بسم الله الرحمن الرحیم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

**دانشگاه تفرش**

دانشکده مهندسی عمران

## پایان نامه کارشناسی ارشد

# بررسی اثر پی رادیه بر ظرفیت باربری و نشست سیستم پی شمع– رادیه

**استاد راهنما:**

آقای دکتر وحید مقصودی

**استاد مشاور:**

آقای دکتر ناصر عرفاتی

**دانشجو:**

رضا صباغ کرمانی

۱۳۹۰

**این پایان نامه را به دو فرشته واقعی که لحظه لحظه زندگی در کنارم بوده اند تقدیم می کنم.**

مادر و پدر

**عزیزم، همیشه دوستتان دارم.**

**خواهر مهربانم، از زحماتت ممنونم.**

**با تشکر و قدردانی بی نهایت از اساتید عزیز، جناب آقایان**

**دکتر مقصودی و دکتر عرفاتی.**

## چکیده

تعیین ظرفیت باربری، برآورد نشست، تحلیل پایداری (در صورت لزوم) و طراحی سازه ای و ملاحضات اجرایی و اقتصادی پنج معیار عمده ی طراحی پی ها هستند که معمولا در سه مورد نخست، مهندسین ژئوتکنیک نقش عمده ای را به عهده دارند. معمولا نشست مهم ترین فاکتور طراحی می باشد که برای محدود کردن آن، یک راه حل استفاده از پی به همراه شمع (شمع- رادیه) است. پی های دارای شمع در حالت سنتی با یک ضریب اطمینان بالا طوری طراحی می شوند که کل بار طراحی را شمع ها تحمل کنند. اگرچه کلاهک( سرشمع) معمولا در تماس نزدیکی با خاک است، مشارکت با گروه شمع و باربری رادیه کمتر مورد توجه بوده است. در این پایان نامه سعی شده تا توسط نرم افزار حل عددیPlaxis 3D Foundation (روش دقیق رایانه ای)، «شمع- رادیه» های مختلف مدل سازی و بررسی شوند. هدف از این تحقیق، در نظر گیری فرضیات رایج در تحلیل وطراحی هر یک از اجزای «شمع- رادیه»، یعنی گروه شمع و پی رادیه به طور مجزا و مقایسه نتایج بدست آمده با شمع- رادیه تحت عملکرد واقعی توسط نرم افزار می باشد. در کل اهداف و نتایج در قالب موارد زیر می باشند:

- بررسی اینکه آیا در نظر گرفتن سیستم شمع- رادیه به صورت گروه شمع مستقل با فرضیات رایج در حالات مختلف در جهت اطمینان یا عدم اطمینان می باشد؛

- بررسی میزان مشارکت و کمکی که پی رادیه در کاهش نشست های حداکثر و تفاضلی (ناهمگن) دارد؛

- مقایسه حالات مختلف هندسه گروه شمع در حجم ثابت شمع ها و مشخص کردن حالت بهینه از لحاظ کارآیی.

**فهرست مطالب**

**عنوان** **صفحه**


**فصل اول : مقدمه و کلیات**

**۱-۱** مقدمه ..... **۱**

**۱-۲** هدف تحقیق ..... **۲**

**۱-۳** روش تحقیق ..... **۲**

**فصل دوم : بررسی منابع**

**۲-۱** مقدمه ..... **۴**

**۲-۲** فلسفه های طراحی مختلف ..... **۶**

**۲-۳** روش های طراحی ..... **۷**

**۲-۳-۱** روش تحلیل ساده شده ..... **۸**

**۲-۳-۱-۱** روش پلوس- دیویس – راندلف(PDR) ..... **۸**

**۲-۳-۱-۲** روش بورلاند ..... **۱۱**

**۲-۳-۱-۳** روش صفحه خنثی ..... **۱۲**

**۲-۳-۱-۳-۱** روند پیشنهادی تحلیل سیستم های مرکب ..... **۱۵**

**۲-۳-۲** روش های تقریبی رایانه ای ..... **۱۷**

**۲-۳-۲-۱** روش نوار بر روی فنر (GASP) ..... **۱۷**

**۲-۳-۲-۲** روش صفحه بر روی فنر(GARP) ..... **۱۸**

**۲-۳-۳** روش های دقیق رایانه ای ..... **۱۹**

**۲-۳-۳-۱** تحلیل عددی دو بعدی ..... **۱۹**

**۲-۳-۳-۲** تحلیل عددی سه بعدی ..... **۱۹**

**۲-۳-۳-۲-۱** روش اجزای محدود سه بعدی ..... **۱۹**

**۲-۳-۳-۲-۲** روش دوگانه(هیبریدی)FEM-BEM ..... **۲۰**

**۲-۳-۳-۲-۲-۱** مقدمه ..... **۲۰**

**۲-۳-۳-۲-۲-۲** روش تحلیل ..... **۲۰**

**۲-۳-۳-۲-۲-۳** منحنی های پیش گسیختگیt-z ..... **۲۳**

**۲-۳-۳-۲-۲-۴** تغییرات شعاعی مدول برشی ..... **۲۵**

**۲-۳-۳-۲-۲-۵** تنش کرنش غیر خطی ..... **۲۵**

**۲-۳-۳-۲-۲-۶** تغییرات مدول برشی با عمق ..... **۲۶**

**۲-۳-۳-۲-۲-۷** منحنی های t-z پس گسیختگی..... **۲۶**

**۲-۳-۳-۲-۲-۸** روش ترسیم منحنی تئوری t-z ..... **۲۶**

**۲-۳-۳-۲-۲-۹** تغییر شکل نوک شمع ..... **۲۷**

**۲-۳-۳-۲-۲-۱۰** گروه شمع در خاک همگن ..... **۲۷**

**۲-۳-۳-۲-۲-۱۱** رفتار در خاک غیر خطی ..... **۲۸**

**۲-۳-۳-۲-۲-۱۲** رفتار در خاک غیر همگن ..... **۲۸**
**۲-۳-۳-۲-۲-۱۳** ماتریس انعطاف پذیری رادیه- خاک ..... **۲۸**
**۲-۳-۳-۲-۲-۱۴** محاسبه ی تنش ..... **۲۹**
**فصل سوم : مبانی و روش های مدل سازی و بررسی صحت مدل سازی**
**۳-۱** مقدمه ..... **۳۴**
**۳-۲** معرفی نرم افزار Plaxis 3D Foundation ..... **۳۴**
**۳-۳** مراحل مدل سازی ..... **۳۴**
**۳-۳-۱** مشخصات کلی اجزای مدل ..... **۳۵**
**۳-۳-۲** شرایط مرزی استاندارد ..... **۳۵**
**۳-۳-۳** مدل سازی رفتار خاک ..... **۳۵**
**۳-۳-۴** پارامترهای رفتاری سطح واسط ..... **۳۷**
**۳-۴** شبکه بندی مدل ..... **۳۸**
**۳-۵** انجام محاسبات ..... **۳۸**
**۳-۵-۱** روش K0 ..... **۳۹**
**۳-۵-۲** محاسبات پلاستیک ..... **۳۹**
**۳-۶** بارگذاری ..... **۳۹**
**۳-۷** فرضیات مدل سازی و تحلیل ..... **۴۰**
**۳-۷-۱** ابعاد محیط در جهات افقی و قائم ..... **۴۰**
**۳-۸** صحت سنجی مدل سازی های انجام گرفته در نرم افزارPlaxis 3D Foundation ..... **۴۱**
**فصل چهارم : نتایج و بحث**
**۴-۱** مقدمه ..... **۴۴**
**۴-۲** بررسی حالت پایه ..... **۴۵**
**۴-۳** بررسی اثر نوع خاک بر مشارکت رادیه ..... **۵۱**
**۴-۴** بررسی اثرات هندسه ی گروه شمع و رادیه بر مشارکت رادیه ..... **۵۵**
**۴-۴-۱** بررسی اثر فاصله بندی ..... **۵۵**
**۴-۴-۲** بررسی اثر تعداد شمع ها ..... **۵۹**
**۴-۴-۳** بررسی اثر طول شمع ها ..... **۶۲**
**۴-۴-۴** بررسی اثر ضخامت پی رادیه ..... **۶۶**
**۴-۵** نشست های مجاز، گسیختگی و تفاضلی ..... **۶۸**
**۴-۶** نتیجه گیری کلی و پیشنهادات برای طراحی ..... **۷۸**
**فصل پنجم : جمع بندی و پیشنهادها**
**۵-۱** مقدمه ..... **۷۹**
**۵-۲** نتیجه های حاصل از فصل سوم (مدل سازی با نرم افزار Plaxis 3D Foundation) ..... **۷۹**
**۵-۳** نتیجه های حاصل از فصل چهارم ( تغییرات در نوع خاک وهندسه مدل) ..... **۷۹**
**۵-۴ پیشنهادها** ..... **۸۱**

**فهرست علائم و اختصارات**

**فهرست منابع**

## پیشگفتار

در این پایان نامه سعی شده تا کلیاتی در مورد سیستم پی مرکب «شمع- رادیه» ارائه و سپس به تحلیل های عددی در این مورد پرداخته شود. کارهای انجام گرفته در فصول مختلف به طور اجمالی به این شکل است که در فصل اول به بیان ایده «شمع- رادیه» و کلیاتی از هدف و روش تحقیق ارائه شده است. در فصل دوم به بررسی مطالعات انجام گرفته در این زمینه و روش های طراحی ارائه شده توسط محققان مختلف پرداخته می شود. در فصل سوم نرم افزار رایانه ای استفاده شده در تحلیل های عددی معرفی می شود و صحت و دقت محاسبات با یک روش آزمایشگاهی سنجیده می شود. در فصل چهارم که بخش اصلی این پایان نامه می باشد سعی شده است تا مدل های مختلفی از «شمع- رادیه» ها توسط نرم افزار ساخته شود و نتایج مورد نظر از جمله نشست ها در قالب جداول و نمودارهایی ارائه و تفسیر گردند. در نهایت در فصل پنجم که فصل آخر می باشد به بیان نتایج کلی بدست آمده و ارائه پیشنهادات برای طراحی های اولیه پرداخته می شود و پیشنهاداتی نیز برای کارهای آتی داده می شود.

# فصل اول

# مقدمه و کلیات

## ۱-۱- مقدمه

تعیین ظرفیت باربری، برآورد نشست، تحلیل پایداری (در صورت لزوم) و طراحی سازه ای و ملاحضات اجرایی و اقتصادی پنج معیار عمده ی طراحی پی ها هستند که معمولا در سه مورد نخست، مهندسین ژئوتکنیک نقش عمده ای را به عهده دارند. در اولین مرحله طراحی، ابعاد پلان پی با استفاده از معیارهای موجود در تعیین توان باربری خاک و همچنین کنترل نشست پی مشخص می شود. کنترل نشست در پی های سطحی بیش از پی های عمیق مورد توجه است، تا آنجا که کنترل نشست، معیار اصلی طراحی پی های سطحی است[۱] .

معمولا اولین طرحی که طراحان برای پی سازه ها در خاک های رسی یا ماسه ای انتخاب می کنند، پی رادیه مسطح می باشد که بار ستون ها و دیوار های باربر را به شکل گسترده به سطح زیادی پخش می کند و کنترل نشست تفاضلی(غیر یکنواخت) می تواند توسط تغیر سختی در رادیه انجام شود.

معمولا نشست مهم ترین فاکتور طراحی می باشد، مگر در سازه های فوق سنگین که ظرفیت باربری کنترل کننده می باشد. برای محدود کردن نشست، یک راه حل استفاده از پی به همراه شمع است. اگرچه سیستم رادیه از کامل ترین انواع پی های سطحی است، اما به دلیل داشتن ابعاد قابل توجه اعماق زیادی را تحت تأثیر تنش قرار می دهد و این امر منجر به وقوع نشست های قابل توجه در سیستم می شود. به همین منظور و به جهت تقویت عملکرد پی های رادیه در مورد بار های سنگین، پروژه های حساس به نشست و زمین های مسئله دار و تراکم پذیر، می توان از سیستم های رادیه ی شناور، بهسازی خاک زیر پی و در نهایت از کامل ترین سیستم های پی سازی یعنی رادیه و گروه شمع بهره جست. در حالت اخیر، علاوه بر افزایش توان باربری، نشست پی نیز کاهش می یابد[۱].

سیستم های مرکب پی رادیه و گروه شمع از آن روی « سیستم » خوانده می شود که در آنها اندرکنش های مختلفی بین اجزای سیستم وجود دارد. این اندرکنش ها عبارتند از اندرکنش رادیه و گروه شمع، اندرکنش رادیه و خاک، اندرکنش شمع و خاک و اندرکنش شمع ها با یکدیگر. با این تعریف، هرگاه از سیستم رادیه و گروه شمع نام برده می شود، منظور این است که هم پی رادیه و هم گروه شمع در باربری کلی زیرسازه ایفای نقش می کنند واز قابلیت هیچ یک از آنها در این خصوص صرفنظر نمی شود. ایده ی تلفیق پی های رادیه و گروه شمع، ایده ای نوین در مهندسی ژئوتکنیک است که توسط محققان بسیاری پیشنهاد شده است و اصطلاحا «شمع- رادیه» نامیده می شود[۱].

اگرچه ایده ی شمع-رادیه به طور عمده برای ساخت برج ها به کار برده می شوند، قابلیت استفاده برای کار های بهسازی و سازه های متوسط را نیز دارد. به هر حال، در دهه های گذشته، افزایشی در استفاده از گروه شمع ها در اتصال با پی رادیه بوده است که منجر به صرفه جویی اقتصادی شده است. چنین ایده ای، استفاده هوشمندانه ای از المان های پی عمیق و مشارکت رادیه بدست می دهد[۲].

در این پایان نامه سعی بر آن بوده که آنالیز حساسیتی بر عوامل تأثیر گذار بر فاکتور های طراحی این سیستم، و همچنین ارائه یک پیشنهاد برای طراحی اولیه این سیستم ها ارائه شود.

## ۱-۲- هدف تحقیق

پی های دارای شمع در حالت سنتی با یک ضریب اطمینان بالا طوری طراحی می شوند که کل بار طراحی را شمع ها تحمل کنند. اگرچه کلاهک( سرشمع) معمولا در تماس نزدیکی با خاک است، مشارکت با گروه شمع و باربری رادیه کمتر مورد توجه بوده است[۲].

معمولا شمع ها تنها در مکان هایی قرار می گیرند که قسمتی از بار وارده را تحمل می کنند. بنابر این به طور اساسی با ایده استفاده از شمع ها در تمامی مکان ها زیر سازه که تمامی بار را تحمل کنند، تفاوت اساسی دارد. یک جنبه ی منحصر به فرد شمع-رادیه این است که گاها شمع ها تا رسیدن به ظرفیت نهایی فشاری محوری ژئوتکنیکی تحت بار های سرویسی طراحی می شوند[۲].

در تحلیل سیستم های مرکب رادیه وشمع، روش های مختلفی وجود دارد که از جمله آنها می توان از روش رادیه ی صلب و غیر صلب ( انعطاف پذیر ) استفاده کرد. از روش های غیر صلب می توان به روش های عددی و اجزای محدود و نرم افزار های معمول اشاره کرد. در هر یک از این روش ها فرضیاتی برای تحلیل نیروها و توزیع آنها در اجزای سیستم وجود دارد[۲].

در این پایان نامه سعی شده تا روش های مختلف تحلیل و طراحی و دیدگاه های مختلف در طراحی شمع- رادیه که به طور کلی به سه دسته :

- روش های محاسباتی ساده شده
- روش های تقریبی رایانه ای
- روش های دقیق رایانه ای

تقسیم می شوند، بررسی شوند[۲]. در ادامه توسط نرم افزار حل عددی Plaxis ۳D Foundation(روش دقیق رایانه ای)، شمع- رادیه های مختلف مدل سازی و بررسی می شوند.

هدف از این تحقیق، در نظر گیری فرضیات رایج در تحلیل وطراحی هر یک از اجزای شمع- رادیه، یعنی گروه شمع و پی رادیه به طور مجزا و مقایسه نتایج بدست آمده با شمع- رادیه تحت عملکرد واقعی توسط نرم افزار می باشد. در کل اهداف و نتایج در قالب موارد زیر می باشند:

- بررسی اینکه آیا در نظر گرفتن سیستم شمع- رادیه به صورت گروه شمع مستقل با فرضیات رایج در حالات مختلف در جهت اطمینان یا عدم اطمینان می باشد؛
- بررسی میزان مشارکت و کمکی که پی رادیه در کاهش نشست های حداکثر و تفاضلی (ناهمگن) دارد؛
- مقایسه حالات مختلف هندسه گروه شمع در حجم ثابت شمع ها و مشخص کردن حالت بهینه از لحاظ کارآیی؛

## ۱-۳- روش تحقیق

در هر یک از دیدگاه های طراحی، نیاز به ابزار محاسباتی مناسب می باشد. در سال های اخیر با گسترش روش های عددی و همچنین پیدایش رایانه ها با قدرت پردازش بالا، مدل سازی عددی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. البته در این مورد باید توجه داشت که نتایج روش های عددی را نیز نمی توان به تنهایی جهت طراحی استفاده نمود که علت آن گستردگی مجهولات موجود در تحلیل های عددی محیط های الاستوپلاستیک می باشد. به همین علت در هر مدل سازی عددی ابتدا نتایج حاصل از شبیه سازی، با نتایج حاصل از بررسی ها، آزمایش های در محل یا آزمایشگاهی و یا اندازه گیری های موارد واقعی مقایسه می گردد تا از درستی فرضیات در مدل سازی و همچنین عملکرد برنامه اطمینان حاصل شود.

در این تحقیق نیز از روش عددی جهت تحلیل محیط خاک، پی رادیه و شمع استفاده گردیده است. نرم افزار مورد استفاده جهت تحلیل Plaxis ۳D Foundation می باشد که با استفاده از روش اجزای محدود سه بعدی و در نظر گرفتن مدل الاستوپلاستیک مور- کلمب برای محیط خاک، تنش ها، کرنش ها و تغییر شکل های محیط را محاسبه می کند.

به منظور بررسی صحت روش تحقیق، نتایج بدست آمده از یک مدل آزمایشگاهی با نتایج بدست آمده مدل سازی در نرم افزار مقایسه می شود.

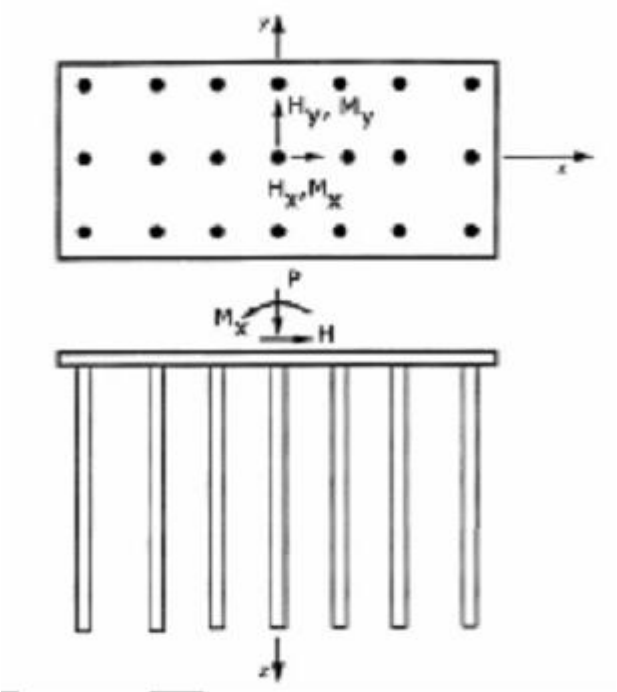
پس از بررسی صحت کار، فرضیات رایجی که در طراحی پی رادیه و گروه شمع ها، یعنی در نظر گیری پی رادیه به شکل یک مستطیل با ضخامت و انعطاف پذیری مشخص بر روی خاک (تماس از کف) و نیز در نظر گیری گروه شمع ها با یک کلاهک صلب که فقط وظیفه ی انتقال بار را بر عهده دارد، در نرم افزار مدل می شود. سپس با توجه به اینکه عملکرد واقعی شمع- رادیه در واقعیت به لحاظ انعطاف پذیری و مشارکت رادیه، با فرضیات گروه شمع مستقل متفاوت است، شمع- رادیه با فرضیات نزدیک به واقع مدل شده و با نتایج دو حالت قبلی مقایسه می شود.

# فصل دوم

# بررسی منابع

## ۲-۱- مقدمه

ایده‌ی شمع-رادیه ترکیب شمع های خمشی، رادیه و خاک در یک ساختار مرکب است. درک اثر اندرکنش آنها یک شرط غیر قابل چشم پوشی را بوجود می آورد[۱]. شکل( ۲- ۱) تصویری شماتیک از یک سیستم مرکب رادیه و گروه شمع را نشان می دهد. در این شکل نیروها و ممان های وارد بر سیستم مشخص شده اند[۱].




**شکل۲-۱- نمایش سیستم مرکب رادیه و گروه شمع**

چنین سیستم مرکبی باید برای معیار های زیر طراحی شود:

الف- حداکثر ظرفیت باربری ژئوتکنیکی تحت تأثیر بارهای قائم، افقی و ممان ها؛

ب- کنترل نشست بیشینه ی کل سیستم و تأمین سختی لازم؛

ج- کنترل نشست های تفاضلی ( غیر همگن ) ؛

د- کنترل پایداری سیستم وتأمین سختی جانبی آن؛

ه- طراحی سازه ای رادیه و شمع ها؛

و- بهینه سازی سیستم انتخابی از نظر اجرایی و اقتصادی.

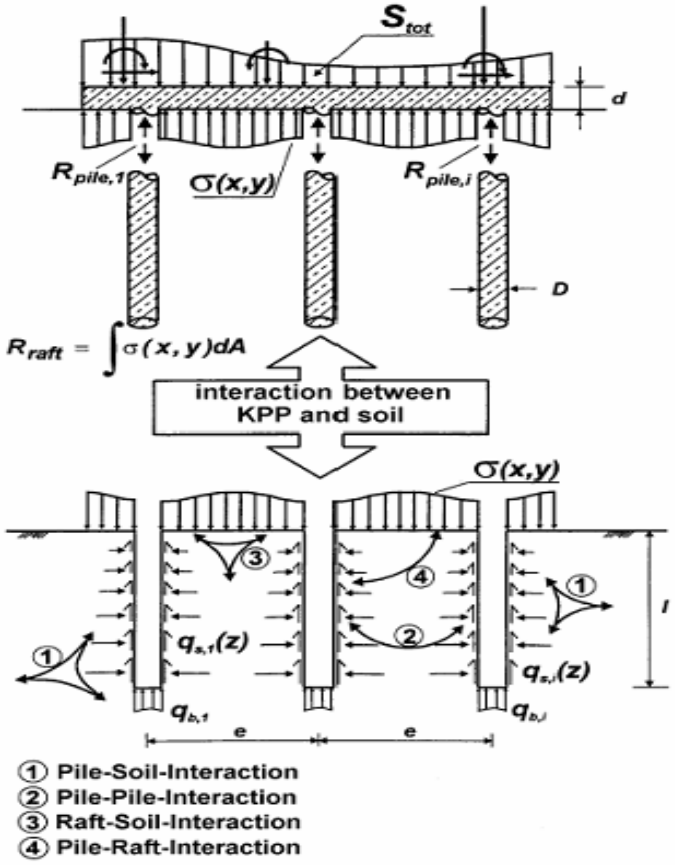
نشست و ظرفیت باربری از مهمترین موارد هستند، ولی دیگر موارد نیز باید مورد توجه قرار گیرند[۱].

تعیین ظرفیت باربری این سیستم ها به دو صورت قابل انجام است: یکی اینکه از یک ضریب اطمینان کلی برای سیستم استفاده شود ( روش تنش های مجاز) و یا اینکه طراحی در حالت حدی انجام پذیرد ( روش حالت حدی طراحی )[ ۱].کنترل نشست و چرخش سیستم نیز قطع نظر از روش کلی طراحی، باید به گونه ای انجام شود که مقادیر آنها از مقادیر مجاز بیشتر نشود. مقادیر مجاز نشست فونداسیون ها و چرخش های مجاز به نوع سازه بستگی داشته، در آیین نامه های معتبر و کتب طراحی موجود است[۱].

در این قسمت نظریه های عمده ی طراحی مطرح شده، روش های متعددی بررسی شده و قابلیت ها و محدودیت ها بحث می شود.

این سیستم از سه المان باربر تشکیل شده است: شمع ، رادیه و خاک زیرین. بر اساس سختی، رادیه بار سازه فوقانی $S_{tot}$ را به فشار سطح که با $R_{raft}$ نشان داده می شود توزیع می کند، به همین ترتیب به شمع ها که با مجموع مقاومت در زمین $R_{pile}$ $\Sigma_i$ نشان داده می شود(شکل۲-۲)[ ۲]. بنابراین مقاومت نهایی به صورت یک فرض اولیه بدین گونه است:

$$R_{total} = R_{raft} + \sum R_{pile,i} \geq S_{tot} \qquad (۱-۲)$$




**شکل۲-۲- پی شمع- رادیه به عنوان یک ساختار مرکب از المان خاک، رادیه و شمع**

طبق طراحی سنتی می بایست مشخص می شد که بار ساختمان توسط رادیه تحمل می شود یا گروه شمع [۲]. در هر مورد می بایست مشخص شود که شمع یا رادیه بار وارده را با ضریب اطمینان کافی در مقابل گسیختگی تحمل کند[۲].

اندرکنش بین رادیه و شمع این امکان را فراهم می کند که شمع ها تا حدی از بار را که به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از بار طراحی مجاز برای یک تک شمع است، طراحی کرد[۲]. این مطلب ما را به یک فلسفه متفاوت طراحی هدایت می کند.

## ۲-۲- فلسفه های طراحی مختلف[۲]

راندولف(۱۹۹۴) و پلوس(۲۰۰۱) به طور واضح سه فلسفه طراحی ارائه کردند:

**I)** «روش سنتی» که در آن شمع ها به عنوان گروهی که قسمت عمده بار را تا رسیدن به حد نهایی ظرفیت تحمل می کند، طراحی می شود در حالی که تا حدودی اجازه ی مشارکت رادیه داده می شود.

**II)** «شمع خزشی» که در آن شمع ها طوری طراحی می شوند که هنگامی وارد عمل شوند که بار وارده باعث شروع به خزش قابل توجهی در شمع ها کند که معمولا ۸۰- ۷۰٪ ظرفیت بار نهایی می باشد. در این حالت شمع های کافی وجود دارند که فشار تماس خالص بین رادیه و خاک زیرین را به مقدار کمتری از فشار پیش تحکیمی خاک کاهش دهند.

**III)** «کنترل نشست تفاضلی» که در آن شمع ها به شکل راهبردی به منظور کاهش نشست تفاضلی، تا به نسبت کاهش نشست کلی متوسط، آرایش داده شده اند.

بایستی تأکید شود که روش های تحلیل و طراحی که بحث می شوند می بایستی فلسفه های بالا را به کار گیرند.

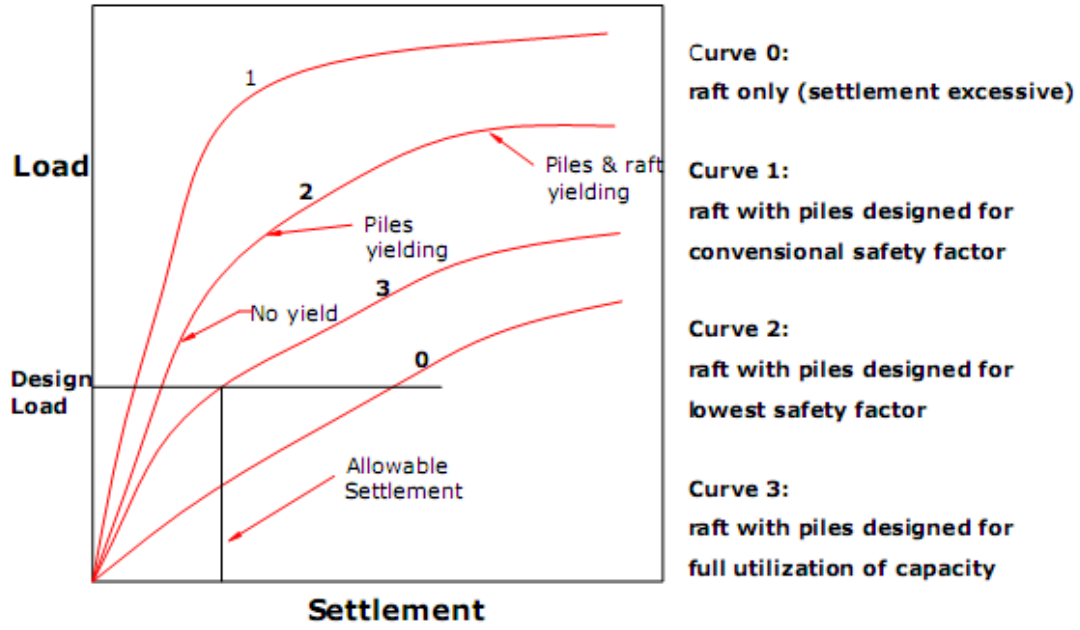
دو کلاس متفاوت برای شمع-رادیه تشخیص داده شده است:

۱ ) شمع-رادیه «کوچک» که ظرفیت باربری رادیه تنها ناکافیست که دلیل اولیه از اضافه کردن شمع ها، افزایش ضریب ایمنی است. عرض رادیه در مقایسه با طول شمع ها ناچیز است و سختی خمشی رادیه معمولا زیاد است و نشست تفاضلی مسئله ی اساسی نیست ( رادیه هایی با عرض بین ۵ تا ۱۵ متر ).

۲ ) شمع-رادیه ی «بزرگ» که ظرفیت باربری رادیه برای تحمل بار وارده با حاشیه ی امنیت معقولی کافیست اما شمع هایی به منظور کاهش نشست تفاضلی نیاز است. در این موارد عرض رادیه در مقایسه با طول شمع زیاد است.

این دو گروه به طور گسترده ای فلسفه های شمع خزشی و سنتی در نظر گرفته شده توسط راندولف را در بر می گیرد.

شکل(۲-۳) به طور فرضی نشان دهنده ی رفتار بار-نشست شمع-رادیه که بر طبق دو راهکار اول طراحی شده است، می باشد.




**شکل ۲-۳- منحنی های بار- نشست پی شمع- رادیه بر اساس فلسفه های طراحی مختلف**

منحنی ۰ نشان دهنده ی رفتار رادیه به تنهایی می باشد که در این مورد تحت بار طراحی نشست زیادی دارد.

منحنی ۱ نشان دهنده فلسفه سنتی طراحی است که در آن رفتار سیستم شمع-رادیه توسط رفتار گروه شمع کنترل می شود و به طور وسیعی در بار طراحی خطی است. در این مورد شمع ها قسمت عمده ی بار را می گیرند.

منحنی ۲ شمع خزشی را که در آن شمع ها با ضریب اطمینان کمتری عمل میکنند، اما به علت شمع های کمتر ، رادیه بار بیشتری نسبت به منحنی ۱ تحمل می کند را نشان می دهد.

منحنی ۳ نشان دهنده راهکار استفاده از شمع ها به عنوان کاهنده نشست و استفاده از ظرفیت کامل شمع ها در بار طراحی می باشد. در نتیجه، نمودار بار- نشست ممکن است در بار طراحی خطی نباشد اما کل پی حاشیه ی امنیت کافی دارد و معیار نشست ارضا می شود.

بنابراین طراحی نشان داده شده با منحنی ۳ قابل قبول است و نسبت به منحنی ۱و۲ تقریبا اقتصادی تر می باشد.

## ۲-۳- روش های طراحی

روش های متعددی برای تحلیل شمع-رادیه پایه گذاری شده و برخی از آنها توسط پلوس(۲۰۰۱- ۲۰۰۰) خلاصه شده اند. ۳ گروه گسترده از روش های طراحی مشخص شده اند:

I) روش های محاسباتی ساده شده

II) روش های تقریبی رایانه ای

III) دیگر روش های دقیق رایانه ای

روش های ساده شده شامل روش های راندلف و دیویس(۱۹۸۰)، راندلف(۱۹۹۴،۱۹۸۳)، ون ایمپه و کلرک(۱۹۹۵) و بورلاند(۱۹۹۵) و صفحه خنثی می باشند که همگی شامل تعدادی از ساده سازی ها در رابطه با مدل سازی پروفیل خاک و شرایط بارگذاری بر روی رادیه می باشند[۲].

روش های تقریبی رایانه ای شامل موارد زیر است:

– روش هایی که با به کارگیری یک «نوار بر روی فنر» که در آن رادیه توسط یک سری نوارها و شمع ها با فنرهایی با سختی مناسب معرفی می شوند، ونیز روش هایی که از «صفحه بر روی فنر» به کار می گیرند، که در آن رادیه توسط یک صفحه و شمع ها توسط فنر هایی معرفی می شوند[۲].

روش های دقیق رایانه ای شامل:

– تحلیل ساده شده اجزای محدود، که معمولا شامل معرفی سیستم پی به عنوان یک مسئله کرنش مسطح با نرم افزاری مانند Plaxis یا یک مسئله ی متقارن محوری و تحلیل تفاضل محدود متناظر با برنامه FLAC [۲].

– تحلیل اجزای محدود سه بعدی (Plaxis ۳D Foundation) و یا تحلیل تفاضل محدود ( FLAC ۳D) [۲].

– روش المان مرزی که در آن رادیه و شمع هر دو در سیستمی مجزا بوده و از تئوری الاستیسیته استفاده شده است[۲].

– روش های تلفیقی المان مرزی برای شمع ها و اجزای محدود برای تحلیل رادیه[۲].

در ادامه این روش ها به تفصیل توضیح داده می شوند.

## ۲-۳-۱- روش تحلیل ساده شده

### ۲-۳-۱-۱- روش پلوس- دیویس- راندلف(PDR)[ ۲]

برای تخمین اولیه برای رفتار شمع–رادیه یک روش ساده بار– نشست توسط پلوس و دیویس (۱۹۸۰) و راندلف (۱۹۹۴) ارائه شد. در نتیجه این روش با نام PDR شناخته شده است. این روش دو گام اساسی را شامل می شود.

۱) تخمین ظرفیت بار نهایی پی

۲) تخمین رفتار بار– نشست توسط رابطه ی ساده ی سه خطی

به منظور بدست آوردن ظرفیت باربری قائم شمع– رادیه با استفاده از روش های ساده، ظرفیت باربری نهایی می تواند کمتر از دو مقدار زیر تعیین شود:

– مجموع ظرفیت باربری رادیه به اضافه تمامی شمع ها

– ظرفیت نهایی یک بلوک شامل شمع ها و رادیه به اضافه قسمتی از رادیه خارج ازمحیط شمع ها

به منظور تخمین رفتار مناسب بار– نشست ، یک روش مشابه روش توضیح داده شده توسط پلوس ودیویس(۱۹۸۰) می تواند توسط روش ساده تخمین زدن مشارکت بار بین رادیه و شمع ها به عنوان طرح کلی توسط راندلف(۱۹۹۴) انجام شود.

توضیح مسئله شمع در نظر گرفته شده توسط راندلف در شکل( ۲–۴) نشان داده شده است. با استفاده از روش او، سختی پی شمع– رادیه می تواند طبق رابطه ی( ۲–۲) تخمین زده شود.

$$K_{pr} = (K_p + K_r(1-\alpha_{cp}))/(1-\alpha_{cp}^2.\frac{K_r}{K_p}) \quad (۲-۲)$$

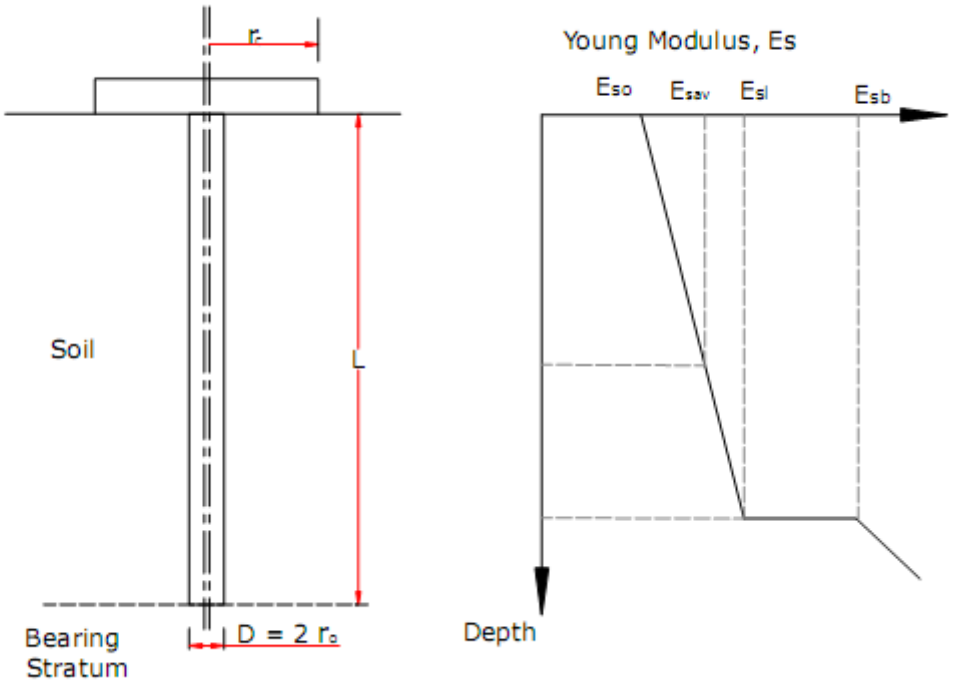
که:

$K_{pr}$ : سختی شمع–رادیه

$K_r$ : سختی رادیه به تنهایی

$K_p$ : سختی گروه شمع

$\alpha_{cp}$ : ضریب اندرکنش شمع–رادیه




**شکل ۲-۴- مدل ساده شده واحد شمع- رادیه**

سختی رادیه $K_r$ می تواند توسط تئوری الاستیسیته تخمین زده شود. سختی گروه شمع می تواند از تئوری الاستیسیته با استفاده از روش هایی مانند روش های توصیف شده توسط پلوس و دیویس(۱۹۸۰) تخمین زده شوند.

نسبت بار کل وارده که توسط رادیه تحمل می شود به شکل رابطه زیر است:

$$\frac{P_r}{P_t} = K_r(1-\alpha_{cp})/(K_p + K_r(1-\alpha_{cp}))=X \quad (۳-۲)$$

که:

$P_r$ : بار تحمل شده توسط رادیه

$P_t$ : بار وارده کل

می باشند. ضریب اندرکنش شمع–رادیه $\alpha_{cp}$ توسط رابطه زیر بدست می آید:

$$\alpha_{cp} = 1 - \ln(\frac{r_c}{r_o})/\xi \quad (۴-۲)$$

که:

$r_c$ : شعاع متوسط کلاهک شمع،(متناظر بامساحتی معادل مساحت رادیه تقسیم بر تعداد شمع ها)

$r_.$ : شعاع شمع ها

می باشند. همچنین:

$$\xi = \ln(\frac{r_m}{r_o}) \quad (۵-۲)$$

$$r_m = \left(۰.۲۵ + \xi(۲.۵\rho(۱-\upsilon) - ۰.۲۵)\right)L \quad (۶-۲)$$

$$\xi = \frac{E_{sl}}{E_{sb}} \quad (۷-۲)$$

$$\rho = \frac{E_{sav}}{E_{sl}} \quad (۸-۲)$$

v:ضریب پواسون خاک

L :طول شمع

$E_{sl}$:مدول یانگ خاک در تراز نوک شمع

$E_{sb}$: مدول یانگ خاک لایه ی مقاوم زیر نوک شمع

$E_{sav}$: مدول یانگ متوسط خاک در طول شمع

معادله ی بالا می تواند برای توسعه ی یک منحنی بار- نشست سه خطی مانند شکل( ۲-۵) به کار رود. ابتدا منحنی شمع- رادیه از رابطه ی( ۲-۲) برای تعدادی از شمع ها ی مورد نظر محاسبه شود. این سختی تا هنگامی که ظرفیت شمع کاملا بسیج شود، عمل کننده باقی می ماند. با ساختن فرض ساده شده که بسیج بار شمع به طور همزمان اتفاق می افتد. بار کل وارده $P_1$ ، که در آن به ظرفیت شمع می رسد به صورت زیر بدست می آید:

$$P_1 = P_{up}/(1-X) \quad (۹-۲)$$

که در آن:

$P_{up}$ : ظرفیت بار نهایی شمع ها در گروه

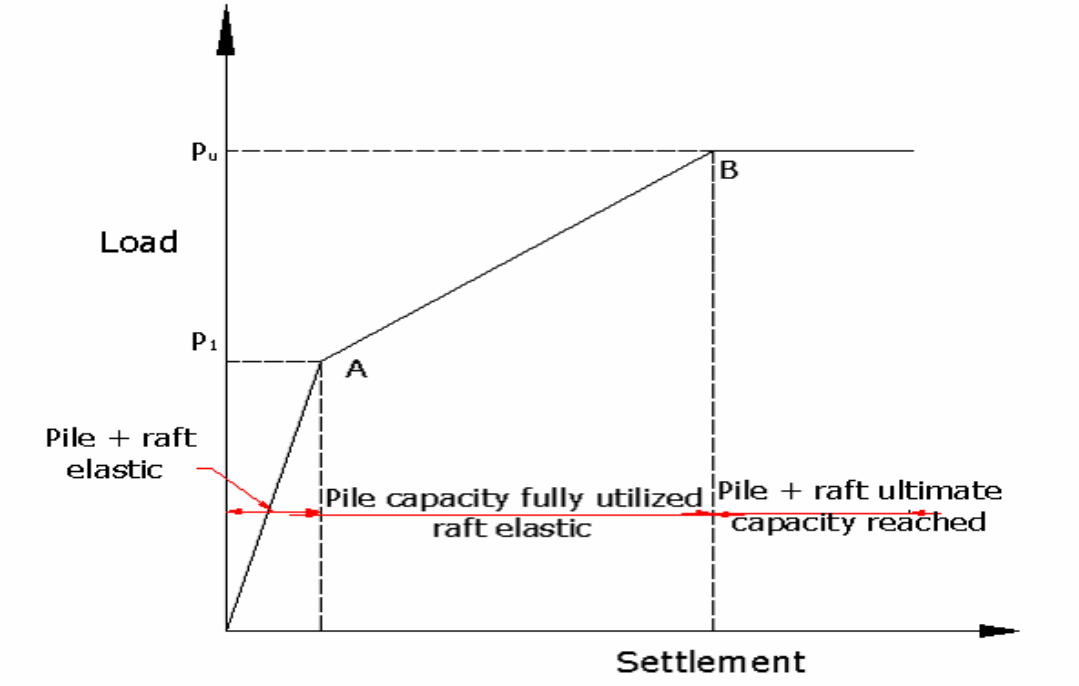
X: نسبت بار تحمل شده توسط رادیه(رابطه ۲-۳)

می باشند.

پس از نقطه A در شکل (۲-۵) ،سختی پی ، تنها سختی رادیه($K_r$) به تنهایی می باشد و تا زمانی که به ظرفیت بار نهایی سیستم پی شمع- رادیه برسد باقی می ماند( نقطه B در شکل ۲-۵). در آن مرحله رابطه ی بار- نشست افقی می شود.

منحنی های بار- نشست برای یک رادیه با تعداد متفاوتی از شمع ها می تواند توسط یک برنامه ریاضی مانند MATLAB محاسبه شود.

در این روش، ساده این است که رابطه بین تعداد شمع ها و نشست متوسط پی محاسبه می شود. اینگونه محاسبات یک وسیله سریع بدست آوردن اینکه آیا فلسفه ی طراحی برای شمع خزشی یا ظرفیت شمع کامل محتمل است، فراهم می کند.




**شکل ۲-۵- منحنی های ساده شده بار- نشست برای تحلیل اولیه**

### ۲-۳-۱-۲- روش بورلاند[۲]

هنگامی که شمع ها به منظور کاهش نشست طراحی می شوند و ظرفیت کامل ژئوتکنیکی آنها در بار طراحی به کار می رود، بورلاند(۱۹۹۵) شیوه ی ساده شده ی زیر را برای طراحی به کار برد:

- رابطه بار- نشست بلند مدت کلی را برای رادیه بدون شمع(شکل ۲-۶) تخمین بزنید. بار طراحی .P ، نشست کلی .S را می دهد.

- یک نشست طراحی قابل قبول $S_d$،تعیین کنید که می بایست حاشیه امنیتی را دارا باشد.

- $P_1$ بار تحمل شده توسط رادیه ی متناظر با $S_d$ است.

- اضافه بار $P_1$-P. فرض می شود که توسط شمع های کاهنده نشست تحمل می شود. مقاومت بدنه این شمع ها به طور کامل بسیج خواهد شد و بنابراین هیچ ضریب اطمینانی به کار رفته نشده است. با این وجود، بورلاند پیشنهاد می کند که یک «ضریب بسیج» حدود ۰.۹ به «بهترین تخمین محافظه کارانه» ظرفیت نهایی بدنه $P_{su}$ ، به کار برده شود.

- اگر شمع ها زیر ستون هایی قرار دارند که باری از بیش از $P_{su}$ تحمل می کنند، شمع- رادیه می تواند به عنوان یک رادیه که بر روی آن بار ستون کاهش یافته عمل می کند، تحلیل شود. در چنین ستون هایی بار کاهشی $Q_r$ برابر است با:

$$Q_r = Q - 0.9P_{su} \qquad (۱۰-۲)$$

- سپس لنگر خمشی رادیه می تواند توسط شمع- رادیه به عنوان یک رادیه تحت بار کاهش یافته $Q_r$ انجام شود.

پروسه تخمین نشست شمع- رادیه به طور کاملا واضح توسط بورلاند انجام نشده است، اما معقول است که روش راندلف (۱۹۹۴) را استفاده کنیم: