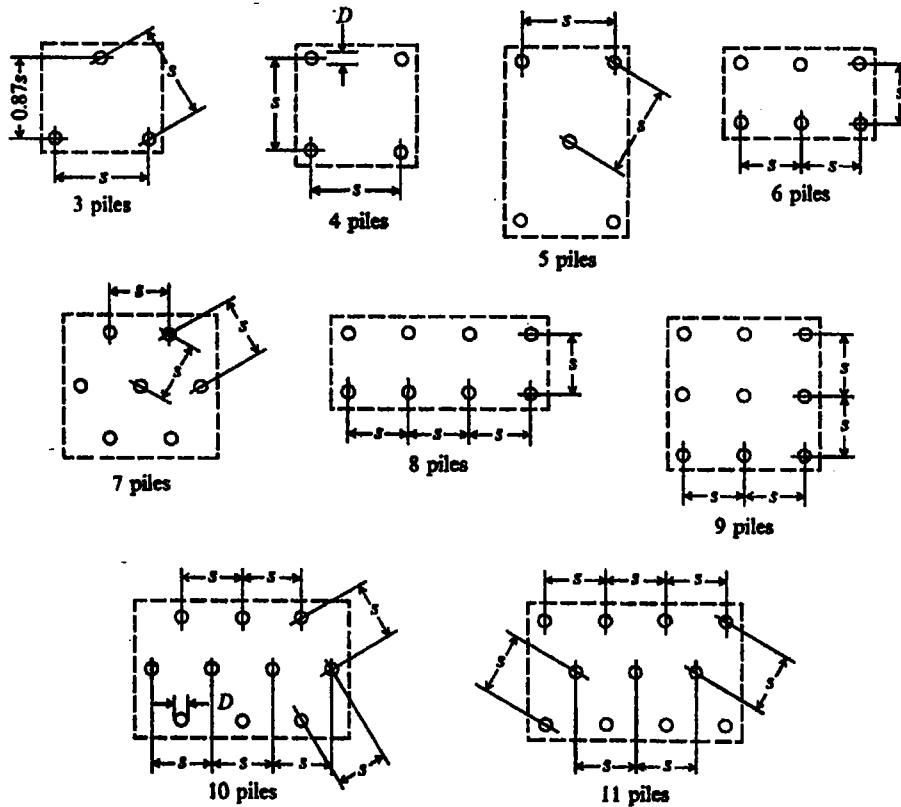


شکل (۱۰-۱۵): خاکریز ماسه‌ای بر روی رس نرم

گروه شمع‌ها:

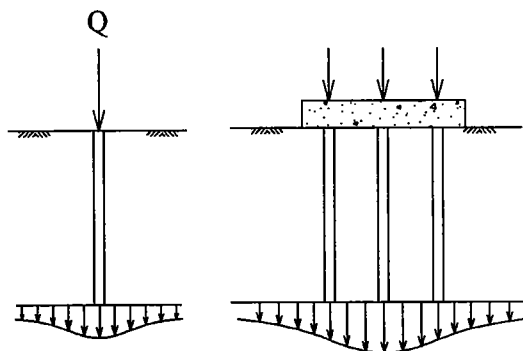
همانطور که گفته شد شمع‌ها جز در حالات خاص تقریباً همواره به صورت گروهی به کار برده می‌شوند و آیین‌نامه‌ها حداقل تعداد شمع‌ها را ۲ یا ۳ شمع ذکر می‌کنند. سرشمع‌ها معمولاً با یک دال بتنی (Pile Cap) به هم متصل

می‌شود. به کار بردن شمع‌ها در گروه موجب گسترش تنش در اعماق بیشتری از خاک شده و تنش‌ها در نقاط مختلف خاک افزایش می‌یابند، لذا ظرفیت باربری نهایی گروه شمع معمولاً کمتر از مجموع ظرفیت باربری تک‌تک شمع‌هاست (مگر آن‌که کوبیدن تعداد زیاد شمع موجب تراکم خاک گردد که در آن صورت ظرفیت باربری گروه شمع بیشتر می‌شود).

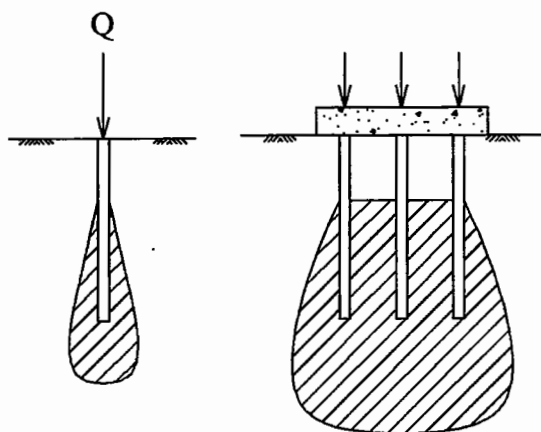


شکل (۱۰-۱۶): کاربرد شمع‌ها به صورت گروهی در پلان

هر چه فاصله‌ی شمع‌ها از هم بیشتر باشد اثر گروه کمتر ظاهر می‌شود. در برخی آئین‌نامه‌ها آمده است که اگر فاصله‌ی محور تا محور شمع‌ها (S) از ۸ برابر قطر شمع‌ها بیشتر باشد اندرکنش شمع‌ها بر روی هم در نظر گرفته نمی‌شود.



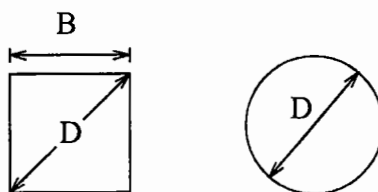
(الف) شمع‌های اتکایی



(ب) شمع‌های اصطکاکی

شکل (۱۰-۱۷): گسترش تنش در خاک در حالت تک شمع و گروه شمع

افزایش تنش در لایه‌های خاک ناشی از تداخل حباب‌های تنش تک‌تک شمع‌ها می‌تواند موجب نشست بیشتر گروه شمع شود. با توجه به موارد فوق و همچنین با عنایت به مشکلات اجرایی، معمولاً در مورد فاصله‌ی شمع‌ها ضوابط خاصی رعایت می‌شود.



شکل (۱۰-۱۸): ابعاد B و D در مقطع شمع

آئین‌نامه‌ی CP2004 (انگلیس):

$S > 3D$ حداقل ۱۰۰۰ میلیمتر

شمع در خاک چسبنده

$S > \pi D$ یا $4B$

شمع در خاک دانه‌ای

$S > 2D$

شمع متکی بر سنگ بستر

آئین‌نامه‌ی NBC (آمریکا):

$\begin{cases} S \geq 2D \\ S \geq 760 \text{ mm} \end{cases}$

شمع فرورفته در خاک

$S > D + 300 \text{ mm}$

شمع متکی بر سنگ بستر

بعضی آئین‌نامه‌های پل‌سازی حداکثر فاصله‌ی محور تا محور شمع‌ها را به $8D$ محدود می‌کنند، زیرا با زیاد شدن بیش از حد فاصله شمع‌ها، ابعاد دال بتنی سر شمع‌ها زیاد شده و طرح غیراقتصادی می‌شود. ولی این ضابطه در موارد دیگر مثل اسکله‌ها رعایت نمی‌شود. لازم به ذکر است که هر چه فاصله‌ی شمع‌ها نسبت به هم بیشتر باشد اثرات اندرکنشی شمع‌ها در خاک کمتر می‌گردد.

شمع‌های مایل در گروه شمع:

در سازه‌ها غالباً علاوه بر بار قائم، بار افقی و لنگر خمشی نیز به گروه شمع وارد می‌شود (یا بار به صورت مورب وارد می‌شود). هنگامی که مقدار مؤلفه‌ی بار افقی قابل توجه باشد معمولاً تعدادی شمع مایل نیز در گروه شمع به کار

می‌رود. آئین‌نامه‌ها توصیه می‌کنند اگر بار با زاویه ۱۵ درجه و یا بیشتر نسبت به قائم وارد می‌شود از شمع‌های مایل در گروه استفاده شود. شیب شمع‌های مایل از $\frac{1}{12}$ تا $\frac{5}{12}$ تغییر می‌کند. هر چه شیب شمع بیشتر باشد هزینه‌ی کوبیدن آن بیشتر است.

گاهی شمع‌های مایل را برای تحمل تمامی بار افقی که به گروه وارد می‌شود طراحی می‌کنند، ولی امروزه با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری، محاسبه‌ی سهم هر یک از شمع‌های قائم یا مایل از بار کل قابل تعیین است.

ظرفیت باربری گروه شمع:

هنگامی که دال سرشمع روی زمین و در تماس با خاک قرار دارد، غالب محققین توصیه می‌کنند که ظرفیت باربری گروه شمع با فرض یک پی بلوکی بزرگ انجام شود. برای این پی بلوکی بزرگ که همه شمع‌ها و خاک بین آنها را شامل می‌شود باید مقاومت انتهایی و اصطکاک جانبی بلوک جداگانه محاسبه شده و با هم جمع شود. هنگامی که دال سرشمع بالاتر از سطح زمین قرار دارد (مانند حالتی که در سازه‌های دریایی نظیر اسکله‌ها و سکوها وجود دارد) ظرفیت باربری گروه شمع را می‌توان از یکی از روشهای الف یا ب زیر محاسبه نمود و در جهت اطمینان، کمترین مقدار را لحاظ کرد:

الف- استفاده از ضریب کارایی گروه شمع E_g (Group Efficiency)

ب- استفاده از فرض پی بلوکی مشابه حالتی که دال سرشمع روی زمین قرار دارد.

نکته: فرض پی بلوکی بزرگ در حالتی که خاک چسبیده بوده و فاصله بین شمعها (S) کم باشد به واقعیت نزدیک است ولی در خاکهای دانه‌ای خصوصاً هنگامی که فاصله بین شمعها زیاد است، فرض رفتار یکپارچه بلوکی برای شمعها و خاک دانه‌ای بین آنها ممکن است چندان به واقعیت نزدیک نباشد. بهمین علت برخی محققین محاسبه ظرفیت باربری گروه شمع در خاکهای دانه‌ای را با روش الف توصیه می‌کنند. با اینحال از آنجا که در عمل عوامل زیادی هستند که موجب می‌شوند مرزبندی مشخصی بین رفتار بلوکی و رفتار منفرد شمعها قابل شناسایی نباشد بهتر است همواره هر دو روش را مدنظر قرار داد.

ذیلاً هر دو روش توضیح داده می‌شود.

الف) ظرفیت باربری نهایی تک شمع با توجه به جنس لایه‌های مختلف خاک محاسبه شده و در تعداد شمع‌ها ضرب می‌شود و سپس ظرفیت باربری گروه شمع با تأثیر یک ضریب به نام ضریب کارایی (E_g) در این حاصل ضرب به دست می‌آید. برای محاسبه‌ی ضریب کارایی روابط مختلفی عنوان شده است.

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn} \quad (\theta = \tan^{-1} \frac{D}{S})$$

$$E_g = 1 - \frac{D}{\pi.S.m.n} \left[m(n-1) + n(m-1) + \sqrt{2}(m-1)(n-1) \right]$$

در این روابط:

n: تعداد ردیف‌های شمع

m: تعداد شمع‌ها در هر ردیف

D: قطر شمع

S: فاصله‌ی محور تا محور شمع‌ها

می‌باشد.

ضریب کارایی E_g در واقع نسبت مقاومت اصطکاک جداره‌ی گروه شمع به مجموع مقاومت اصطکاک جداره‌ی تک تک شمع‌ها را نشان می‌دهد.

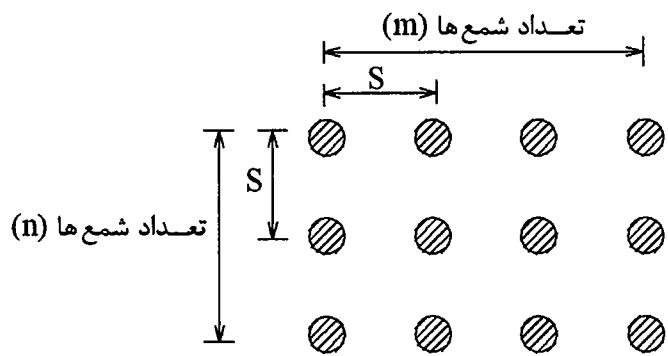
آزمایشات انجام شده نشان می‌دهد که در خاک چسبنده ضریب E_g از 0.7 (برای نسبت $\frac{S}{D}$ کوچک) تا 0.9 (برای نسبت $\frac{S}{D}$ بزرگ) تغییر می‌کند. ضریب E_g در خاک‌های دانه‌ای از 0.8 (برای ماسه‌ی متراکم و نسبت $\frac{S}{D}$ کوچک) تا عددی بزرگتر از یک (برای ماسه‌ی سست و نسبت $\frac{S}{D}$ بزرگ) تغییر می‌کند. در رابطه دوم از روابط فوق S در دو جهت باید مساوی باشد. اگر این شرط صادق نباشد باید مقداری را ملحوظ کرد که E_g کمتری به دست دهد. رابطه‌ی دیگری که جهت تعیین E_g برای یک گروه شمع مستطیلی (در پلان) مطابق شکل زیر کاربرد دارد، عبارت است از:

$$E_g = \frac{2(m+n-2)S + 4D}{m.n.\pi.D}$$

با فرض آن که به صورت تئوریک بخواهیم ضریب کارایی 100% درصد داشته باشیم، آنگاه فاصله‌ی محور تا محور شمع‌ها (S) از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$E_g = 1.0$$

$$S = \frac{1.57D.m.n - 2D}{m + n - 2}$$



شکل (۱۰-۱۹): آرایش شمع‌ها در پلان

فلد (Feld)، یک قانون ساده‌ی سرانگشتی برای تعیین ظرفیت باربری گروه شمع پیشنهاد کرده است و آن کاهش ظرفیت باربری هر شمع به اندازه‌ی $\frac{1}{n}$ ، به ازای هر شمع که در مجاورت آن قرار دارد می‌باشد. (ب) ظرفیت باربری گروه شمع بر اساس فرض عملکرد گروه شمع و خاک محصور بین شمع‌ها به صورت یک پی بلوکی یک‌پارچه تعیین می‌شود. این روش وقتی بکار می‌رود که انتهای یا نوک شمع‌ها بر روی لایه‌ی خاک برابر قرار نگرفته باشد. کاربرد این روش در خاکهای رسی نرم معمولتر است.

$$Q_g = \underbrace{\frac{S.L.P}{\text{اصطکاک جانبی بلوک}}}_{\text{مقاومت انتهایی بلوک}} + \underbrace{q_{ult}.A}_{\text{مقاومت انتهایی بلوک}} - \underbrace{\gamma.L.A}_{\text{وزن بلوک}}$$

در این رابطه:

Q_g : ظرفیت باربری گروه شمع است که از مجموع ظرفیت باربری تک‌تک شمع‌ها نباید بیشتر باشد
 S : مقاومت برشی متوسط خاک در عمق شمع (بلوک) است که در خاک‌های چسبنده برابر چسبندگی خاک بوده و در خاک‌های دانه‌ای برابر حاصل‌ضرب فشار جانبی خاک در حالت سکون در $\tan \phi$ می‌باشد

L: طول شمع واقع در خاک

P: محیط بلوک

q_{ult} : ظرفیت باربری نهایی خاک در انتهای شمع

A: سطح مقطع بلوک

γ : وزن مخصوص خاک

می‌باشد.

تاملینسون (Tomlinson) توصیه کرده است که هنگام محاسبه‌ی ظرفیت باربری گروه شمع با فرض عملکرد بلوکی، لازم است گسیختگی کلی گروه شمع نیز ارزیابی گردد. اگر گروه شمع کلاً در داخل خاک دانه‌ای مناسب یا رس سفت واقع شود و اگر هر شمع به تنهایی دارای یک ضریب اطمینان مناسب در مقابل گسیختگی تحت اثر بارهای قائم باشد وقوع گسیختگی کلی گروه شمع در این خاک غیر محتمل است، ولی اگر قرارگیری گروه شمع در داخل رس نرم که حالت مناسبی نمی‌باشد الزامی باشد باید ضریب اطمینان در موارد گسیختگی کلی پی بلوکی یک‌پارچه محاسبه گردد. ظرفیت باربری نهایی پی بلوکی در رس نرم از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = 2D(B + L)\bar{C} + 1.3C_b \cdot F_s \cdot N_c \cdot B \cdot L$$

در این رابطه

Q: ظرفیت باربری نهایی پی بلوکی (یا گروه شمع)

D: عمق فرورفتگی شمع (ضخامت بلوک)

L: طول کلی بلوک در پلان

B: عرض کلی بلوک در پلان

\bar{C} : چسبندگی متوسط رس در طول شمع

C_b : چسبندگی رس در انتهای شمع

F_s : ضریب شکل

N_c : ضریب ظرفیت باربری

می‌باشد.

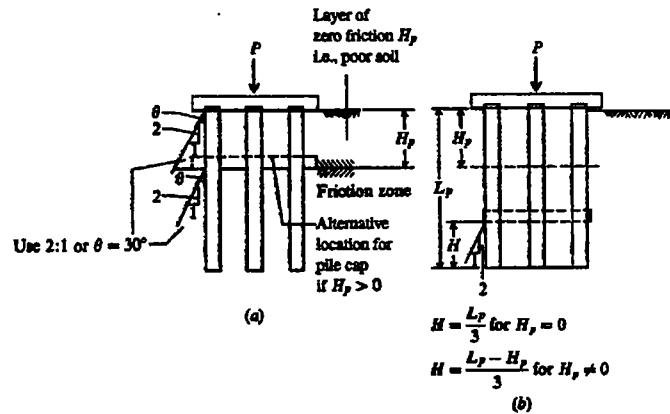
اگر تمامی بار سرویس پس از مدت کوتاهی از اجرای گروه شمع به آن وارد گردد خاک رس که به علت دست‌خوردگی، مقاومت برشی خود را تا حد زیادی از دست داده هنوز فرصت به دست آوردن مجدد چسبندگی قبلی را ندارد و لذا باید به جای \bar{C} مقاومت برشی دست‌خورده را قرار داد، ولی اگر تا چندین ماه بعد از اجرای گروه شمع، بار سرویس بر روی آن قرار داده نشود می‌توان از مقادیر بیشتری جهت \bar{C} استفاده نمود. در مورد C_b در اغلب موارد، چسبندگی دست‌خورده را می‌توان منظور نمود.

نشست گروه شمع:

برای تعیین نشست گروه شمع باید ارزیابی صحیحی در مورد چگونگی توزیع تنش وارد بر گروه شمع در لایه‌های خاک تحت‌الارضی وجود داشته باشد اما محاسبه‌ی تنش در لایه‌ها به چند دلیل ساده نیست:

- اثر دال سر شمع (Pile Cap) که معمولاً روی سطح زمین قرار می‌گیرد بر توزیع تنش در خاک.
- اثر الگوی توزیع تنش‌های اصطکاکی در طول شمع.
- اثر همپوشانی (overlapping) حباب‌های تنش در شمع‌های مجاور.
- اثر کوبیدن شمع بر توزیع تنش در لایه‌های خاک.
- اثرات درازمدت نظیر تحکیم و Thixotropy در لایه‌های رسی.
- اثر تغییرات تراز سفره‌ی آب زیرزمینی.

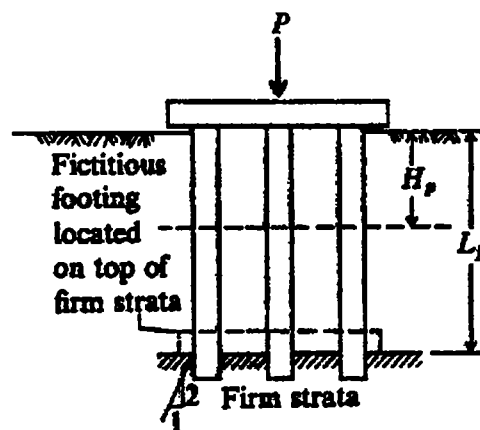
به همین دلیل از فرضیات ساده‌کننده‌ای جهت محاسبه نشست گروه شمع استفاده می‌کنند. معمولاً نشست گروه شمع برای یک پی فرضی محاسبه می‌شود که محل قرارگیری آن ذیلاً توضیح داده شده است. نشست این پی فرضی مشابه مباحث فصل چهارم کتاب در خصوص نشست پی‌های سطحی می‌باشد. این نشست در لایه‌های خاک دانه‌ای بصورت نشست آنی (الاستیک) و در لایه‌های خاک چسبنده بصورت نشست تحکیمی است.



شکل (۱۰-۲۰): گسترش فرضی تنش در خاک جهت محاسبه‌ی نشست گروه شمع اصطکاکی

در شمع‌های اصطکاکی ابتدا فرض می‌شود که دال سرشمع روی لایه‌ی خاک که موجد اصطکاک جانبی شمع است قرار گرفته و بارهای وارده بر آن با شیب $1H:2V$ در اعماق خاک گسترش می‌یابند. در حالت دوم فرض می‌شود که دال سرشمع در عمق H از نوک (انتهای) شمع قرار گرفته و بارهای وارده بر آن از این تراز با شیب $1H:2V$ در اعماق خاک گسترش می‌یابند. از دو روش فوق هر کدام که تنش بزرگتری را در لایه‌های خاک زیرین بدهند و حالت بحرانی‌تری را از نظر نشست ایجاد نمایند ملاک عمل قرار خواهند گرفت. H_p ضخامتی از خاک دستی را نشان می‌دهد که در باربری شمع تأثیر ندارد.

در شمع‌های اتکایی معمولاً نشست گروه شمع با فرض قرارگیری دال سرشمع روی لایه باربر محاسبه می‌شود. در این حالت وجود یا عدم وجود خاک دستی (H_p) تأثیری در محل فرضی دال سرشمع ندارد.



شکل (۱۰-۲۱): گسترش فرضی تنش در خاک جهت محاسبه‌ی نشست گروه شمع اتکایی

در شمع‌های اتکایی مقدار نشست معمولاً کوچک است و عمده‌ی نشست ناشی از تغییرشکل الاستیک خود شمع‌ها می‌باشد. در شمع‌های اصطکاکی مقدار نشست (یعنی فرورفتن نوک شمع در خاک) بیشتر است.

اگر شمع‌های اصطکاکی در خاک‌های دانه‌ای قرار دارند عمده‌ی نشست بلافاصله پس از وارد آمدن بار رخ می‌دهد. اگر شمع‌های اصطکاکی در خاک‌های چسبنده قرار دارند در آن صورت هر دو نشست الاستیک و تحکیمی به وقوع می‌پیوندد.

توزیع بار بین شمع‌ها در یک گروه شمع:

زمانی که بارگذاری بر روی گروه شمع، از بارهای قائم بدون خروج از محوری (یا با خروج از محوری حداکثر ۰/۶۷۵) تشکیل شده باشد و دال سرشمع کاملاً صلب و در تماس با خاک بوده و کلیه شمع‌ها قائم و گروه شمع متقارن باشد می‌توان با دقت کافی نیروی داخلی هر یک از شمع‌ها را از رابطه زیر به دست آورد.

$$P = \frac{Q}{n} \pm \frac{M_y \cdot x}{\sum x^2} \pm \frac{M_x \cdot y}{\sum y^2}$$

در این رابطه:

P : نیروی محوری هر شمع

Q : بار قائم کل وارد بر گروه شمع

M_x : لنگرهای وارده بر مرکز ثقل گروه شمع حول محور x

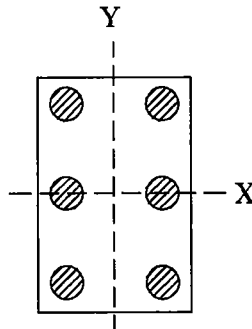
M_y : لنگرهای وارده بر مرکز ثقل گروه شمع حول محور y

n : تعداد کل شمع‌ها

x : فاصله‌ی شمع موردنظر تا مرکز گروه شمع حول محور x

y : فاصله‌ی شمع موردنظر تا مرکز گروه شمع حول محور y

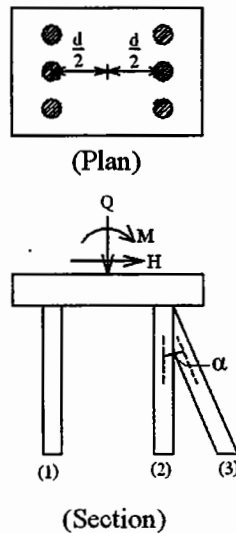
می‌باشد.



شکل (۱۰-۲۲): پلان یک گروه شمع جهت محاسبه‌ی سهم بار هر یک از شمع‌ها

مبنای فرمول فوق آن است که اتصال شمع‌ها به دال سرشمع مفصلی بوده لذا شمع‌ها تنها تحت اثر بار محوری بوده و لنگری به آنها منتقل نمی‌شود. اگر میزان وارد شدن شمع‌ها به داخل دال سرشمع از ۱۵۰ میلی‌متر کمتر باشد، می‌توان اتصال شمع‌ها به دال سرشمع را مفصلی فرض کرد.

کولمان (Culmann) در حالتی که ردیف شمع‌ها تنها از دو شمع قائم و یک شمع مورب تشکیل شده باشد، بر اساس معادلات تعادل که برای شمع‌ها تحت اثر بار محوری نوشته شده است فرمول‌های ساده‌ی زیر را ارائه نمود:



شکل (۱۰-۲۳): توزیع بار بین شمع‌ها با دو سری شمع قائم و یک سری شمع مورب

$$N_{(1)} = \frac{Q}{2} - \frac{M}{d}$$

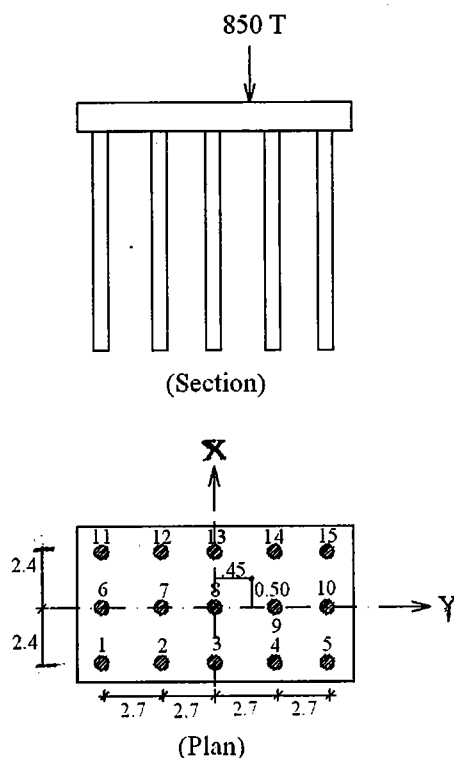
$$N_{(2)} = \frac{Q}{2} + \frac{M}{d} - H \cdot \cot \alpha$$

$$N_{(3)} = \frac{H}{\sin \alpha}$$

زاویه α مثبت در نظر گرفته می‌شود اگر حرکت شمع مورب به سمت قائم، در جهت حرکت عقربه‌های ساعت باشد.

باید توجه داشت که در این قبیل روش‌های کلاسیک توزیع بار بین شمع‌ها در جهت عرضی (یعنی عمود بر صفحه‌ی تصویر) یکنواخت فرض می‌شود و مسئله از حالت سه‌بعدی به دوبعدی ساده می‌شود، به عبارت دیگر فرض بر آن است که ردیف‌های موازی شمع سهم یکسانی از کل Q ، H و M وارده به سیستم شمع را تحمل می‌کنند. علیرغم سهولت روش‌های فوق نمی‌توان تقریبی بودن آن‌ها را از نظر دور داشت. فرض مفصلی بودن اتصال شمع‌ها به سر شمع غالباً صادق نیست و لنگر خمشی از طریق سرشمع به شمع‌ها منتقل می‌شود. توزیع بار یکنواخت بین ردیف‌های شمع در جهت عرضی نیز فرضی است که صحت آن معلوم نیست. اگر بار قائم وارد بر گروه شمع، خروج از محوری زیادی داشته باشد یا لنگرهای خمشی و نیروهای افقی بزرگی به گروه شمع وارد شود و یا شمع‌های قائم و مایل (در جهات مختلف) با هم به کار رفته باشند، با توجه به تقریب‌هایی که در فرضیات روش‌های ساده موجود است نمی‌توان نیروی داخلی شمع‌ها را با دقت خوبی از این روش‌ها تعیین کرد. برای دستیابی به راه‌حل‌های دقیق‌تر از تحلیل‌های سه‌بعدی ماتریسی در قالب نرم‌افزارهای کامپیوتری استفاده می‌کنند که با توجه به مشخصات شمع‌ها نیرو، برش و ممان را در سر هر شمع مشخص می‌سازند.

مثال (۱۰-۵): یک گروه شمع به شکل زیر باری معادل ۸۵۰ تن با خروج از مرکزیت ۰/۵ متر نسبت به محور Y و ۰/۴۵ متر نسبت به محور X را تحمل می‌کند. سهم بار هریک از شمع‌ها را تعیین کنید.



شکل (۱۰-۲۴): مشخصات گروه شمع مثال (۱۰-۵)

حل: خروج از مرکزیت در دو جهت X و y از 0.67S کوچکتر است.

$$P = \frac{Q}{n} \pm \frac{M_x \cdot y}{\sum y^2} \pm \frac{M_y \cdot x}{\sum x^2}$$

$$Q = 850 \text{ T}$$

$$n = 3 \times 5 = 15$$

$$\sum y^2 = 2 \times 5 \times (2.4)^2 = 57.6 \text{ m}^4$$

$$\sum x^2 = 2 \times 3 \times (2.7)^2 + 2 \times 3 \times (5.4)^2 = 218.7 \text{ m}^4$$

$$M_x = 850 \times 0.5 = 425 \text{ ton.m}$$

$$M_y = 850 \times 0.45 = 382.5 \text{ ton.m}$$

بنابراین برای محاسبه‌ی بار هر شمع خواهیم داشت:

$$\longrightarrow P_1 = \frac{850}{15} + \frac{425(-2.4)}{57.6} + \frac{382.5(-5.4)}{218.7} = 29.5 \text{ ton}$$

$$\longrightarrow P_2 = \frac{850}{15} + \frac{425(-2.4)}{57.6} + \frac{382.5(-2.7)}{218.7} = 34.2 \text{ ton}$$

$$\longrightarrow P_6 = \frac{850}{15} + 0 + \frac{382.5(-5.4)}{218.7} = 47.2 \text{ ton}$$

$$\longrightarrow P_8 = \frac{850}{15} + 0 + 0 = 56.7 \text{ ton}$$

$$\longrightarrow P_{15} = \frac{850}{15} + \frac{425(+2.4)}{57.6} + \frac{382.5(+5.4)}{218.7} = 83.8 \text{ ton}$$

این بارها در حد سرویس هستند که برای طراحی مقطع شمع و تعیین ظرفیت باربری هر یک باید این بارها به حد نهایی برده شوند.

مراجع برای مطالعه بیشتر

- [1] Pile Design and Construction Practice, Tomlinson M.J., 1981, Viewpoint Publication.
- [2] Foundation Engineering Handbook, Fung H.Y., 1991, Chapman & Hall.
- [3] Foundation Analysis and Design, Bowles J.E., 1996, McGraw-Hill.
- [4] Principle of Foundation Engineering, Das B.M., 1990, PWS-KENT.