به نام خدا

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده عمران

بررسی رفتار پی‌های گسترده شمعی با شمع‌های متفاوت

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی

طاها رستم‌زاده لسبومحله

اساتید راهنما

دکتر محمد علی روشن ضمیر

دکتر محمود وفاییان

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد عمران- گرایش خاک و پی

آقای طاها رستم زاده لسبومحله

تحت عنوان

بررسی رفتار پی های گسترده شمعی با شمع های متفاوت

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۹ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر محمدعلی روشن‌ضمیر
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر محمود وفاییان
۳- استاد داور	دکتر حمید هاشم الحسینی
۴- استاد داور	دکتر امیر مهدی حلبیان
سرپرست تحصیلات تکمیلی	دکتر کبیری سامانی

تشکر و قدردانی

منّت خدای را عَزَّوَجَلَ که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت. هر نفسی که فرو می‌رود مُمِدِّ حیات است و چون برآید مُفَرِّح ذات. پس در هر نفسی دو نعمت موجود است، و بر هر نعمتی شکری واجب.

از دست و زبان که برآید کز عهده شکرش به درآید؟

بر خود واجب می‌دانم، از پدر و مادر عزیزم که در تمامی مراحل زندگی همواره از خالصانه‌ترین محبت‌ها، دلسوزانه‌ترین راهنمایی‌ها، شورانگیزترین تشویق‌ها و پشتیبانی‌های آن‌ها برخوردار بوده‌ام از صمیم قلب تشکر و قدردانی کنم.

از جناب آقای دکتر محمدعلی روشن‌ضمیر و جناب آقای دکتر محمود وفاییان که در طی انجام این تحقیق از راهنمایی‌های ارزنده‌شان بهره‌ها برده‌ام و درس‌های فراوانی از ایشان آموخته‌ام کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از جناب آقای دکتر حمید هاشم‌الحسینی و آقای دکتر امیرمهدی حلبیان که قبول زحمت فرمودند و داوری این پایان‌نامه را به عهده گرفتند صمیمانه سپاسگذارم.

از کلیه اساتید گروه مکانیک خاک و پی که افتخار شاگردی آن‌ها را داشته و از محضر ایشان بسیار آموخته‌ام کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از تمام دوستانم بخصوص آقایان یوسفیان ، بیات، جفرسته، زعیم، کوهساریان و صالحی تشکر می‌نمایم.

طاها رستم‌زاده لسبومحله

اسفند ۱۳۹۰

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ دیباچه ۲

۱-۲ اهداف و تشریح مساله ۳

۱-۳ کلیات پایان نامه ۳

فصل دوم: پی‌های گسترده شمعی و پیشینه علمی

۲-۱ مقدمه ۵

۲-۲ مروری بر تحقیقات گذشته ۵

۲-۳ ملاحظات طراحی برای پی‌های گسترده شمعی ۲۴

۲-۳-۱ توصیه آیین‌نامه اروپا ۲۴

۲-۳-۲ روندهای طراحی کلی برای پی‌های گسترده شمعی ۲۴

۲-۳-۳ روند طراحی ۲۷

۲-۳-۴ شرایط مطلوب و نامطلوب برای اجرای پی‌های گسترده شمعی ۳۰

۲-۴ مطالعات موردی ۳۱

۲-۴-۱ ساختمان Messe-Torhaus و نتایج ابزارگذاری ۳۱

۲-۵ ساختمان Messeturm و نتایج ابزارگذاری ۳۵

۲-۶ ساختمان Westend 1(DG-Bank) و نتایج ابزارگذاری ۴۲

۲-۷ جمع‌بندی ۴۵

فصل سوم: معرفی نرم‌افزار و فرآیند مدل‌سازی

۳-۱ مقدمه ۴۷

۳-۲ روش های عددی ۴۷

۳-۳ انتخاب نرم افزار ۴۸

۳-۴ الگوریتم حل مسائل در نرم افزار ۴۸

۳-۴-۱ الگوریتم حل ضمنی(Implicit) ۵۰

۳-۵ نمونه روش‌های تحلیل محیط خاک موجود در نرم‌افزار ABAQUS ۵۱

۳-۶ پارامترهای رفتاری مصالح ۵۲

۳-۶-۱ مدل رفتاری الاستیک ۵۲

۳-۶-۲ مدل رفتاری پلاستیک ۵۲

۳-۷ مدل سطح تماس ۵۳

۳-۸ خلاصه ای از نحوه و روند ساخت مدل در ABAQUS ۵۴

۳-۹ صحت‌سنجی مدل سه‌بعدی ۵۵
۳-۹-۱ صحت سنجی مدلی الاستیک تحت بار قائم و جانبی در محیط نرم‌افزار ۵۵
۳-۹-۲ مدل المان محدود پی گسترده شمعی ساختمان Torhaus ۵۸
۳-۱۰ معرفی یک نمونه سیستم پی گسترده شمعی ۶۱
۳-۱۱ انتخاب سیستم پی گسترده شمعی ۶۲
۳-۱۲ تعیین حدود جانبی محیط خاک ۶۳
۳-۱۳ تعیین عمق خاک ۶۵
۳-۱۴ بررسی موضوع جایگزینی شمع با مقطع دایره‌ای با شمع با مقطع مربعی در مدل پی گسترده شمعی ۶۷
۳-۱۵ جمع‌بندی ۷۲
فصل چهارم: مطالعه پارامتریک پی گسترده شمعی
۴-۱ مقدمه ۷۳
۴-۲ توضیح اجمالی خصوصیات سیستم و مدل ۷۴
۴-۳ بررسی سیستم پی گسترده شمعی با طول شمع‌های یکسان ۷۶
۴-۳-۱ بررسی رفتار جانبی پی گسترده شمعی برای سطوح مختلف بار قائم ۷۶
۴-۳-۲ تاثیر طول گروه شمع بر رفتار پی گسترده شمعی ۷۸
۴-۳-۳ تاثیر طول گروه شمع بر رفتار پی گسترده شمعی برای فواصل متفاوت بین شمع‌ها ۸۰
۴-۳-۴ تاثیر نسبت سختی شمع به خاک($k_p=E_p/E_s$) ۸۲
۴-۳-۵ تاثیر قطر شمع‌ها بر رفتار قائم و جانبی ۸۳
۴-۳-۶ تاثیر تعداد شمع‌ها بر رفتار پی گسترده شمعی ۸۷
۴-۴ بررسی سیستم پی گسترده شمعی با طول شمع‌های غیریکنواخت ۸۹
۴-۴-۱ بررسی تاثیر پارامتر η بر رفتار پی‌های گسترده شمعی ۹۰
۴-۴-۲ بررسی رفتار جانبی پی گسترده شمعی با ηها و سطوح بار قائم مختلف ۹۵
۴-۴-۳ بررسی رفتار پی گسترده شمعی برای ηهای گوناگون در قطرهای مختلف شمع‌ها ۹۷
۴-۴-۱ بررسی رفتار پی گسترده شمعی برای ηهای گوناگون در فواصل مختلف بین شمع‌ها ۱۰۰
۴-۵ تاثیر تغییر مدول الاستیسیته خاک بر رفتار سیستم پی گسترده شمعی ۱۰۳
فصل پنجم: نتیجه‌گیری
۵-۱ مقدمه ۱۰۸
۵-۲ نتایج ۱۰۹
۵-۲-۱ پی گسترده شمعی برای گروه شمع با طول یکنواخت ۱۰۹
۵-۲-۲ پی گسترده شمعی برای گروه شمع با طول غیریکنواخت ۱۱۰
۵-۳ پیشنهادات ۱۱۱
مراجع ۱۱۲

چکیده

پی‌های گسترده شمعی سیستم‌های باربری می‌باشند که انتقال بار توسط گروه شمع و پی گسترده به خاک زیرین منتقل می‌شود و گروه‌های شمعی می‌باشند که کلاهک در آن‌ها نقش باربری دارد. موارد استفاده این سیستم‌ها در سازه‌های سنگین، پایه پل‌ها و پی ماشین آلات سنگین می‌باشد. به طور کلی گروه‌های شمع به دو دلیل به پی گسترده اضافه می‌شود: ظرفیت باربری پی گسترده برای تحمل بارهای وارده کمتر از میزان لازم باشد که با افزودن گروه شمع ظرفیت باربری مناسب را ایجاد می‌کنیم و در حالت دیگر ظرفیت باربری پی گسترده کافی می‌باشد ولی نشست‌های کلی و تفاضلی بیش از حد مجاز می‌باشد. سیستم پی گسترده شمعی این تحقیق براساس کنترل نشست‌ها می‌باشد و تغییرات ابعاد و آرایش سیستم به منظور کاهش نشست‌ها و خیز جانبی سیستم انجام گرفته‌اند. روش تحلیل در این تحقیق، روش اجزا محدود می‌باشد. پی گسترده شمعی به صورت الاستیک خطی و خاک به صورت الاستوپلاستیک با مدل رفتاری موهر-کولمب درنظر گرفته شده‌اند. بررسی‌ها بر روی پارامترهایی مانند فاصله بین شمع‌ها، طول شمع‌ها، قطر شمع‌ها، مقادیر بارگذاری قائم مختلف، مقادیر بارگذاری جانبی مختلف، تعداد شمع‌ها و نسبت مدول الاستیسیته شمع‌ها به خاک برای دو حالت گروه شمع با طول‌های یکسان و گروه شمع با طول‌های متفاوت(مجموع طول شمع‌ها ثابت)انجام گرفته است. افزایش سطح بارگذاری قائم، افزایش فاصله میان شمع‌ها، افزایش قطر شمع‌ها، افزایش طول شمع‌ها تا طول حدی بارگذاری جانبی، افزایش نسبت سختی شمع به خاک از جمله پارامترهای تاثیرگذار بر کاهش تغییرشکل جانبی می‌باشند. برای گروه شمع افزایش طول شمع‌های میانی و کاهش طول شمع‌های بیرونی تاثیر مثبتی بر تغییرشکل‌های قائم سیستم می‌گذارد ولی در صورتی که طول شمع‌های یکسان کمتر از طول حدی بارگذاری جانبی باشد کاهش طول شمع‌های میانی و افزایش طول شمع‌های بیرونی سبب کاهش تغییرشکل جانبی مرکز پی گسترده می‌شود، در غیر این صورت این تغییر در طول شمع‌ها نسبت به هم، بخصوص در ضریب اطمینان‌های کم در حدود ۲ تا ۳، در تغییرشکل جانبی سیستم بی‌تاثیر می‌باشد.

کلمات کلیدی: پی گسترده شمعی، روش اجزا محدود، تحلیل پارامتریک، مدل موهر-کولمب.

فصل اول
مقدمه

۱-۱ دیباچه

پی گسترده معمولا اولین انتخاب مهندسین برای انتقال بار سازه‌ها به سطح زیرین می‌باشد. بـه دو دلیـل مـی-توان از گروه شمع در زیر پی گسترده استفاده کرد، یکی کمبود ظرفیت باربری پی گسترده به خصوص برای سازه-های بسیار سنگینی نظیر ساختمان‌های بلند و برج‌ها و پایه‌هـای سـنگین پـل‌هـا و... بـویژه در زمـین‌هـای رسـی نـرم و دیگری نشست کلی و تفاضلی بیش از حد مجاز پی گسترده. در این صورت به ایـن سیـستم‌هـا پـی گـسترده شـمعی گفته می‌شود. در این سیستم‌ها بار سازه فوقانی درصدی توسط پی گسترده به خاک منتقل می‌شود و درصدی توسط توسط گروه شمع به خاک و لایه‌های زیرین خاک منتقل می‌شود و در واقع سه المـان پـی گـسترده، گـروه شـمع و خاک به صورت ترکیبی بار سازه فوقانی را تحمل می‌کنند. به طور کلی استفاده از پی‌هـای گـسترده شـمعی مزایـای زیر را دارد [۱]:

- در مقایسه با پی‌های شمعی، کاهش قابل توجه‌ای در تعداد و طول شمع‌ها رخ می‌دهد.
- بهبود کارآیی پی‌های گسترده با کاهش نشـست حـداکثر و نشـست تفاضـلی آن صـورت می‌گیرد.
- به عنوان راه حلی اقتصادی می‌توان با استفاده از آرایش بهینه شمع‌ها در زیر پـی گـسترده، تنش‌ها و لنگر خمشی درون پی گسترده را کاهش داد.

- بهبود ظرفیت باربری پی گسترده با مشارکت گروه شمع در باربری
- کاهش بالاآمدگی خاک درون و بیرون ناحیه گودبرداری به دلیل جلوگیری شمع‌های نصب‌شده پیش از گودبرداری.
- افزایش مقاومت پی‌های گسترده تحت بارگذاری خارج از مرکز با تمرکز شمع‌ها در ناحیه تحت بارگذاری خارج از مرکز.

۱-۲ اهداف و تشریح مساله

هدف این تحقیق بررسی پی‌های گسترده شمعی تحت بارگذاری استاتیکی می‌باشد که برای حل مسائل از روش اجزا محدود استفاده شده است و برنامه کامپیوتری ABAQUS 6.8 برای تحلیل مسائل بکارگرفته شده است. تحلیل‌ها به صورت سه‌بعدی انجام گرفته است. در ابتدا برای صحت روش بکارگرفته شده و مدل‌سازی موردنظر دو نمونه صحت سنجی انجام گرفته است. در ادامه به تعیین حدود مرزهای مدل مشابه با مدل‌های مورداستفاده در تحلیل پارامتریک پرداخته می‌شود. در مطالعات پارامتریک به بررسی پارامترهایی مانند فاصله بین شمع‌ها، طول شمع‌ها، قطر شمع‌ها، سطوح بارگذاری قائم مختلف، سطوح بارگذاری جانبی مختلف، تعداد شمع‌ها و نسبت مدول الاستیسیته شمع‌ها به خاک برای دو حالت گروه شمع با طول‌های یکسان و گروه شمع با طول‌های متفاوت(مجموع طول شمع‌ها ثابت) و تعیین آرایش قائم وافقی برای رفتار بهینه سیستم پرداخته شده است.

۱-۳ کلیات پایان نامه

با درنظرگرفتن موارد مطرح شده، محتوای فصول بعدی رساله حاضر بدین صورت می‌باشد:

در فصل دوم نگاهی بر تحقیقات انجام شده بر روی پی‌های گسترده شمعی شامل روش‌های تحلیل و طراحی این سیستم‌ها و مطالعات پارامتریک تحت بارهای استاتیکی قائم و جانبی انداخته شده است. در ادامه این فصل چند مورد از کاربردهای این سیستم‌ها در ساختمان‌ها و نتایج ابزارگذاری آنها آورده شده است.

در فصل سوم به توضیح کوتاهی در رابطه با روش اجزا محدود پرداخته می‌شود و در ادامه به نحوه مدل-کردن پی گسترده شمعی و خاک اطراف آن در برنامه رایانه‌ای پرداخته شده است. آنگاه مدل رفتاری انتخابی برای خاک یعنی موهر-کولمب و نحوه مدل‌کردن سطح تماس بین پی گسترده شمعی و خاک اطراف آن توضیح داده

شده است. سپس دو نمونه صحت‌سنجی انجام گرفته است. در نهایت با بررسی نمونه‌ای از پی گسترده شمعی که در بخش مطالعات پارامتریک استفاده شده است به تعیین مرزهای مدل پرداخته می‌شود.

در فصل چهارم مطالعات پارامتریک برای بررسی برخی عوامل تاثیرگذار بر رفتار پی گسترده شمعی برای دو حالت گروه شمع با طول یکنواخت و گروه شمع با طول غیریکنواخت انجام می‌شود.

در فصل پنجم به صورت خلاصه نتایج حاصله در این پایان‌نامه و همچنین پیشنهاداتی برای ادامه کار آورده شده است.

فصل دوم
پی های گسترده شمعی و پیشینه علمی

۲-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا مطالعه ای بر پیشینه پی‌های گسترده شمعی انجام گرفته است و سیر تاریخی مطالعات تا به امروز بیان گشته است. در پایان فصل چند مطالعه موردی برای پی های گسترده شمعی ارائه شده است تا آشنایی بیشتری با این سیستم ها حصول گردد.

۲-۲ مروری بر تحقیقات گذشته

تاثیر افزودن گروه شمع به پی گسترده از سالها قبل شناخته شده و محققین بسیاری از جمله ویتیکر[1] (۱۹۶۱) و کوک[2] (۱۹۸۶) بدان اشاره نموده اند[۲]و[۳]. بورلند و همکاران[3] در سال ۱۹۷۷، استفاده از شمع ها را به عنوان

[1] Whitaker
[2] Cooke
[3] Burland et al.

کاهش دهنده های نشست[1] پیشنهاد کردند[۴]. پلوس و دیویس[2](۱۹۸۰) روشی برای تعیین تعداد شمع های مورد نیاز در زیر یک پی گسترده متناظر با مقدار نشست مشخصی را ارائه کردند[۵]. پادفیلد و شروک[3](۱۹۸۳) به بحث در مورد استفاده از گروه شمع در قسمت مرکزی پی گسترده پرداختند تا بدین وسیله نشست های تفاضلی را کاهش دهند[۶]. استفاده از گروه شمع در قسمت مرکزی پی گسترده انعطاف پذیر در سال ۱۹۹۲ توسط فلمینگ و همکاران[4] پیشنهاد شد[۷]. کلانسی[5](۱۹۹۳) روشی برای تحلیل پی‌های گسترده شمعی با نام HYPR با استفاده از روش ترکیبی[6] معرفی شده توسط چو[7] را ارائه نمود[۸].

در سال ۱۹۹۳ ، کلانسی و راندولف[8] به معرفی روشی تقریبی ، سریع و کم هزینه برای بدست آوردن پاسخ‌های اولیه سیستم پی گسترده شمعی پرداخته‌اند و آنرا با تحلیل دقیق‌تری که از روش ترکیبی با المان محدود استفاده می کند مقایسه کرده‌اند و به نتایج نسبتا نزدیکی رسیده‌اند[۹].

روش تقریبی ارائه شده بدین صورت می‌باشد که در ابتدا سختی پی گسترده(K_r) و گروه شمع(K_p) هرکدام جداگانه تعیین می‌شود و سپس می‌توان با قرار دادن α_{rp}=۰/۸ و با استفاده از رابطه‌های (۲-۱) ، (۲-۲) و (۲-۳)، به ترتیب سختی کل سیستم پی گسترده شمعی (K_{pr}) و گروه شمع (P_p) و سهم بار پی گسترده (P_r) را تعیین نمود و نشست متوسط کل سیستم را بدست آورد.

$$k_{pr} = \frac{(p_p + p_r)}{w_{pr}} = \frac{[k_p + k_r(1-2\alpha_{rp})]}{[1-(k_r/k_p)\alpha_{rp}^2]} \qquad (۲-۱)$$

$$p_p = \frac{[1-k_r(\alpha_{rp}/k_p)]w_{pr}}{(1/k_p)-k_r(\alpha_{rp}/k_p)^2} \qquad (۲-۲)$$

$$p_r = \frac{[(k_r/k_p)-k_r(\alpha_{rp}/k_p)]w_{pr}}{(1/k_p)-k_r(\alpha_{rp}/k_p)^2} \qquad (۲-۳)$$

α_{pr} : ضریب اندرکنش گروه شمع بر پی گسترده

w_{pr} : نشست متوسط پی گسترده شمعی

[1] settlement reducing piles
[2] Poulos & Davis
[3] Padfield & Sharrock
[4] Fleming et al.
[5] Clancy
[6] Hybrid
[7] Chow
[8] Clancy & Randolph

توضیح بیشتر درباره این روش ترکیبی توسط گریفیتس و همکاران[1] ارائه شده است[۱۰]. مدل خاک مورد استفاده در این تحقیق الاستیک خطی می‌باشد.

در سال ۱۹۹۴، لی و ژانگ[2] به بررسی مسئله توزیع بار بین شمع‌ها در یک پی گسترده شمعی با استفاده از حل المان محدود سه بعدی برای حالت بارگذاری قائم استاتیکی پرداختند[۱۱]. در این تحلیل پارامتریک از المان‌های brick برای مدل کردن خاک ، پی گسترده و شمع‌ها و حتی سازه فوقانی استفاده شده است.در این تحلیل مدل‌های مختلفی برای خاک شامل لایه یکنواخت عمیق ، لایه بندی شده و مدل گیبسون(تغییر خطی مدول الاستیسیته با عمق) بکار برده شده است. مطالعه پارامتریک بر روی سیستم شکل ۲-۱ انجام گرفته است و دو پارامتر سختی پی گسترده(K_r) و سختی شمع به خاک(K_p) بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$K_r = \frac{4E_r t_r^3 B_r \left(1-\nu_s^2\right)}{3\pi E_s L_r^4} \qquad (۴-۲)$$

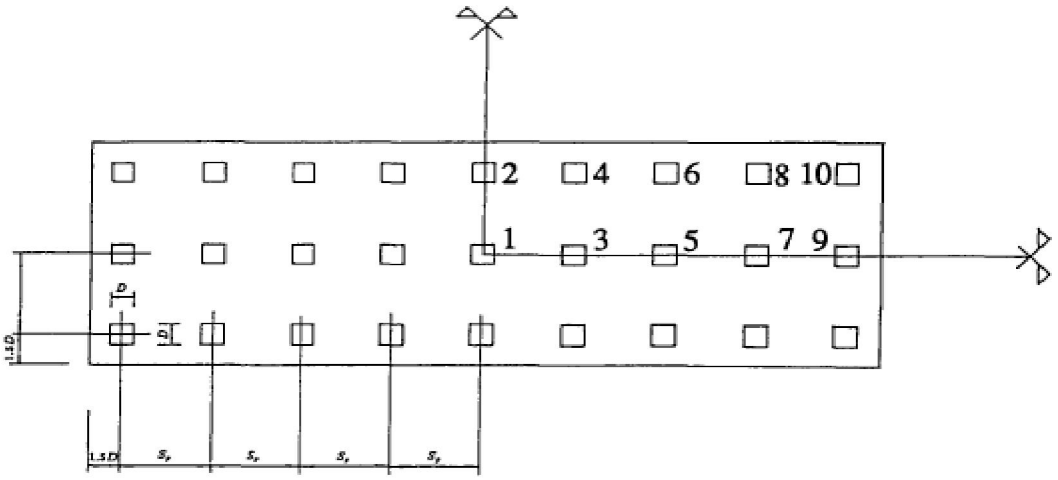
$$K_p = \frac{E_p}{E_s} \qquad (۵-۲)$$

E_r ، t_r ، B_r ، L_r بترتیب مدول الاستیسیته ، ضخامت ، عرض و طول پی گسترده و E_s ، E_p و υ_s مدول الاستیسیته خاک و شمع و نسبت پواسون خاک می‌باشند.

نتایج تحلیل‌ها و بررسی‌ها برای سیستم پی گسترده شمعی – خاک نشان می‌دهد که با افزایش سختی پی گسترده و سختی شمع نسبت به خاک ، سهم بار شمع‌های کناری و گوشه افزایش می‌یابد و همین روند با کاهش طول شمع‌ها نیز مشاهده می‌شود. با افزایش سختی خاک (مدول الاستیسیته) در عمق و یا نسبت مدول الاستیسیته خاک کف شمع‌ها به مدول الاستیسیته خاک سطحی ، توزیع بار بین شمع‌ها یکنواخت‌تر خواهد شد و در نتیجه نشست تفاضلی کاهش می‌یابد. تحقیق بر روی مدل سیستم پی گسترده شمعی – خاک – ساختمان فوقانی متصل به پی گسترده نشان می‌دهد که با افزایش تعداد طبقات بار شمع‌های کناری افزایش و بار شمع‌های میانی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش نسبت سختی پی گسترده به خاک، تاثیر تغییر تعداد طبقات بر روی توزیع بار بین شمع‌ها کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش سختی پی گسترده، تاثیر سختی سازه‌ای بر روی توزیع بار بین شمع‌ها کاهش می‌یابد.

[1] Griffiths et al.
[2] Lee & Zhuang

در سال ۱۹۹۶ ، تا و اسمال[1] به معرفی روشی برای تحلیل پی‌های گسترده شمعی در خاکهای لایه بندی شده مبادرت نمودند[۱۲]. روش معرفی شده یک روش ترکیبی می‌باشد که از المان محدود برای تحلیلی پی گسترده و از روش لایه محدود برای تحلیل خاک استفاده شده است. در این روش بدون صرف هزینه‌های یک تحلیل سه بعدی کامل ، اندرکنش بین شمع‌ها ، خاک و پی گسترده در نظر گرفته شده است. روش لایه محدود برای حل مسائلی که در آنها خاک از تعدادی لایه افقی همسانگرد یا همسانگرد صفحه ای[2] تشکیل یافته است استفاده می‌شود. برای اطلاعات بیشتر درباره نحوه کارکرد این روش می‌توان به مقاله مذکور مراجعه نمود[۱۲].



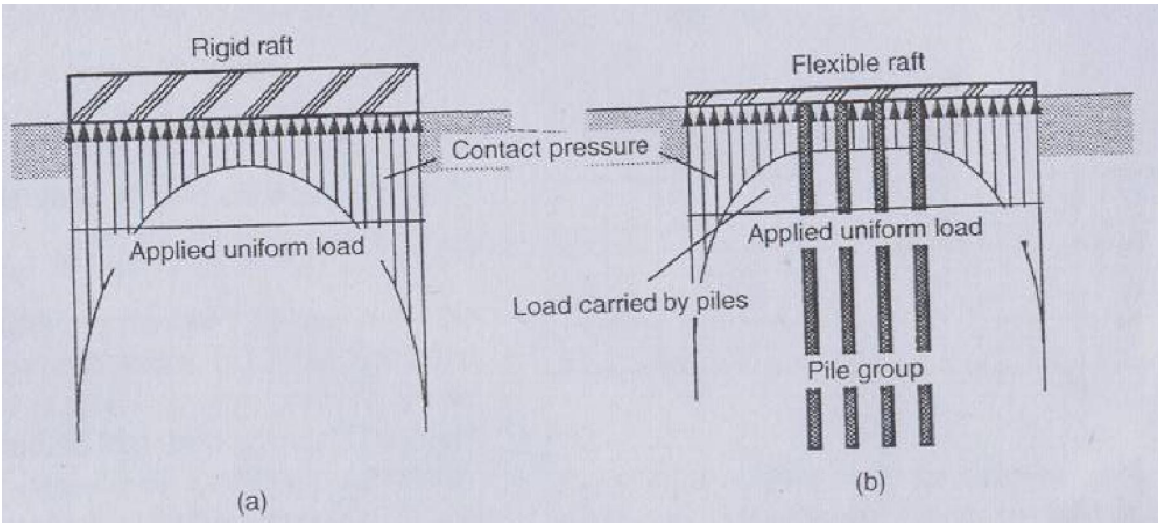
شکل ۲-۱- پلان سیستم پی گسترده شمعی[۱۱]

در سال ۱۹۹۸ ، هوریکوشی و راندولف[3] به بررسی اثر تجمع گروه شمع در قسمت مرکزی پی گسترده پرداختند[۱۳]. همانطورکه می‌دانیم نشست تفاضلی پی‌های گسترده نسبتا صلب تقریبا ناچیز است ولی صلب‌کردن یک پی گسترده هم بسیار پرهزینه می‌باشد. در این مطالعه عنوان شده است که با قرار دادن گروه شمع در قسمت مرکزی پی گسترده انعطاف‌پذیر، می‌توان توزیع تنش تماسی زیر پی گسترده انعطاف‌پذیر را به توزیع تنش تماسی زیر یک پی گسترده صلب نزدیک کرد و نشست‌های تفاضلی را کاهش داد.(شکل ۲-۲)

روش تحلیل در این تحقیق روش ترکیبی بیان شده توسط کلانسی می‌باشد و در واقع بسط روش چو[4] برای پی‌های گسترده شمعی می‌باشد که با نام اختصاصی HyPR معرفی می‌شود[۱۴]. پیشنهادات این تحقیق برای دستیابی به طرحی بهینه در زمینه نشست تفاضلی به صورت زیر می‌باشد:

[1] Ta & Small
[2] cross-isotropic
[3] Horikoshi & Randolph
[4] Chow

شمع‌ها باید در قسمت مرکزی پی گسترده با مساحتی در حدود ۱۶-۲۵ در صد مساحت پی گسترده قرار گیرند و سختی گروه شمع باید تقریبا برابر سختی پی گسترده باشد و ظرفیت باربری گروه شمع باید ۴۰ تا ۷۰ درصد کل بار طرح باشد که مقدار آن بستگی به نسبت سطح گروه شمع(مساحت پی گسترده/ مساحت گروه شمع) و نسبت پواسون خاک دارد و درجه بسیج ظرفیت باربری کل شمع‌ها (کل ظرفیت باربری گروه شمع/ بار وارده به گروه شمع) نباید بیشتر از ۰/۸ گردد. در صورتی که مقدار نسبت سطح گروه شمع بیشتر از محدوده پیشنهادی شده گردد می‌توان با افزایش سختی گروه شمع نسبت به پی گسترده(K_{pr}) مقدار نشست تفاضلی سیستم را کاهش داد.



شکل ۲-۲ - نحوه عملکرد شمع‌های کاهنده نشست (a) پی گسترده صلب (b) پی انعطاف‌پذیر با گروه شمع مرکزی[۱۳]

در سال ۲۰۰۰ ، ونگ و همکاران[1] برای کاستن از تنش‌های بالا در شمع‌های متصل به پی گسترده به بررسی سیستم پی گسترده با شمع‌های غیر متصل به آن پرداختند که در این سیستم شمع‌ها به عنوان مسلح‌کننده خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند[۱۵]. پراکوسو و کولهاوی[2] (۲۰۰۱) اثرات هندسه شمع‌ها و پی گسترده بر روی نشست‌های متوسط و تفاضلی را گزارش کردند[۱۶]. نتایج مهم این تحقیق بدین شرح می‌باشد. نسبت عرض گروه شمع به عرض پی گسترده یکی از پارامترهای بسیار تاثیرگذار بر نشست اینگونه سیستم‌ها می‌باشد. مقدار یک برای این ضریب رفتار مناسب برای نشست متوسط را بدست می‌دهد و مقدار نیم برای بهبود نشست تفاضلی پیشنهاد شده است. نسبت سطح مقطع شمع به پی گسترده که نسبت سطح مقطع تمام شمع‌ها به سطح مقطع پی گسترده می‌باشد

[1] Wong et al.
[2] Prakoso & Kulhawy

بین ۵ تا ٦ درصد برای کاهش تغییرشکل‌ها پیشنهاد شده است. هرچند کاهش این ضریب به زیر این مقدار سبب کاهش مقدار ممان خمشی در پی گسترده می‌شود.

در سال ۲۰۰۲ ، اسمال و ژانگ[1] به ارائه روشی برای تحلیل پی‌های گسترده شمعی پرداختند[۱۷]. در این روش پی گسترده به صورت یک المان shell مدل گردیده و شمع‌ها به صورت المان beam مدل گردیده‌اند و برای شمع‌ها و پی گسترده از روش المان محدود استفاده شده است در حالیکه برای تحلیل خاک از روش لایه محدود[2] استفاده شده است. در این تحقیق، تحلیل عددی بر روی یک مدل پی گسترده با ۹ شمع بوسیله این روش و با کمک برنامه کامپیوتری APRAF[3] انجام گرفته و با روش المان محدود مقایسه شده است که نتایج هر دو تحلیل بسیار نزدیک به هم می‌باشند. روش معرفی شده قادر به حل سیستم پی‌های گسترده شمعی تحت بارگذاری جانبی و قائم می‌باشد و اندرکنش بین اجزای مختلف مدل در آن درنظر گرفته شده‌اند. در ادامه تحقیق، تعدادی حل پارامتریک بر روی چند پی گسترده شمعی انجام گرفته است که نتایج کلی آن به صورت زیر می‌باشد:

برای سیستم تحت بارگذاری قائم یکنواخت، افزایش فاصله بین شمع‌ها سبب افزایش نشست کلی و نشست تفاضلی سیستم و افزایش لنگر خمشی مثبت ومنفی پی گسترده و یکنواخت شدن توزیع بار میان شمع‌ها می‌شود و کاهش فاصله میان شمع‌ها، افزایش بار شمع‌های کناری و کاهش بار شمع‌های میانی را در بردارد. افزایش سختی شمع نسبت به خاک، سبب افزایش باربری گروه شمع تحت بارگذاری قائم و جانبی گشته است. زمانیکه سیستم تحت بار جانبی قرار می‌گیرد افزایش سختی شمع به خاک، سبب کاهش تغییرشکل جانبی سیستم گشته و برای مقادیر بالای این نسبت سختی، افزایش طول شمع‌ها سبب کاهش نشست جانبی سیستم می‌گردد.

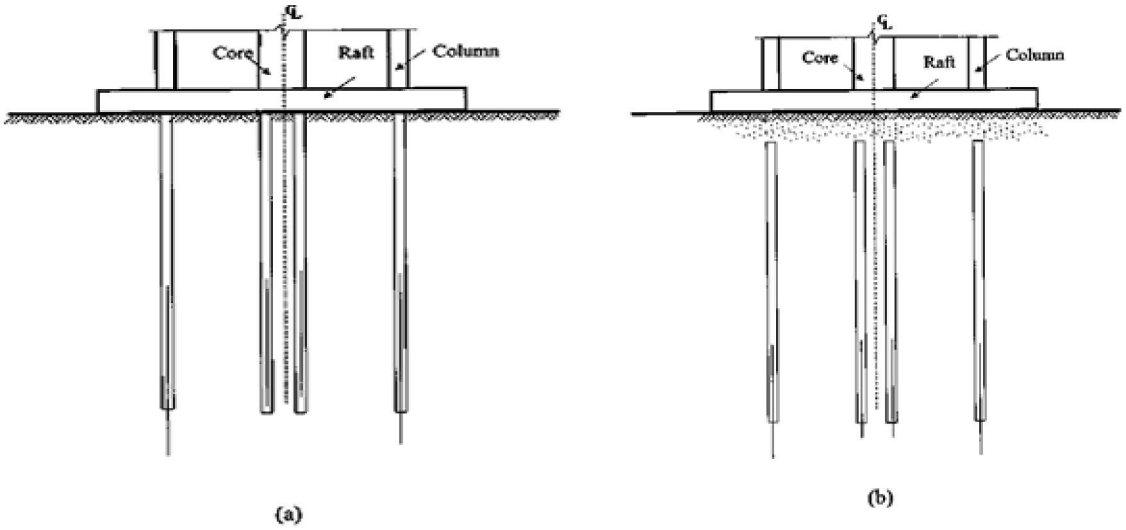
در سال ۲۰۰٤ ، کائو و همکاران[4] به بررسی آزمایشگاهی شمع‌های غیر متصل به پی گسترده پرداختند[۱۸] . استفاده از شمع‌های غیر متصل به پی گسترده برای کاهش تنش‌های موجود در شمع‌ها می باشد و در این شرایط شمع‌ها دیگر اعضای سازه ای محسوب نمی‌شوند و به عنوان اعضای مسلح‌کننده خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۲-۳). در واقع استفاده از شمع ها به عنوان تسلیح کننده های[5] خاک مفهومی نو در جهت گسترش استفاده شمع‌ها برای کاهش نشست می‌باشد. در این مقاله آزمایشات انجام شده بر روی ماسه با بارگذاری متمرکز و خطی قائم بوده است و نتایج آن بدین گونه است که استفاده از شمع‌های غیرمتصل به پی گسترده باعث کاهش نشست تفاضلی و ممان خمشی در پی گسترده مدل شده است و افزایش طول شمع ها تاثیر مثبتی بر سختی سیستم گذاشته

[1] Small & Zhang
[2] finite layer
[3] Analysis of piled raft foundations
[4] Cao et al.
[5] pile-reinforced

است. تمرکز گروه شمع در قسمت مرکزی پی گسترده مدل باعث کاهش نشست و ممان خمشی درون پی گسترده و کاهش شدید نشست تفاضلی سیستم گشته است. در این حالت ممان خمشی حداکثر در لبه گروه شمع نه در مرکز پی گسترده رخ داده است.

همانطورکه شکل ۲-٤ نشان می‌دهد تنش محوری حداکثر در سرشمع‌ها رخ نمی‌دهد بلکه در عمق کمی نسبت به پی گسترده رخ می‌دهد. دلیل این مسئله بروز اصطکاک جداری منفی در قسمت فوقانی شمع‌ها می‌باشد. نکته دیگری که از شکل ۲-٤ می‌توان دریافت افزایش بار شمع‌های کناری با افزایش طول شمع‌ها و کاهش بار شمع‌های میانی با افزایش طول شمع‌ها می‌باشد.

در سال ۲۰۰۴ ، رائول و راندولف[1] گزارشی از مطالعه‌ای پارامتریک بر روی ۲۵۹ پی گسترده شمعی مختلف را ارائه کردند که تحلیل بصورت المان محدود الاستوپلاستیک سه بعدی انجام گرفت[۱۹]. در این مطالعه موقعیت شمع‌ها ، تعداد شمع‌ها، طول شمع‌ها، و ضریب سختی پی گسترده به خاک(K_{rs}) به عنوان متغیرهای مسئله مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این مطالعه برای شرایط اعمال بارگذاری قائم غیریکنواخت به سیستم پی گسترده شمعی انجام شد.



شکل ۲-۳ – شمع‌ها برای تسلیح خاک (a) اتصال سازه‌ای (b) انفصال سازه‌ای [۱۸]

[1] Reul & Randolph