جزوه روشهای تعیین ظرفیت باربری شمع

گردآورنده: علیرضا خسروانی مقدم (مدیر وبلاگ تخصصی مهندسی ژئوتکنیک)

E-mail: alireza479@yahoo.com
WEB: www.khosrovani.blogfa.com

(نشر این جزوه با ذکر منبع بلامانع است)

فهرست مطالب

مقدمه ۳
روشهای مستقیم در تعیین ظرفیت باربری شمع ۴
اشمرتمن و ناتینگهام ۴
روش هلندی دی رویتر و برینگن(۱۹۷۹) ۷
روش LCPC (Laboratoire central des ponts chausees) ۸
روش مایرهوف ۱۱
روش تومی و فخرو ۱۲
روش ICP (Imperial Collage) ۱۳
روش اسلامی و فلنیوس ۱۴
توضیحاتی در مورد روشها ۱۶
آزمایش بارگذاری استاتیکی ۱۷
آزمایش بارگذاری در طول طراحی شمع ۱۸
آزمایش بارگذاری در طول اجرای شمع و پس از اجرا ۱۸
برنامه ریزی و تجهیزات انجام آزمایش ۱۹
روشهای اعمال نیروی محوری ۲۰
سایر آزمایشهای بارگذاری ۲۱
ارائه نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری و تفسیر نتایج ۲۱
چه عددی برای ظرفیت باربری از آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع باید انتخاب کرد؟ ۲۲
روشهای تفسیر نمودار بارگذاری استاتیکی شمع ۲۳
حد برون یابی داویسون (Davisson) ۲۳
بار تسلیم دبیر (DeBeer) ۲۴

مقدمه

نفوذگر مخروطی استاتیکی همانند یک شمع است. مقاومت جداره آن به شکل اصطکاک غلاف بلافاصله در بالای مخروط اندازه گیری می شود، و مقاومت نوک آن به صورت مستقیم اعمال و به نوع تنش نوک مخروط اندازه گیری می شود. پیزوکون (CPTu) همان نفوذگر مخروطی است که با گیج فشار آب حفره ای در مخروط (که معمولا بلافاصله بعد از مخروط و در شانه آن اندازه گیری می شود و U_2 نام دارد) مجهز می باشد و پیشرفت قابل ملاحظه ای را در مخروط استاتیکی سبب شده است. رفتار خاک به اطلاعات پیزوکون وابستگی بیشتری دارد و آنالیزها با جزئیات بیشتری قابل اجرا می باشد.

دو روش اصلی در طراحی شمع توسط اطلاعات مخروط وجود دارد: روش مستقیم و روش غیر مستقیم

روش غیر مستقیم مخروط: بدست آوردن پارامترهای خاک همانند زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی زهکشی نشده از اطلاعات مخروط و استفاده از روابط استاتیکی در تحلیل ظرفیت باربری شمع که عدم قطعیت های خیلی مهمی را بوجود می آورد. روش غیر مستقیم اثر تنش افقی را نادیده می گیرد، و تئوری ظرفیت باربری پی نواری را بکار می گیرد و همچنین تراکم پذیری و نرم شدگی را نادیده می گیرد. این روشها خیلی مناسب نیستند جهت کاربری های مهندسی و به همین دلیل از ذکر جزئیات بیشتر خود داری شده است.

اندازه یکسان است و نیازی به اطلاعات صحرایی و تست های آزمایشگاهی جهت مشخص شدن پارامتر های میانی همانند K_s و N_q نمی باشد.

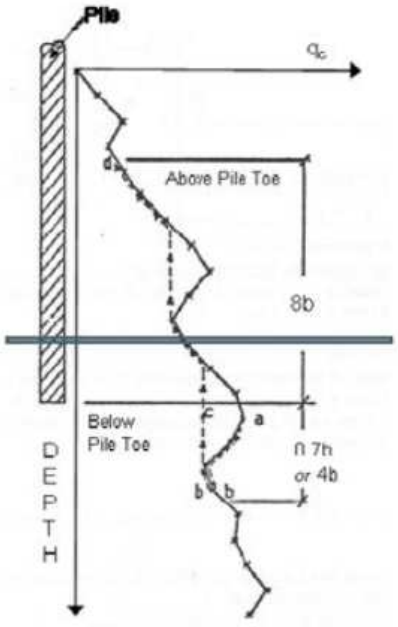
اولین بار این دستگاه در هلند توسعه یافت و تست نفوذگر مخروطی به عنوان ابزاری جهت تعیین ظرفیت باربری شمع مورد استفاده قرار گرفت. هفت روش در ادامه معرفی شده اند. اولین آنها بر اساس مخروطهای مکانیکی یا الکتریکی است. هفتمین مربوط به روش اسلامی فلنیوس می باشد که بر اساس اطلاعات پیزوکون است. البته که روش اسلامی فلنیوس برای CPT نیز قابل کاربرد می باشد. البته با فرض صحیح پخش اضافه فشار آب حفره ای که معمولا آن را برابر فشار آب حفره ای خالص U_0 میگیرند. روش هایی که در ادامه معرفی شده اند عبارتند از :

۱- اشمرتمن و ناتینگهام
۲- دی رویتر و برینگن (روش هلندی یا اروپایی)
۳- روش بوستامانته و جیانسلی (فراونسوی یا LCPC)
۴- مایرهوف (برای ماسه)
۵- تومی و فخرو (روش برای رسهای نرم می باشد)
۶- روش ICP
۷- اسلامی و فلنیوس

اغلب CPT و CPTU دارای مقادیر ماکزیمم و مینیمم های نامنظمی هستند که بیانگر تأثیر شرایط خاک بر نوک مخروط می باشد ولی نه برای شمعی با قطر خیلی بزرگتر. نگهداری این مقادیر تأثیر کمی بر اندازه گیری مقاومت جداره دارد و تأثیر آن بر تعیین مقاومت نوک زیاد است. بنابراین برای تعیین مقاومت نوک می بایستی مقادیر ماکزیمم و مینیمم ها را دستکاری و به اصطلاح صاف کنیم. جهت فیلتر کردن اطلاعات مخروط ۶ روش اول از میانگین حسابی در محدود مؤثر استفاده می کند و این در صورتی است که روش هفتم از میانگین هندسی محدوده مؤثر استفاده میکند.

- **روشهای مستقیم در تعیین ظرفیت باربری شمع**
- **اشمرتمن و ناتینگهام**
- **مقاومت نوک**

روش اشمرتمن و ناتینگهام بر اساس خلاصه ای از کارهای انجام شده بر روی مدل و تمام مقیاس شمع توسط ناتینگهام (۱۹۷۵) و اشمرتمن (۱۹۷۸) می باشد. واحد مقاومت نوک ، r_t ، میانگین حداقل مسیر بدست آمده از مقادیر تنش مخروط در ناحیه مؤثر (که در ۸b بالای شمع و ۰/۷b یا ۴b در پایین شمع) (b قطر شمع است) بدست می آید که در شکل نشان داده شده است.



تعیین منطقه مؤثر برای نوک شمع (Schmertmann, ۱۹۷۸)

روند کار مشتمل بر ۵ گام جهت فیلتر کردن اطلاعات q_c به مقادیر " حداقل مسیر " می باشد. گام ۱ محاسبه دو میانگین تنش مخروط است یکی برای عمق ۰/۷b و دیگری برای ۴b (در طول مسیر "a" تا "b"). کوچکترین را استخراج میکنیم. (مقدار ۰/۷b را انتخاب میکنیم اگر با افزایش عمق مقدار تنش مخروط زیاد می شود). گام ۲ تعیین کوچکترین تنش مخروط در

محدوده گام ۱ می باشد. گام ۳ میانگین مقادیر در گام ۱ و۲ را بدست می آوریم. گام ۴ میانگین تنش مخروط را در بالای شمع بر اساس حداقل مسیر که در شکل ۷.۷ نشان داده شده است بدست می آوریم. (معمولا بدست آوردن میانگین تنش مخروط کافی است.). گام ۵ میانگین مقادیر بدست آمده در گام ۳ و ۴ را بدست می آوریم. این مقدار را q_{ca} می نامیم.

در این صورت مقدار مقاومت نوک بصورت معادله بدست می آید:

$$r_t = C \cdot q_{ca}$$

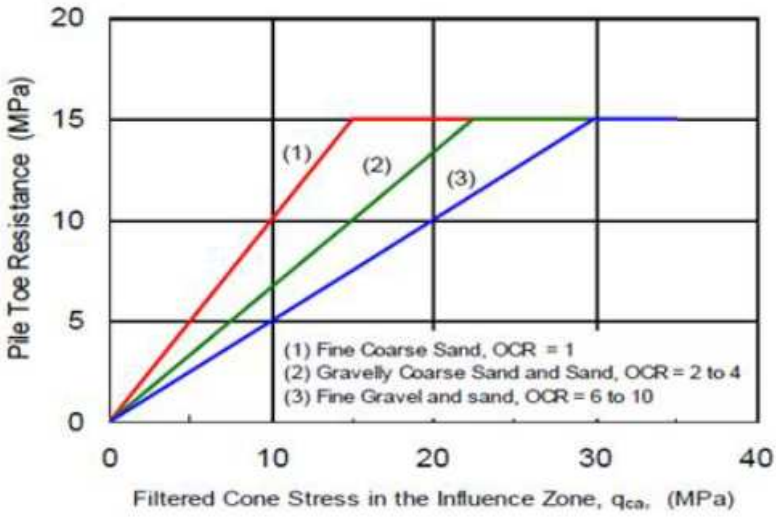
که در این معادله :

r_t = مقاومت واحد نوک شمع ; حداکثر میتواند ۱۵ مگاپاسکال باشد.

C = ضریب همبستگی برای نسبت پیش تحکیمی و OCR

q_{ca} = مقدار فیلتر مقاومت مخروط بدست آمده در محدوده مؤثر

مقدار همبستگی C بین ۰/۵ تا ۱ می باشد که به نسبت پیش تحکیمی بستگی دارد (OCR). شیب بین مقاومت نوک ، r_t و میانگین حداقل مسیر تنش مخروط در شکل نشان داده شده است. جهت ساده سازی از این نمودار برای رس نیز استفاده می شود.



تنظیمات ضرایب OCR

- **مقاومت جداره**

واحد مقاومت جداره، r_s ،ممکن است توسط اصطکاک غلاف بیان شده توسط معادله محاسبه شود.

$$r_s=K_f f_s$$

که در این معادله :

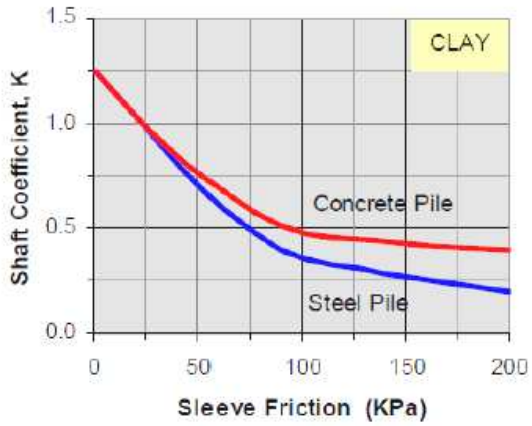
r_s = واحد مقاومت جداره شمع و مقدار حداکثر ۱۲۰Kpa اعمال می شود.

K_f = یک ضریب بی بعد

f_s = اصطکاک غلاف

در ماسه ، K_f فرض می شود که تابعی از نسبت عمق گیرداری (D/b) است. در سطح زمین تا D/b=۸ مقادیر K_f از ۰ تا ۲/۵ میانه یابی می شوند. سپس در زیر آن و تا عمق D/b ۲۰ مقدار آن از ۲/۵ به ۰/۸۹۱ کاهش می یابد. معمولا مقدار K_f=۰/۹ رضایتبخش است.

در رس K_f تابعی از اصطکاک غلاف است و بین ۰/۲ تا ۱/۲۵ تغییر می کند که در شکل نشان داده شده است.



ضرایب جداره برای استفاده از معادله

به ترتیب در ماسه و نه در رس مقاومت جدار ممکن است از تنش مخروط ،qc ، محاسبه شود.

$r_s = K_c q_c$

که در این معادله :

r_s = واحد مقاومت جداره شمع و مقدار حداکثر ۱۲۰Kpa اعمال می شود.

Kc = یک ضریب بی بعد است ، که تابعی از نوع شمع است.

برای شمعهای با نوک باز و فولادی Kc=۰/۸%

برای شمعهای با نوک بسته- لوله ای Kc=۱/۸%

برای شمعهای بتنی Kc=۱/۲%

روش هلندی دی رویتر و برینگن(۱۹۷۹)

مقاومت نوک

روش هلندی دی رویتر و برینگن (۱۹۷۹) مطرح گردید. برای بدست آوردن مقاومت نوک در ماسه، روش کار همانند اشمرتمن و ناتینگهام می باشد. در رس، واحد مقاومت نوک از روش آنالیز تنش کل با توجه به تئوری ظرفیت باربری قراردادی که در معادلات نمایش داده شده است، بدست می آید.

$r_t = 5 s_u$

$Su = q_c/N_k$

که در این معادله :

r_t = مقاومت واحد نوک ; مقدار حداکثر ۱۵Mpa اعمال میگردد.

S_u = مقاومت برشی زهکشی نشده

N_k = یک ضریب بی بعد که بین ۱۵ الی ۲۰ تغییر می کند، معمولا ۲۰ در نظر میگیریم.

مقاومت جداره

در ماسه ، مقاومت واحد جداره کمترین مقدار اصطکاک غلاف f_s و $q_c/۳۰۰$ می باشد.

در رس، مقاومت واحد جداره ممکن است از طریق مقاومت برشی زهکشی نشده su بدست آید که در معادله داده شده است:

$r_s = \alpha.s_u = \alpha.q_c/N_k = ۰/۰۵\alpha.q_c$

که در این معادله :

r_s = مقاومت واحد جداره

α = ضریب چسبندگی برای رسهای عادی تحکیم یافته برابر است با ۱ و برای رسهای پیش تحکیم یافته برابر ۰/۵ می باشد.

S_u =مقاومت برشی زهکشی نشده که از طریق معادله ۳-۵ بدست می آید.

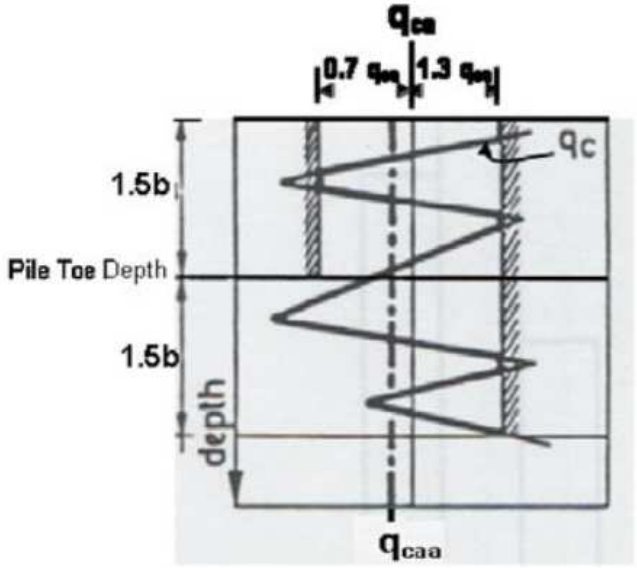
حد اکثر مقدار ۱۲۰Kpa برای واحد مقاومت جداره اعمال می شود.

- **روش LCPC (Laboratoire central des ponts chausees)**

روش LCPC یا فرانسوی بر اساس کارهای آزمایشگاهی بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) بر روی پروژه بزرگراه فرانسه می باشد. برای جزئیات بیشتر به CFEM ۱۹۹۲ مراجعه کنید. مقاومت غلاف f_s نادیده گرفته شده است.

- **مقاومت نوک**

واحد مقاومت نوک، r_t، بر اساس مقاومت مخروط در محدوده مؤثر ۱/۵b بالا و ۱/۵b پایین نوک همانطور که در شکل نمایش داده شده است بدست می آید. ابتدا از مقاومت مخروط در محدوده مؤثر میانگین گرفته می شود (q_{ca})،سپس یک میانگین q_{caa} از مقدار q_{ca} گرفته می شود که در حدود $1/3q_{ca}$ تا ۰/۷ است. نهایتا مقدار مقاومت نوک از ضرب این مقدار در ضریب همبستگی C_{LCPC} طبق معادله بدست می آید.



میانگین گیری نوک مخروط به روش LCPC (Bustamante and Gianselli, ۱۹۸۲)

$r_t = C_{LCPC}\ q_{caa}$

که در این معادله :

r_t =واحد مقاومت نوک شمع ; حد بالای ۱۵Mpa اعمال می شود.

C_{LCPC} = ضریب همبستگی

q_{caa} = میانگین از میانگین مقاومت مخروط در محدوده مؤثر

همانگونه که در جدول برای شمعهای کوبیدنی فلزی و پیش ساخته نشان داده شده است، ضریب همبستگی ، C_{LCPC} بین ۰/۴۵ تا ۰/۵۵ در رس و ۰/۴ تا ۰/۵ در ماسه تغییر میکند. برای شمعهای درجا مقدار ٪۲۰ کوچکتر در نظر میگیریم.

ضرایب واحد مقاومت نوک در روش LCPC ذکر شده در (۱۹۹۲) CFEM

Soil Type	Cone Stress (MPa)	Bored Piles C_{LCPC} (- - -)	Driven Piles C_{LCPC} (- - -)
CLAY	-- q_c < 1	0.04	0.50
	1 < q_c < 5	0.35	0.45
	5 < q_c - - -	0.45	0.55
SAND	- - - q_c < 12	0.40	0.50
	12 < q_c - - -	0.30	0.40

- **مقاومت جداره**

مقاومت واحد جداره ، r_s ، طبق معادله بدست می آید. ضریب K_{LCPC} بین ٪۰/۵ تا ٪۳ که توسط مقدار مقاومت نوک و نوع شمع تنظیم می شود، تغییر میکند. حد بالای مقاومت جداره (به نوع خاک، نوع شمع و روش استقرار شمع بستگی دارد) بین ۱۵Kpa تا ۱۲۰Kpa می باشد.

$r_s = K_{LCPC}\ qc \leq J$

که در این معادله :

r_s = مقاومت واحد جداره ; حد بالای اعمالی توسط جدول ۳-۲ قابل مشاهده است.

K_{LCPC} = یک ضریب بی بعد ، تابعی از نوع شمع و مقاومت مخروط

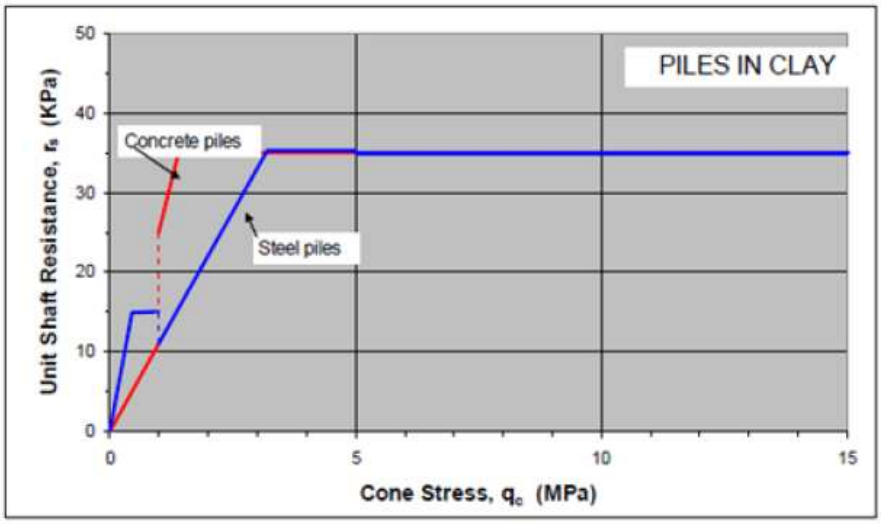
J = حد بالای واحد مقاومت جداره

q_c = مقاومت مخروط (تصحیح نشده برای فشار آب حفره ای در شانه مخروط)

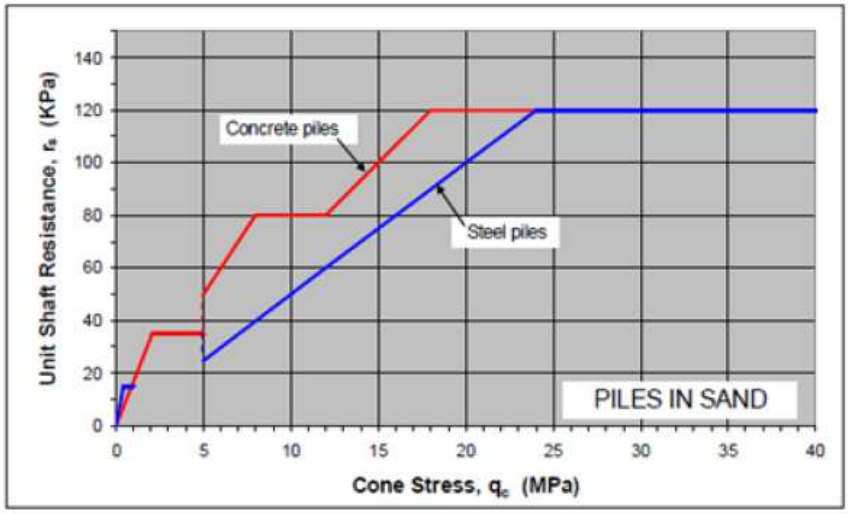
محدودیتهایی که در جدول نشان داده شده است در ژئولوژی خاصی بدست آمده است و قابل پرسش است که آیا این مقادیر اعتبار استفاده عمومی دارند یا خیر. برای کاربران متداول است که این محدودیت ها را بر می دارند و یا آنها را تغییر می دهند. خیلی از کاربران مقدار K و J و ضریب C را در مقاومت نوک تغییر می دهند. بنابراین هر وقت روش LCPC یا "LCPC اصلاح شده " استفاده شد، صرفا روش بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) نمی باشد.

ضرایب و محدودیت های واحد مقاومت جداره در روش LCPC ذکر شده در CFEM (۱۹۹۲)

Soil Type	Cone Stress (MPa)	Concrete Piles & Bored Piles K_{LCPC} (- - -)	Steel Piles K_{LCPC} (- - -)	Maximum r_s J (KPa)
CLAY	-- q_c < 1	0.011 (1/90)	0.033 (=1/30)	15
	1 < q_c < 5	0.025 (1/40)	0.011 (=1/80)	35
	5 < q_c - - -	0.017 (1/60)	0.008 (=1/120)	35
	(for q_c > 5, the unit shaft resistance, r_s, is always larger than 35 KPa)			
SAND	- - - q_c < 5	0.017 (1/60)	0.008 (=1/120)	35
	5 < q_c < 12	0.010 (1/100)	0.005 (=1/200)	80
	12 < q_c - - -	0.007 (1/150)	0.005 (=1/200)	120



واحد مقاومت جداره در مقابل تنش مخروط، qc، برای شمع ها در خاک رس طبق روش LCPC



واحد مقاومت جداره در مقابل تنش مخروط، qc، برای شمع ها در خاک ماسه ای طبق روش LCPC

روش مایرهوف

مقاومت نوک

روش مایرهوف (مایرهوف ۱۹۸۳ ; ۱۹۷۶ ; ۱۹۵۶) برای محاسبه ظرفیت باربری شمع در ماسه می باشد. برای مقاومت واحد نوک ، تأثیر اثر مقیاس شمع و نفوذ کم در لایه ماسه متراکم را توسط دو ضریب اصلاح کننده C_1 و C_2 به میانگین q_c اعمال میکند. مقاومت واحد نوک برای شمعهای کوبیدنی طبق معادله می باشد.

$$r_t = q_{ca} . C_1 . C_2$$

که در این معادله :

r_t = مقاومت واحد نوک ; برای شمعهای درجا مقدار ۷۰٪ از معادله کاسته می شود.

q_{ca} = میانگین حسابی q_c در محدوده ۱b پایین و ۴b بالای نوک شمع

$C_1 = [(b+0.5)/2b]^n$; ضریب اصلاح برای اثر مقیاس وقتی که b>۰/۵ . در غیر اینصورت C۱=۱

$C_2 = D/10b$; ضریب اصلاح نفوذ در لایه متراکم وقتی که D<۱۰b است. در غیر اینصورت C۲=۱

n = یک توان که برابر است با :

۱ برای ماسه نرم (qc< ۵ Mpa)

۲ برای ماسه با تراکم متوسط (۵<qc<۱۲ Mpa)

۳ برای ماسه متراکم (qc>۱۲ Mpa)

b = قطر شمع

D = عمق گیرداری شمع در لایه ماسه متراکم

برای شمعهای کوبیدنی ، مقاومت واحد جداره برابر اصطکاک غلاف f_s و یا ۰/۵٪ تنش مخروط q_c در نظر گرفته می شود

برای شمعهای درجا ، ضریب کاهشی ۷۰٪ و ۵۰٪ به معادلات محاسبه جداره به ترتیب اعمال می شود.

$r_s=K_f f_s$ $K_f=۱$

$r_s=K_c q_c$ $K_c=۰.۵$

که در این معادله :

r_s = مقاومت واحد جداره

K_f = ضریب اصلاح مقاومت غلاف

K_c = ضریب اصلاح مقاومت نوک

روش تومی و فخرو

مقاومت نوک

روش تومی و فخرو بر اساس نتایج مطالعه آزمایشگاهی در خاکهای رسی لوسیانا (تومی و فخرو ۱۹۸۱) می باشد. واحد مقاومت نوک به صورت روش اشمرتمن و ناتینگهام حل می شود.

- مقاومت جداره

مقاومت واحد جداره بر اساس معادله با ضریب K_f تعیین می شود. ضریب K_f در معادله بدون بعد می باشد.

$r_s= K_f f_s$

که در این معادله :

r_s = مقاومت واحد جداره شمع ، Kpa

K_f = یک ضریب

F_s = اصطکاک غلاف، Kpa

$K_f=0/5+9/5e^{-90.fs}$

که در این معادله :

e = عدد نپر = ۲/۷۱۸

F_s = اصطکاک غلاف، Mpa

- **روش ICP (Imperial Collage)**

جاردین و همکاران (۲۰۰۵) روش ICP با استفاده از نتایج CPT جهت تعیین ظرفیت باربری شمع در رس و ماسه را ارائه دادند. همانند روش های اخیر از مقدار f_s استفاده نشد و تنش مخروط برای اضافه فشار آب حفره ای اصلاح نگردید. روشی که در ادامه توضیح داده شده است برای ماسه کاربرد دارد که به مراتب از روش رس راحت تر است.

- **مقاومت نوک در ماسه**

روش ICP اثر تفاوت نسبی بین قطر مخروط و نوک شمع را در نظر می گیرد. معادله بیانگر این موضوع است.

$$r_t=q_{ca}[1-0/5\log(\frac{b_{pile}}{b_{cone}})]$$

که در این معادله :

r_t = مقاومت واحد نوک شمع

q_{ca} = مقاومت واحد نوک مخروط فیلتر شده طبق روش LCPC

b_{pile} = قطر نوک شمع

b_{cone} = قطر مخروط ; ۳۶ میلیمتر برای مخروطی با سطح $10cm^2$

برای شمعهای با قطر بزرگتر از ۹۰۰ میلیمتر ، حداقل $r_t=0/3\ qc$ اعمال می گردد. بعلاوه برای شمعهای کوبیدنی نوک باز ، معادلات دیگری استفاده می شود و بستگی به این دارد که درون شمع پر شده است یا نه.

- **مقاومت جداره در ماسه**

واحد مقاومت جداره شمعهای با نوک بسته کوبیده شده در ماسه بر اساس معادله ۳-۱۵ می باشد.

$r_s=K_j\ q_c$

K_j بر اساس معادله بدست می آید.

$$K_J = \left\{0.0145q_c\left(\frac{\sigma'_z}{\sigma_r}\right)^{0.13}\left(\frac{b}{h_t}\right)^{0.38} + [2q_c(0.0203+0.00125q_c(\sigma'_z\,\sigma_r)^{-0.5} - 1.216\times10^{-6}\left(\frac{q_c^2}{\sigma'_z\,\sigma_r}\right)]^{-1}\frac{0.01}{b}\right\}\tan\delta$$

که در این معادله :

σ'_z = تنش مؤثر سربار

σ'_r = تنش مؤثر شعاعی

b = قطر شمع

h_f = عمق زیر نوک شمع در نظر گرفته شده ; محدود به ۸b

δ = زاویه اصطکاک داخلی سطح مشترک

روش اسلامی و فلنیوس

مقاومت نوک

در روش CPTu اسلامی و فلنیوس (اسلامی ۱۹۹۶ ، اسلامی و فلنیوس ۱۹۹۷)، تنش مخروط به تنش مؤثر q_E تبدیل می شود بوسیله کسر مقدار فشار آب حفره ای اندازه گیری شده U_2 از تنش مخروط کل. واحد مقاومت نوک توسط میانگین هندسی تنش مخروط مؤثر در محدوده ی مؤثر که به لایه بندی خاک مربوط می شود (که پتانسیل تأثیرات بی تناسب کننده ماکزیمم و مینیمم آن برداشته می شود) محاسبه می شود. (میانگین حسابی استفاده شده این چنین رضایتبخش نیست). وقتی یک شمع از یک خاک ضعیف در درون خاکی سخت نصب می شود محدوده ی مؤثر بین ۴b در پایین نوک شمع و ۸b در بالای شمع در نظر گرفته می شود. وقتی که یک شمع از خاک سخت به درون خاکی ضعیف نصب می گردد محدوده ی مؤثر بالای شمع از ۸b به ۲b تغییر میکند. از طریق معادله مقاومت واحد نوک محاسبه می شود.

$$r_t = C_t\, q_{Eg}$$

که در این معادله :

r_t = واحد مقاومت نوک شمع

C_t = ضریب همبستگی نوک (ضریب تنظیم نوک) که در بیشتر موارد یک است

q_{Eg} = میانگین هندسی مقاومت نوک مخروط در محدوده مؤثر بعد از اصلاح آن توسط فشار آب حفره ای در شانه مخروط و تبدیل به تنش مؤثر ضریب همبستگی نوک، C_t ، معمولا ضریب تنظیم نوک نامیده می شود که تابعی از اندازه شمع میباشد (قطر شمع).

هر چه قطر شمع بزرگتر باشد تغییر مکان بیشتری جهت بسیج شدن مقاومت نوک مورد نیاز است. بنابراین مقاومت " قابل استفاده " نوک شمع با افزایش قطر شمع کاهش می یابد. برای قطر های بیشتر از ۰/۴ متر می بایستی ضریب تنظیم نوک را توسط فرمول بدست آوریم.

C_t=۱/۳b

که در این معادله :

b = قطر شمع بر اساس متر

مقاومت جداره

واحد مقاومت جداره نیز با میانگین تنش مؤثر نوک همراه با ضریب اصلاح (که به نوع خاک مربوط است و در زیر جزئیات آن نوشته شده است) همبستگی دارد. ضریب همبستگی C_s بوسیله شکل (۳-۸) تعیین می شود که هم از اصطکاک غلاف و هم تنش کل استفاده می کند. بهر حال چون اندازه اصطکاک جداره عدم قطعیتی بیشتر از تنش نوک مخروط را دارد به صورت مستقیم استفاده نمی شود.

$r_s = C_s q_E$

که در این معادله :

r_s = واحد مقاومت جداره

C_s = ضریب همبستگی جداره که به نوع خاک بستگی دارد و توسط شناسایی خاک اسلامی فلنیوس مشخص می شود.

q_E = مقاومت نوک مخروط بعد از اصلاح توسط فشار آب حفره ای و تبدیل به تنش مؤثر ; $q_E=q_t-u_2$

ضرایب ارتباطی جداره، C_s

Soil Type	C_s
1. Soft sensitive soils	8.0 %
2. Clay	5.0 %
3. Silty clay, stiff clay and silt	2.5 %
4a. Sandy silt and silt	1.5 %
4b. Fine sand or silty sand	1.0 %
5. Sand to sandy gravel	0.4 %

توضیحاتی در مورد روشها

وقتی که از روشهای CPT (۶ روش اول) استفاده میکنیم ، مشکلاتی بوجود می آید که توصیه هایی در مورد بعضی از این روشها وجود دارد :

۱- اگر چه توصیه ها به نوع خاک مربوط می شوند (رس یا ماسه) ، روش CPT وسیله ای برای تعیین نوع خاک نیست . اطلاعات نوع خاک از گمانه ها و نمونه گیریها و تست های آزمایشگاهی استخراج می شود که ممکن است برای اطلاعات CPT مناسب نباشد.

۲- همه روشهای CPT حاوی فیلتر کردن اطلاعات CPT هستند که این حذف کردن اطلاعات بستگی به اپراتور دارد و نتایج را تحت تأثیر قرار می دهد.

۳- همه روشهای CPT قبل از پیدایش پیزوکون فاقد اندازه گیری فشار آب حفره ای در روی شانه هستند (کامپانلا و رابرتسون ۱۹۸۸) که این باعث خطا می شود . این خطا در درشت دانه کمتر از ریزدانه است.

۴- تمام روشهای CPT مقدار تنش کل را در نظر میگیرند در صورتی که تنش مؤثر حاکم بر رفتار شمع میباشد.

۵- همه روشهای CPT مربوط به مکانی خاص از لحاظ ژئولوژیکی و برای شمعهایی خاص با خاکهایی خاص استفاده شده اند و ممکن است استفاده از آنها در مکانی دیگر درست نباشد.

۶- مقدار حد بالای واحد مقاومت نوک (۱۵Mpa) در روش اشمرتمن و ناتینگهام و اروپایی در خاکهای ماسه ای متراکم ، مقدار معقولی نیست و غالبا بیشتر از این رخ می دهد. به جز روش مایرهوف همه روشها دارای حد بالای واحد مقاومت جداره هستند. برای مثال حد بالای (۱۲۰ Kpa , ۱۵،۳۵،۸۰) برای روش فرانسوی در نظر گرفته شده است. غالبا مقادیری بیش از این حدود اتفاق می افتد. این مقادیر فرضی هستند و قابل پرسش است.

۷- همه روشهای CPT نیازمند قضاوت در انتخاب ضریب در اعمال به میانگین مقاومت نوک هستند (جهت بدست آوردن واحد مقاومت نوک)

۸- در روش اشمرتمن و ناتینگهام و روش اروپایی از OCR جهت ارتباط q_c به r_t استفاده می شود. هر چند که این مقدار برای رسها مشخص است ولی بندرت برای ماسه شناخته شده است.

۹- در روش اروپایی (هلندی) عدم قطعیت قابل توجهی هنگام تبدیل اطلاعات q_c به مقاومت برشی زهکشی نشده S_u وجود دارد و سپس از S_u به عنوان تخمین مقاومت نوک استفاده میکنیم . Su عدد یکتایی نیست و کاملا به نوع آزمایشی که ما استفاده می کنیم بستگی دارد. بعلاوه شرایط زهکشی شده خاک برای ظرفیت طولانی مدت شمع در خاکهای ریزدانه حاکم است. بنابراین استفاده از خصوصیات مقاومت برشی زهکشی نشده در تعیین ظرفیت طولانی مدت توجیهی ندارد.

۱۰- در روش فرانسوی محدوده ناحیه مؤثر خیلی کوچک است. مخصوصا وقتی که مقاومت خاک در زیر نوک شمع کاهش می یابد محدوده مؤثر باید بیشتر از ۱/۵b از زیر نوک شمع در نظر گرفته شود.

۱۱- روش فرانسوی و ICP از اصطکاک غلاف استفاده نمی کنند که جنبه مهمی از اطلاعات CPT و طبقه بندی خاک را نادیده گرفته اند.

۱۲- مقادیر ماکزیمم واحد مقاومت جداره فرضی به نظر می رسد و نمی تواند اعتبار عمومی داشته باشد.

آزمایش بارگذاری استاتیکی

مهمترین الزام طراحی ژئوتکنیکی برای بیشتر پی های عمیق این است که ظرفیت بار محوری کافی برای تحمل بارهای وارده داشته باشند. بنابراین مهندسین ژئوتکنیک روشهای مختلفی برای تعیین ظرفیت بار محوری و استفاده از آنها برای اندازه های مناسب شمع بوجود آورده و توسعه داده اند.

دقیقترین راه ممکن برای تعیین حداکثر ظرفیت باربری فشاری یا کششی برای پی های عمیق انجام آزمایش بر روی پی یا اندازه ی واقعی در محل مورد نظر برای پی های ساخته شده و بارگذاری آهسته ی آن تا گسیختگی است. این روش به عنوان آزمایش بارگذاری استاتیکی معروف است. دیگر روشهای غیر مستقیم تعیین ظرفیت باربری نهایی دارای دقت کمتری هستند. با این وصف آزمایش بارگذاری استاتیکی خیلی گران و زمانبر است و بنابراین می بایستی با قضاوت مهندسی خیلی بیشتری مورد استفاده قرار گیرند.

هدف آزمایش بارگذاری استاتیکی تعیین منحنی بار- نشست بار می باشد سپس این منحنی برای تعیین حداکثر ظرفیت باربری مورد استفاده قرار میگیرد.

آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع باید طبق دستورات ASTM.D-۱۱۴۳ برنامه ریزی و اجرا شود. این استاندارد معمولا هر پنج سال یکبار تجدید نظر و بازنگری شده و لذا توصیه میشود که آخرین نسخه آن استفاده شود.

پس از انجام آزمایش و ارائه نتایج آن شامل تغییرات نیرو نسبت به نشست، تجزیه و تحلیل به روشهای مختلفی برای تفسیر نتایج و برآورد ظرفیت باربری انجام می پذیرد. تعداد ۷ روش در ادبیات فنی ژئوتکنیک شناسایی شده است که با فرضیات مختلفی نتایج نیرو – نشست را تجزیه و تفسیر می نماید.

در این فصل ابتدا توضیحاتی در مورد برنامه ریزی و روش انجام بارگذاری استاتیکی ارائه خواهد شد. در ادامه ۷ روش مختلف برای تفسیر نتایج حاصله تشریح خواهد شد و در مورد مزایا، محدودیت ها و شرایط کاربرد هر روش بحث و بررسی ارائه میگردد.

آزمایش بارگذاری در طول طراحی شمع

با توجه به اینکه آزمایش بارگذاری معمولا روی شمع با ابعاد و شرایط شمع واقعی انجام می شود. نتایج آن در مقایسه با سایر روشها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. برای این منظور ممکن است یک یا چند شمع آزمایشی اجرا شده و بارگذاری روی آنها انجام می شود. در صورت امکان می توان محل شمعهای آزمایشی را طوری انتخاب کرد که به عنوان شمع اصلی بکار برده شوند. تعداد شمعهای آزمایشی، نوع شمعها، روش اجرا، و شرایط بارگذاری لازم است تحت سرپرستی مهندس ژئوتکنیک مسئول اجرای طرح انجام پذیرد. برای این منظور توجه به نکات ذیل ضروری است:

- قبل از انجام آزمایش باید مطالعات ژئوتکنیک در ساختگاه به طور کامل انجام شده باشد.
- نوع شمع و تجهیزات و روش اجرا همانند شرایط اجرای شمعهای اصلی باشد.
- مراحل اجرای شمع باید با نظارت و مستند سازی کامل انجام پذیرد.
- شمع ها حداقل باید تا ۲ برابر بار سرویس و ترجیحا تا مرحله گسیختگی کامل بارگذاری شوند.
- در صورت امکان از نصب میله های شاخص و یا کرنش سنج در شمع استفاده شود. نتایج منجر به تفکیک مقاومت های نوک و اصطکاکی خواهد شد.

آزمایش بارگذاری در طول اجرای شمع و پس از اجرا

معمولا آزمایشهای بارگذاری روی تعدادی شمع در مراحل مقدماتی اجرای شمع انجام می شود. هدف از انجام این آزمایشها حصول اطمینان از باربری ایمن شمع ها و همچنین کنترل عملیات اجرایی است. انتخاب شمع های آزمایشی توسط مهندس مسئول ژئوتکنیک طرح و بر اساس مشاهدات رفتاری شمع در حین اجرا انجام میپذیرد.

آزمایشهای کنترلی پس از اتمام اجرا معمولا به منظور کنترل کیفیت و بازرسی و اطمینان از صحت اجرا به ازای هر ۲۵۰ الی ۳۰۰ شمع یک آزمایش انجام میشود.

توصیه میشود یک شمع از هر گروه در مواردی که نکات خاصی در حین اجرای شمع مثلا تفاوت قابل توجه در لایه بندی خاک مشاهده شده آزمایش شود.

توصیه های فوق تنها در شرایطی است که فقط از آزمایش استاتیکی شمع استفاده شود. در شرایطی که از آزمایشهای دینامیکی در مراحل مختلف طرح و اجرا استفاده شود، میتوان تعداد آزمایشهای بارگذاری را کاهش داد.

برنامه ریزی و تجهیزات انجام آزمایش

آزمایش بارگذاری استاتیکی باید مطابق استاندارد ASTM-D-۱۱۴۳ انجام میشود. فواصل و دقتهای توصیه شده در استاندارد به عنوان حداقل های لازم تلقی شوند و چنانچه مقادیر بکار گرفته شده کمتر از مقادیر استاندارد باشند مسلما نتایج قابل قبول نخواهند بود. به عنوان مثال، فواصل توصیه شده بین تیرهای مرجع برای اندازه گیری نشست و تکیه گاههای تیر اصلی و خود شمع آزمایشی، حداقل های لازم برای انجام آزمایش بوده و در صورت امکان بهتر است فواصل بیشتری اختیار شوند.

بارگذاری معمولا توسط جک هیدرولیکی انجام می پذیرد. گیج فشار این جک اغلب برای اندازه گیری نیروی وارد بر شمع در هر مرحله از بارگذاری استفاده میشود، اما تجربه نشان داده که مقدار نیروی حاصل از این گیج دارای خطایی تا حد ۲۰٪ و در جهت عدم اطمینان است. در مواردی که نیاز به دقت بالا است لازم است علاوه بر فشار سنج روغن جک، از یک نیروسنج به طور جداگانه بهره جست و گیج فشار سنج روغن را برای کنترل استفاده کرد. نیروسنج مورد استفاده باید خیلی حساس به خروج از مرکزیت نیروهای وارده و تغییرات درجه محیط نباشد.

عکس العمل لازم برای اعمال نیروی محوری را میتوان به روشهای مختلفی تأمین کرد. در این زمینه دو روش متداول وجود دارد که یکی تأمین عکس العمل توسط دو یا چند شمع کششی و روش دیگر استفاده از سربار مرده است. شکل نحوه تأمین عکس العمل را توسط سربار نشان میدهند. بسته به مقدار نیروی حداکثر مورد نیاز، نوع شمع و روش اجرا اهداف آزمایش و امکانات اجرایی در محل، نوع تأمین عکس العمل و جزئیات باید توسط مهندس ژئوتکنیک مسئول طرح تصمیم گیری شود.

نمونه ای از بازگذاری استاتیکی

روشهای اعمال نیروی محوری

هفت روش مختلف برای انجام آزمایش بارگذاری محوری ارائه کرده است. خلاصه ای از هر روش به شرح زیر است:

۱- روش بارگذاری استاندارد: بارگذاری در هشت مرحله و تا ۲ برابر بار طرح انجام می شود. در هر مرحله بار به مدت زمانیکه باید مشخص شود روی شمع باقی مانده تا افزایش بار مرحله بعد اعمال شود. زمان کل برای بارگذاری در این روش حدود ۴۸ الی ۷۲ ساعت یا بیشتر خواهد بود.

۲- بارگذاری سیکلی: شبیه به بارگذاری استاندارد است، با این تفاوت که سیکلهای باربرداری و بارگذاری مجدد نیز به آن اضافه میگردد.

۳- بارگذاری اضافه بر بارگذاری استاندارد: پس از اتمام بارگذاری استاندارد، بارگذاری تا مرحله گسیختگی نهایی و یا یک برابر حداکثر از پیش تعیین شده ادامه می یابد.

۴- بارگذاری مرحله ای در فواصل زمانی مساوی: بارگذاری طی ۱۰ مرحله مساوی تا ۲ برابر بار سرویس، هر مرحله ۶۰ دقیقه باقی مانده تا بار بعدی اعمال شود، بدون توجه به اینکه نشست چگونه است. سایر مراحل شبیه روش بارگذاری استاندارد است.

۵- بارگذاری با نرخ نشست ثابت: برای این منظور نیاز به پمپ مخصوصی است که بتواند جریان ثابت روغن را به جک برساند. سرعت معمول بین ۰/۲۵ تا ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه است. کل آزمایش در زمانی حدود ۲ الی ۳ ساعت انجام می شود.

۶- روش بارگذاری سریع: نگهداری هر مرحله بار به مدت کوتاه و با تعداد مراحل بارگذاری زیاد مبنای این روش محسوب میشود. بارگذاری تا بار نهایی و با حداکثر بار معینی ادامه می یابد. مدت زمان مورد نیاز برای آزمایش ۲ الی ۶ ساعت است.

۷- روش بارگذاری با نشست های مرحله ای ثابت: در این روش بارهای مرحله ای آنقدر باقی می ماند تا به ازای هر مرحله بار نشستهای یکسانی حاصل شود. نشست برای هر مرحله بار در حدود ۱٪ قطر نوک شمع در نظر گرفته می شود.

روشهای آزمایشهای آهسته (۱،۴،۷) بسیار وقت گیرهستند. چنانچه هدف آزمایش تعیین ظرفیت باربری شمع باشد این روشها بسیار دست و پاگیر بوده و ارزیابی حاصل از آزمایش را نیز بسیار دشوار می سازد. در آزمایشهای معمول روشهای ۵ و ۶ کفایت میکند.

توجه به این نکته ضروری است که نشست شمع ها، به ویژه گروه شمع را نمی توان از نتایج بارگذاری تعیین نمود. حتی اگر آزمایش از نوع آهسته و طولانی باشد نیز محاسبه نشست، به ویژه نشست ناشی از تحکیم از نتایج آزمایش بارگذاری صحیح نیست.

سایر آزمایشهای بارگذاری

در برخی از موارد ممکن است نیاز به آزمایشهای بارگذاری دیگری مانند آزمایش بیرون کشش یا بارگذاری جانبی باشد و در این صورت نیز باید طبق استاندارد آزمایش را انجام داد.

آزمایش بیرون کشش شبیه به آزمایش فشاری است اما تهیه نیروی عکس العمل لازم برای آن به مراتب ساده تر است.

بیان جزئیات این آزمایشها از اهداف این مجموعه خارج است. اما میتوان برای آزمایش بیرون کشش به ASTM-D-۳۶۸۹ و بارگذاری جانبی به ASTM-D-۳۹۶۶ مراجعه شود.

ارائه نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری و تفسیر نتایج

ASTM-D-۱۱۴۳ ملزوماتی را برای تهیه گزارش پس از انجام آزمایش تعیین نموده است. ارائه نتایج باید شامل منحنی بار – تغییر مکان و همچنین تغییر مکان – زمان باشد. در منحنی بار- تغییر مکان قرائت های مربوط به تغییر مکان باید در دیاگرامی عرضه شوند که محور قائم آن نشان دهنده بار و محور افقی نشان دهنده تغییر مکان بوده و دو محور در مقیاس خطی باشند.

معادله ی کاهش طول الاستیک شمع به قرار زیر است:

$$\Delta L=PL/AE$$

ΔL= کاهش طول الاستیکی محاسبه شده ی شمع

P= بار اعمال شده

L =طول شمع

A = سطح مقطع شمع

E =مدول الاستیسیته مصالح شمع

برای منحنی تغییر مکان- زمان قرائت ها باید در دیاگرامی عرضه شود که محورهای آن دارای مقیاس خطی بوده و زمان در روی محور افقی و تغییر مکان در روی محور قائم باشند.

معیارهایی توسط صاحب نظران برای تفسیر نتایج آزمایش بارگذاری توصیه شده اند که میتوانند به دو گروه اصلی تقسیم شوند:

الف: معیارهایی که بر اساس پذیرش نتایج آزمایش بارگذاری شمع بر مبنای معیار جابجایی می باشند. در این معیارها توجهی به بار شکست یا گسیختگی مربوط به شمع نمیشود. در اکثر موارد، وقتی باربری یک شمع مورد قبول قرار میگیرد که نشست نظیر سر شمع در محدوده معین قرار گرفته و مستقل از نوع و طول شمع تعیین می گردد. این روشها ظرفیت شمع کوتاه را دست بالا و ظرفیت شمع بلند را دست پایین برآورد می نمایند.

ب: معیارهایی که بر مبنای بار شکست یا گسیختگی شمع آزمایش شده می باشند که توسط آنها بار مجاز ممکن است با اعمال ضریب اطمینان محاسبه گردد. این روشها بیشتر مورد استفاده و بکار گرفته می شوند، زیرا مبنای درک صحیح از ظرفیت و رفتار واقعی شمع استوار می باشند.

روشهای مختلفی در منابع و مراجع فنی راجع به معیار انهدام و گسیختگی شمع پیشنهاد شده اند که توسط فلنیوس در سالهای ۱۹۵۷-۱۹۸۰ مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند.

معیارهای ارائه شده تغییراتی حدود ۳۰٪ از پایین ترین تا بالاترین حد را شامل شده و طراح شمع برای ارزیابی نتایج باید بر اساس تجارب فنی خود معیار مورد نظر را انتخاب کند. روشهای مطرح شده به شرح ذیل مورد بررسی و بازبینی قرار میگیرند.

چه عددی برای ظرفیت باربری از آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع باید انتخاب کرد؟

برای پروژه های دارای پی شمعی معمولا برای اطمینان از ظرفیت باربری و کنترل اینکه چقدر رفتار شمع با فرضیات طراحی مطابقت دارد، آزمایش بارگذاری ضرورت دارد. به دفعات این کار با استفاده از آزمایش بارگذاری استاتیکی بدست می آید و به طور طبیعی تعیین ظرفیت باربری از مهمترین اولویت این آزمایش است. ظرفیت باربری به عنوان باری تعریف می شود که در آن جابجایی سریع تحت حفظ یا افزایش اندکی از بار اعمالی اتفاق می افتد. به بیان دیگر شمع فرو می رود. این تعریف کافی نیست زیرا : جابجایی های بزرگ برای شمع تا رسیدن به مد فرو روندگی و تغییر مکان زیاد، مورد نیاز است که اغلب بیش از ظرفیت باربری خاک – شمع است. در بیشتر حالات بار نهایی مشخص برای فرو رفتن از آزمایش بارگذاری بدست نمی آید و بنابراین ظرفیت شمع یا بار نهایی می بایستی با تعریفهایی که بر اساس داده های ثبت شده از نمودار بار – جابجایی است تعیین می شود.

تعریف قدیمی ظرفیت باربری: باری است که در آن جابجایی نوک شمع بیشتر از مقداری معینی که معمولا ۱۰ ٪ قطر برای شمع با فاصله های داده شده ای که اغلب ۱.۵ اینچ است تعریف می شود. چنین تعریف هایی کاهش طول شمع را که برای شمع های بلند ضروری می باشد را در نظر نمیگیرد، در حالی که این کوتاه شدگی برای شمع های کوتاه قابل صرف نظر کردن است.

محدودیت جابجایی فقط توسط روسازه ای که شمع آن را ساپورت میکند اجازه داده میشود و مربوط به ظرفیت باربری شمع در آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع نمی باشد. به همین دلیل ۱۰٪ یا هر نسبت دیگر از قطر شمع از هر دو نقطه نظر رفتار خاک – شمع و سازه بی معنی است. به طور مشابه معیار حداکثر جابجایی ۱/۵ اینچ فقط میتواند برای سازه ای درست باشد، ولی هیچ ربطی به رفتار خاک – شمع ندارد. سوال بایستی اینگونه باشد " آیا می بایستی تعریف ظرفیت باربری سازه ای که شمع آنرا ساپورت می کند مد نظر قرار دهید ؟ "

حال محدودیت تعریف برای ظرفیت باربری در حالت ژئوتکنیکی به صورت جملات بیان میکنیم. بعضی اوقات ظرفیت باربری شمع به عنوان باری که در آن محل تلاقی ۲ خط راست است تعریف میشود که بطور تقریبی محل تلاقی قسمت اولیه شبه الاستیکی منحنی و قسمت نهایی شبه پلاستیکی نمودار است. این تعریف در تفسیر مقادیر ظرفیت باربری که بطور خیلی وابسته به محل تلاقی مقیاس نمودار است خود را نشان می دهد. همچنین تغییر مقیاس ها و مقدار ظرفیت مشاهده شده میتواند تغییر کند.

بدون وجود یک مقاله برای این تعریف، تفسیر ظرفیت باربری برای حالتهایی که فرو رفتن مشخص در نمودار قابل رؤیت نمی باشد بی معنی خواهد شد. برای یک تعریف بهتر، تعریف ظرفیت باربری شمع می بایستی مبنای ریاضی داشته و مقادیر معتبری که مستقل از روابط مقیاسی و توانایی چشمی برای تفسیر باشد مورد استفاده قرار گیرد.

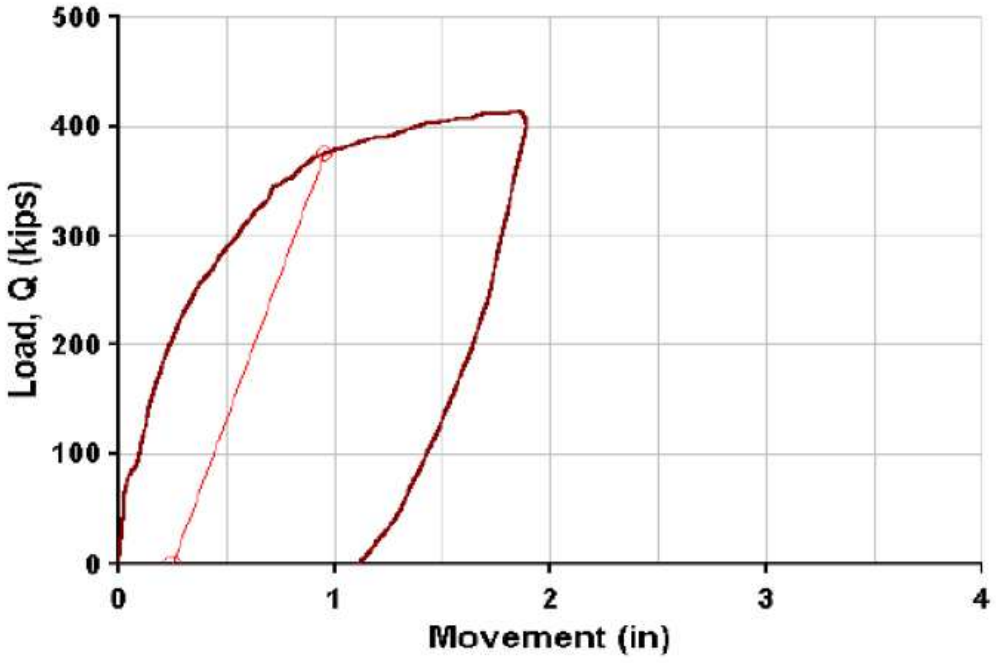
این حالت تفسیر در آزمایش بارگذاری استاتیکی بیش از تحلیل داده های بدست آمده نمود دارد. به عنوان یک ضابطه ی حداقل، آزمایش بارگذاری برای بارگذاری محوری (فشاری و کششی) می بایستی بر اساس استاندارد ASTM (به ترتیب D-۱۱۴۳ برای فشاری و D-۳۶۸۹ برای کششی) انجام گیرد. بخاطر داشته باشید که راهنمایی و ضوابط ASTM برای آزمایش به روال معمول می باشد. آزمایش هایی که در آن از شمع های ابزار گذاری شده استفاده میشود نیازمند قوانین خاص اجرایی است .

چهار تا از روشهای تعیین ظرفیت باربری از آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع یعنی حد برون محوری داویسون، حد تسلیم دبیر، بار نهایی هن سن و برون یابی چین –کوندر دارای ویژگیهای خاص خود هستند. همچنین ۵ روش بوسیله لوسیانو دکورت در برزیل ارائه شده است (دکورت ۱۹۹۹). روشهای برون یابی از جمله برون یابی دکورت در زیر ارائه شده است.

روشهای تفسیر نمودار بارگذاری استاتیکی شمع

حد برون یابی داویسون (Davisson)

روش حد برون محوری احتمالا معروف ترین و گسترده ترین روش مورد استفاده در آمریکای شمالی است. این روش بوسیله داویسون تهیه شد و در آن ظرفیت باربری، باری است که بر حرکتی که بیش از حد فشردگی الاستیک شمع (به عنوان ستون ایستایی آزاد در نظر گرفته می شود) با مقدار ۰/۱۵ اینچ (۴ میلیمتر) بعلاوه ضریبی مساوی قطر شمع تقسیم بر عدد ۱۲۰ بدست می آید، می باشد. شکل مثالی از دیاگرام بار – جابجایی از آزمایش بارگذاری استاتیکی روی شمع بتنی پیش تنیده ی ۱۲ اینچی را نشان میدهد. (روش آزمایش این شمع، روش نفوذ در نرخ ثابت است که در آن منحنی بار – جابجایی نقاط زیادی در آن ترسیم شده است) بار حدی داویسون که به منحنی اضافه شده در منحنی شکل (۳-۱۰)نشان داده شده است. برای شمع نمونه با قطر ۱۲ اینچ مقدار برون محوری ۰/۲۵ اینچ (۶ میلیمتر) و بار حدی (kips)۳۷۵ است.

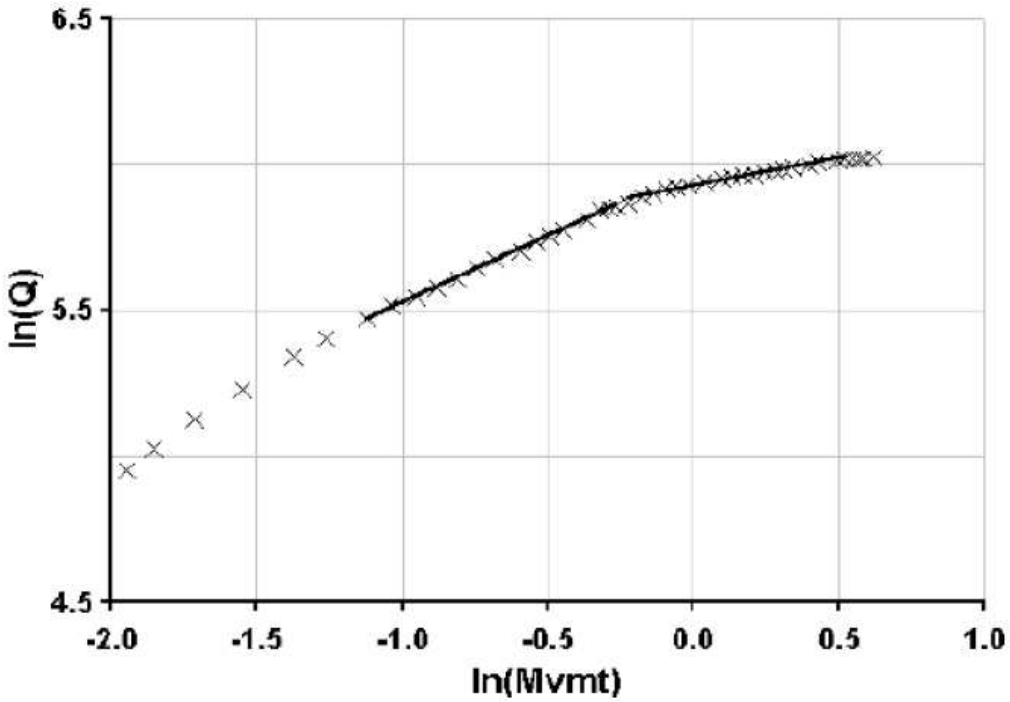


روش حدی داویسون

توجه داشته باشید که بار حدی برون محوری ضرورتا بار محوری نیست. این روش بر اساس این فرضیه که ظرفیت باربری در جابجایی اندک نوک شمع به حداکثر مقدار می رسد و این روش تلاشی است برای تخمینی که جابجایی سختی شمع (طول و قطر) جبران شود. این روش با ارتباط دادن یک شمع تکی معیار با تعداد زیادی شمع تعیین ظرفیت باربری شده برای داده های اصلی آزمایش بارگذاری شمع اعمال شده است. این روش در ابتدا برای نتایج آزمایش از آزمایش های شمعهای کوبیدنی مطابق با روشهای سریع مد نظر قرار گرفته و این روش همراه با افزایش محبوبیت تحلیل های معادلات موج شمعهای کوبیدنی و آزمایش دینامیکی استفاده گسترده ای پیدا کرده است.

بار تسلیم دبیر (DeBeer)

اگر هنگام تحلیل داده ها، تشخیص محل نمودار مشکل بود، بهترین تدبیر ترسیم داده ها در مقیاس لگاریتمی است که خیلی بهتر از مقیاس خطی است.سپس جمع و جور کردن داده های پخش شده بر حسب مقدار است که تمام داده ها بصورت دو خط در می آیند. (تعیین شیب و محل قرار گیری خط و استفاده از این مقادیر برای بعضی واقعیت های ریاضی بندرت سفارش می شود. خطی بودن تأثیر زیادی بر روی پوشیده شدن جزئیات دارد تا آشکار شدن آنها). دبیر (۱۹۶۸) همانطوری که در شکل نشان داده شده است از خطی لگاریتمی با ترسیم داده های بار – جابجایی در دیاگرام دو لگاریتمی استفاده نمود.



نمودار دو لگاریتمی نیرو – تغییر مکان به روش دبیر