چکیده:

پی های رادیه–شمع به طور معمول با شمع های مشابه یا هم طول طراحی می شوند. هرچند تاثیرات اندرکنشی قابل توجه بین شمع های هم طول بیان می کند که این آرایش ممکن است بهینه نباشد.در این پایان نامه با توجه به اینکه در مواردی که پی شمع–رادیه تحت بارگذاری غیر یکنواخت قرار می گیرد، استفاده از شمع های غیر مشابه می تواند عملکرد این سیستم را بهبود بخشد، اثر این پارامتر و دیگر پارامتر های موثر مورد بررسی قرار رفتار پی شمع–رادیه با شمع های غیر مشابه ارزیابی شد. برای آنالیز APRILSگرفته است. به کمک نرم افزار سیستم پی شمع–رادیه از روش المان محدود و برای آنالیز سیستم لایه ای خاک از روش لایه محدود استفاده گردید. اندرکنش کامل بین شمع، رادیه و خاک که مهم ترین عامل در تعیین رفتار این سیستم است مورد آنالیز قرار گرفت. اندرکنش بین شمع های غیر مشابه تحت بارگذاری عمودی و افقی مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به بررسی های انجام شده به این نتیجه رسیدیم که استفاده از شمع های غیر مشابه می تواند تا حدود زیادی عملکرد این سیستم را بهبود بخشد. برای شمع–رادیه ای که تحت بارگذاری عمودی قرار دارد، با توجه به مقادیر نشست های تفاضلی، ترجیح داده می شود که شمع های با طول بلندتر زیر ناحیه مرکزی رادیه قرار گیرند و برای بارگذاری افقی، شمع های با قطر بزرگ تر در این ناحیه قرار گیرند.

فصل ۱

کلیات و شناخت پی های شمع- رادیه (Piled-Raft)

۱-۱- اهمیت و کاربرد پی ها

بار تمامی سازه های مهندسی متکی به زمین بایستی توسط عنصر واسطه ای به نام پی یا شالوده یا زیرسازه تحمل شود. پی بخشی از یک سیستم مهندسی است که بارهای تحمیلی و وزن خود را به خاک یا سنگ زیرین انتقال می دهد. بدین ترتیب علاوه بر تنشهای فعلی موجود در توده خاک که از وزن خود خاک و تاریخچه ژئوتکنیکی آن ناشی می شوند، تنشهای دیگری نیز ایجاد می شود. برای توصیف بخش مهندسی سیستمی که بار را به پی یا شالوده یا زیرسازه انتقال می دهد، از اصطلاح روسازه استفاده می شود. اصطلاح روسازه معنای ویژه ای در ساختمان ها و پل ها دارد، اما به هر حال پی ممکن است تنها بار ماشین آلات، تجهیزات صنعتی (برج های صنعتی و مخازن) را تحمل کند و یا در موارد مشابه بکار رود. به همین دلایل بهتر است که پی را بخشی از سیستم مهندسی بدانیم که ارتباط اجزای باربر را با زمین برقرار می سازد[۱].

۱-۲- خلاصه ای در مورد انواع پی ها و کاربرد آنها

پی ها را می توان بر اساس محل انتقال بار آنها به زمین به ۲ دسته تقسیم کرد[۱] :

۱- پی های سطحی : پی های منفرد، پی های گسترده، پی های نواری، در این گونه موارد معمولا"

$B/D \leq ۱$ (D عمق دفن شدگی پی و B عرض پی) می باشد.

۲- پی های عمیق : شمع ها، پایه های عمیق یا صندوقه های عمیق، در این گونه موارد معمولا"

$B/D \leq ٤$ می باشد.

پی ها علاوه بر وظیفه انتقال بار بایستی طوری طراحی شوند که نشست های حاصل (نشست های یکنواخت و غیر یکنواخت) از حد مجاز فراتر نروند. در زمانهای گذشته بیشتر ساختمانها بر پی های نواری یا منفرد بنا می شدند و چنانچه لایه سطحی زمین شل و تراکم پذیر بود به دلیل ناچیز بودن دستمزدها و وفور چوب، در زمین شمع چوبی کوبیده می شد. اجرای لایه های شفته آهکی و تقویت آن با قلوه سنگهای درشت هم راه حل دیگری به حساب می آمد لیکن از قرن هجدهم میلادی که بر سنگینی و صلبیت بناها اضافه شد، و همچنین به دلایل اقتصادی روشهای فوق و بویژه اجرای شمعهای چوبی اهمیت خود را از دست داد. امروزه از پی های گسترده در مکانهایی که ظرفیت باربری خاک بستر پایین است و یا بار ستونها چنان بزرگ است که ۵۰ درصد سطح توسط پی های منفرد مرسوم پوشانده شود، استفاده می شود. استفاده از پی های گسترده برای زیرزمینهای عمیق به منظور توزیع بار ستون ها جهت توزیع فشار یکنواخت تر و ایجاد دال کف زیرزمین امری متداول است. باید توجه داشت که تنش های تماسی پی گسترده در عمق بیشتری از زمین نفوذ می کند یا در عمق کمتر شدت نسبی بیشتری دارند؛ زیرا این دو عامل نشست ها را افزایش می دهند. در مواردی که سطح آب زیرزمینی بالا است یا چنانچه خاک مستعد نشست های بزرگ است، پی گسترده را می توان روی شمع ها قرار داد. اما در مواردی که امکان استفاده از پی های سطحی نمی باشد (مثلاً احداث پایه پل داخل رودخانه) گزینه استفاده از شمع که از گروه پی عمیق است، مطرح می شود. شمع عضو سازه ای چوبی،بتنی یا فولادی است که برای انتقال بارهای سطحی به ترازهای پایین تر توده خاک مورد استفاده قرار می گیرد. این انتقال می تواند به صورت توزیع قائم در امتداد بدنه شمع یا اعمال مستقیم بار به چینه پایین تر از طریق نوک شمع باشد.

ازشمع معمولا" برای منظورهای زیر استفاده می شود[۲،۳] (شکل۱-۱):

۱- در ساختمانهای بلند که برای مقابله با نیروهای جانبی زلزله از المانهای مقاوم جانبی نظیر دیوار برشی و یا مهاربندهای فلزی استفاده می شود، اغلب اوقات برای طراحی پی زیر این المانهای مقاوم به دلیل افزایش تنش های موضعی(Local) و همچنین نیروهای برکنش (uplift) بایستی از تعدادی شمع در زیر پی ها استفاده شود. همچنین در سازه های بلند گاهی اوقات چنانچه خاک زیر پی حتی از مقاومت خوبی برخوردار باشد به دلیل سنگین بودن سازه ها و افزایش بارهای وارده بر پی ناچار خواهیم بود از شمع در زیر پی ها استفاده کنیم(شکل ۱-۲).

۲- برای شالوده بعضی از سازه های خاص نظیر پل ها- اسکله ها- سیلوها-تونل های زیرزمینی- خطوط انتقال برق-برج و منابع آب هوائی- منابع آب زیرزمینی و شالواده های گسترده در زیر آب ؛ برای مقابله با نیروهای جانبی و نیروهای برکنش و کنترل نشست ها از شمع در زیر شالوده های سطحی استفاده می شود.

۳- در بعضی از سازه های بسیار مهم مانند نیروگاههای اتمی و راکتورهای هسته ای، رادارها و غیره که حساسیت بسیار زیادی نسبت به نشست دارند الزاما" از سیستم شمع در زیر پی ها استفاده خواهد شد.

٤- گاهی اوقات لایه های فوقانی خاک دارای قابلیت فشردگی زیاد بوده و خیلی سست می باشند و برای انتقال بار به لایه های تحتانی محکم تر و یا سنگ بستر از شمع استفاده می شود.

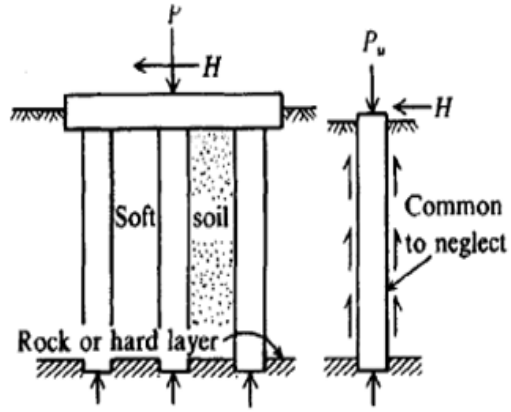
۵- اگر شمعها تحت تاثیر نیروی افقی قرار گیرند، در حالی که قابلیت حمل بارهای قائم را دارا هستند، می توانند به وسیله خمش، نیروهای افقی را حمل نمایند. این وضعیت اغلب در شالوده سازه های

حائل خاک که وظیفه آنها مقاومت در مقابل فشار جانبی خاک است و یا ساختمانهای بلند که تحت تاثیر نیروهای باد یا زلزله قرار دارند پیش می آید(شکل۱-۳).

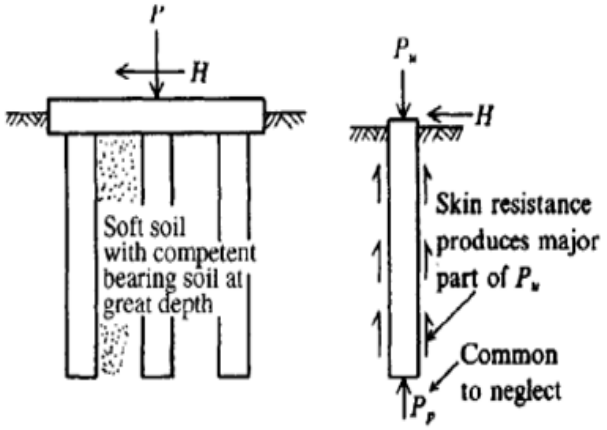
٦- چنانچه خاک محل مورد نظر برای احداث ساختمان از نوع خاک قابل تورم(Expanssive) و یا رمبنده(Collapssible) باشد؛ برای رفع این مشکل باید به کمک شمع از لایه خاک قابل تورم یا رمبنده عبور کرده و وارد لایه پایدار خاک شویم(شکل ۱-٤).

۷- متراکم ساختن خاک های سست و غیر چسبنده از طریق ترکیب جابجایی حجمی شمع و ارتعاش کوبش.

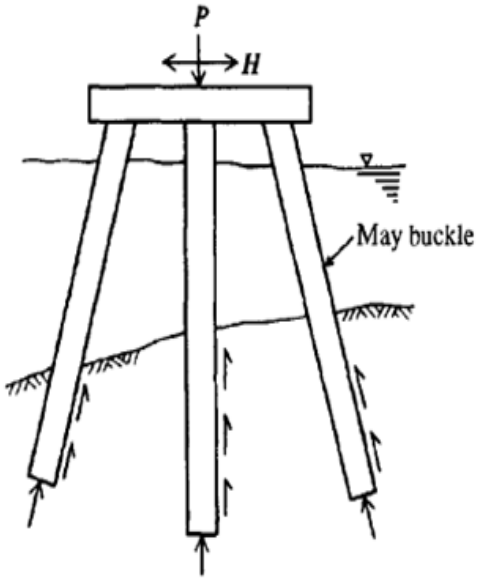
پی های شمعی بسیار پرهزینه تر از پی های منفرد است و احتمالا" از پی گسترده نیز گران تر است. در هر حال باید توجه زیادی به تعیین خصوصیات خاک زمین در عمق احتمالی مورد نظر معطوف داشت، تا بتوان تا حد امکان در مورد ضرورت استفاده از شمع درست تصمیم گیری نمود؛ و تعداد و طول شمع ها را در حد لازم تعیین نمود[۲].



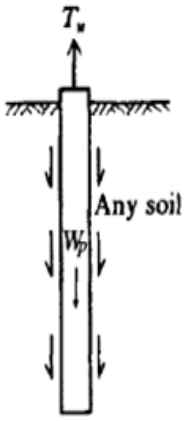
(a) Group and single pile on rock or very firm soil stratum.



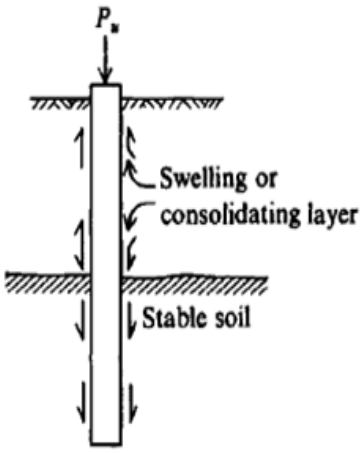
(b) Group or single pile "floating" in soil mass.



(c) Offshore pile group.

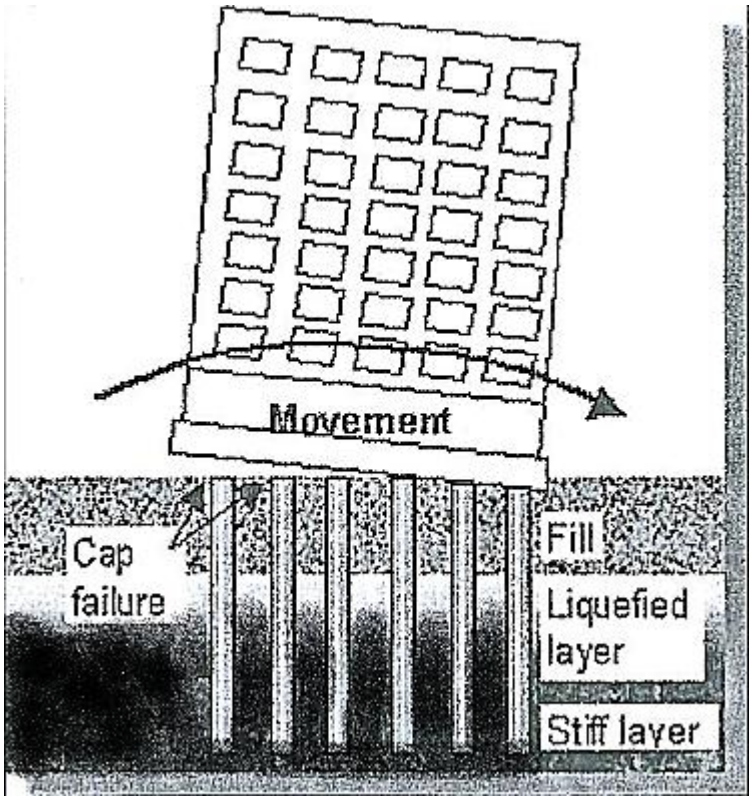


(d) Tension pile.

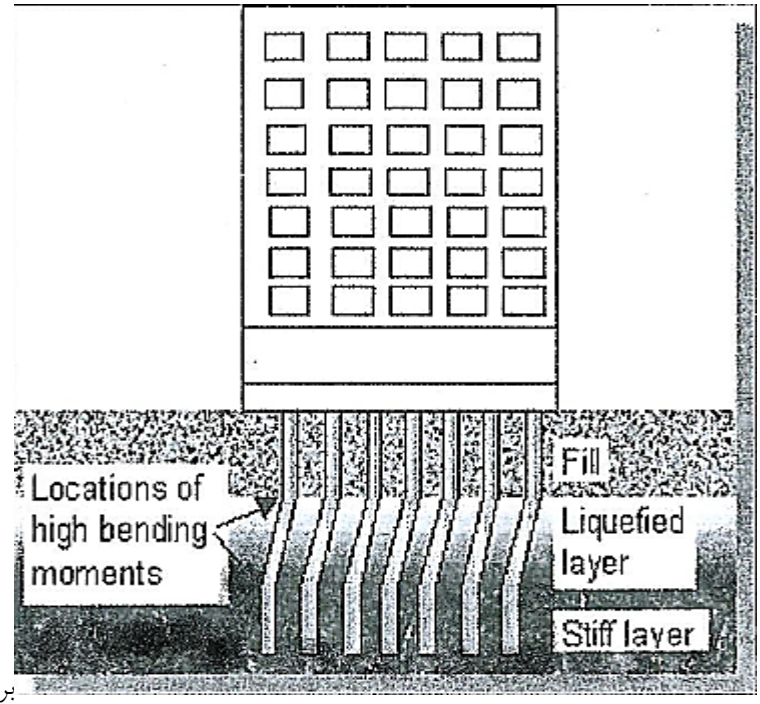


(e) Pile penetrating below a soil layer that swells (shown) or consolidates.

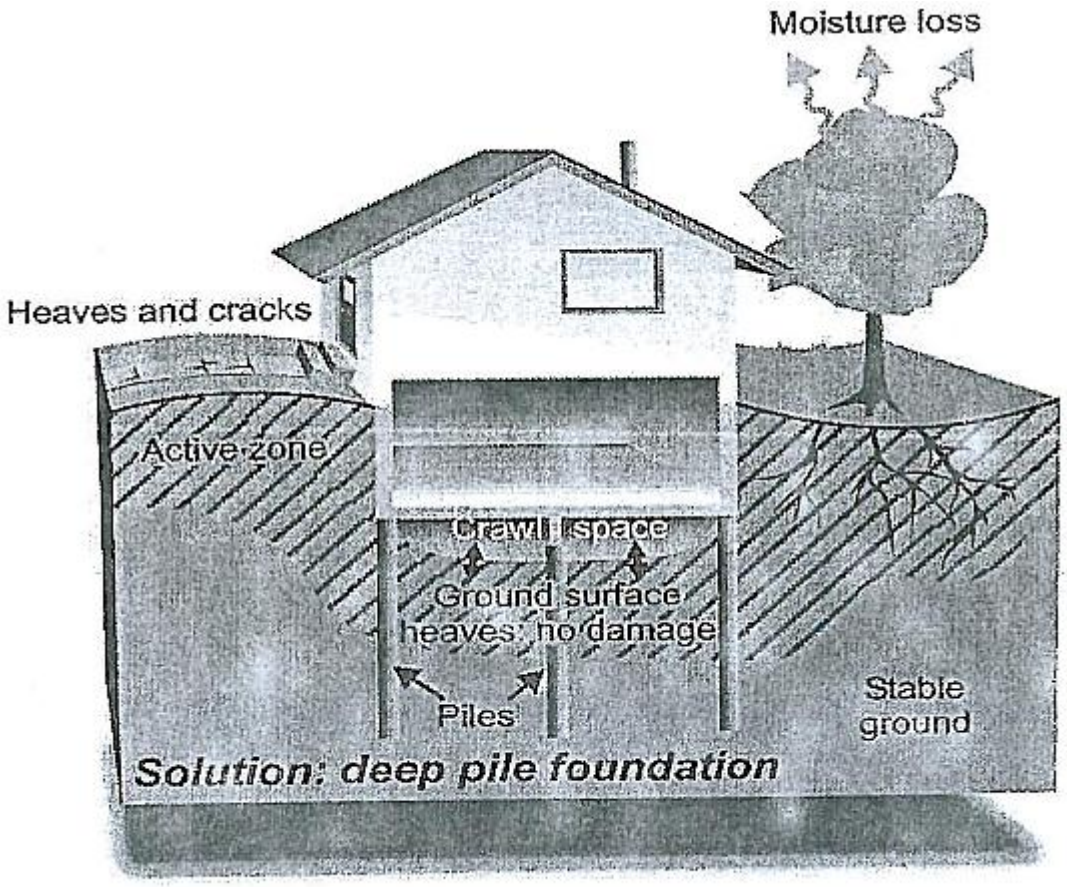
شکل ۱-۱- انواع ترکیب ها و کاربردهای شمع ها



شکل ۱-۲ استفاده از شمع برای کنترل افزایش تنش های موضعی و نیروهای برکنش



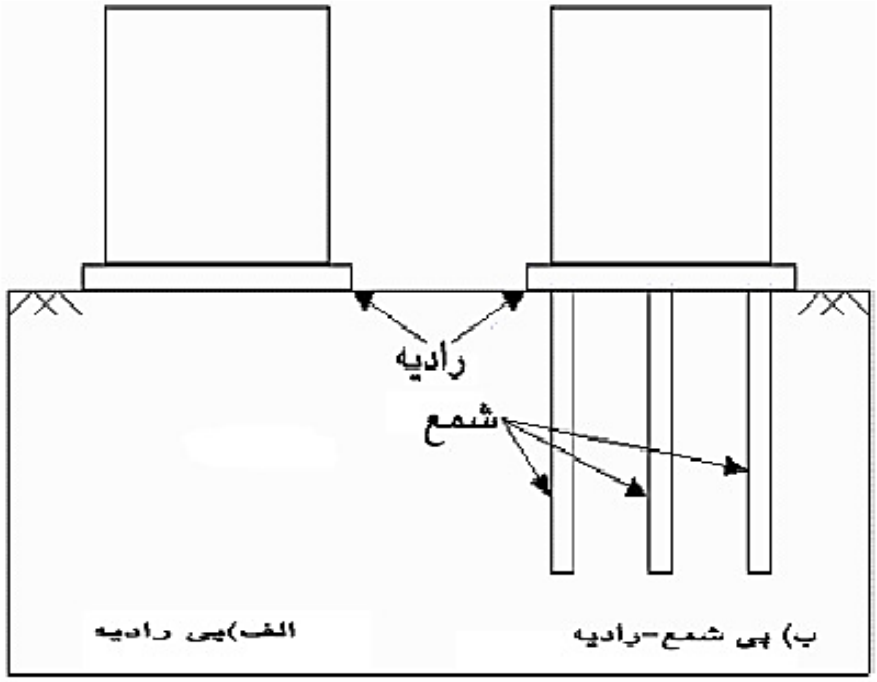
شکل ۱-۳ استفاده از شمع برای کنترل نیروی جانبی



شکل ۱-٤ استفاده از شمع در زیر پی سطحی در خاک مسئله دار

۱-۳- آشنایی با سیستم پی های شمع-رادیه(Piled-Raft)

پی های سطحی (پی تک و نواری و یا گسترده) چنانچه تحت بارهای سنگینی قرار گیرند یا بر روی خاکهای مسئله دار (رمبنده یا فروریزشی) قرار گیرند، قادر به تحمل بارهای وارده نبوده و یا اینکه نشست ها بیشتر از حد مجاز می شود، اگر از تعدادی شمع در زیر پی سطحی استفاده شود و در تحلیل و طراحی این نوع پی ها سهم باربری پی سطحی نیز در نظر گرفته شود به پی فوق؛ پی شمع-رادیه (Piled-Raft) گویند(شکل ۱-۵) [۷] . چنانچه از سهم باربری پی سطحی صرفنظر گردد و پی صرفا" به عنوان یک کلاهک (Cap) که وظیفه انتقال بار به شمع ها را دارد؛ در نظر گرفته شود؛



شکل ۱-۵- شمای کلی شالوده شمع- رادیه[۷]

چنین سیستمی گروه شمع آزاد یا خودایستا (Free Standing Pile Group) نامیده می شود[۳] . خاکهای قابل تورم (Expanssive) در اثر افزایش یا کاهش رطوبت، تورم و یا کاهش حجم پیدا می کنند و فشار تورمی این نوع خاکها ممکن است قابل توجه باشد؛ لذا برای رفع این مشکل باید به کمک شمع از لایه خاک قابل تورم عبور کرده و وارد لایه پایدار خاک شویم. خاک هایی نظیر ماسه بادی که دارای طبیعتی فروریزشی(Collapsible) هستند وقتی درصد رطوبت خاک افزایش یابد خاک دچار نشست زیادی می شود؛ همچنین مسئله روانگرایی همیشه در این نوع خاکها محتمل بوده و باید از شمع جهت عبور از این لایه سست و انتقال بار به لایه مناسب استفاده شود. در چنین حالتی قسمتی از

شمع که از چنین لایه های سست عبور می کند ممکن است تحت اثر نیروهای اصطحکاک منفی قرار گیرد. چنانچه خاک زیر پی سطحی سست باشد(خاک قابل تورم یا فروریزشی) و یا خاک تحت اثر آب شستگی باشد سهم باربری پی سطحی ناچیز بوده و قابل صرفنظر کردن است و تمام بار وارده به وسیله شمع ها تحمل می گردد؛ در چنین حالتی فرض گروه شمع آزاد منطقی به نظر می رسد ولی چنانچه خاک زیر پی مقاوم باشد قطعا" در انتقال بار وارده با شمع ها مشارکت خواهند کرد و درصدی از بار وارده توسط پی سطحی تحمل خواهد شد؛ این حالت که به آن پی شمع–رادیه (Piled-Raft) می گویند که در سالهای اخیر مورد توجه محققان مختلفی چون Reul -Polous-Lee-Chow-Davis-Randolph و غیره قرار گرفته است[۳] . به طور کلی هر جا که از ترکیب شمع و رادیه برای انتقال بار وارده از روسازه به خاک استفاده شود و در طول مدت خدمت دهی به هیچ دلیلی(مانند آب شستگی یا نشست خاک) ارتباط رادیه با خاک قطع نگردد؛ در آن صورت بار اعمالی به صورت مشترک توسط شمع و رادیه به خاک منتقل خواهد شد. پی های شمع–رادیه از لحاظ اقتصادی گزینه ای مقرون به صرفه می باشند؛ زیرا زمانی که رادیه به تنهایی نیاز طراحی مورد نظر را از لحاظ باربری و نشست تامین نمی کند، با استفاده از چندین شمع در زیر رادیه مقدار ظرفیت باربری و نشست پذیری و نشست های تفاضلی (Differential Settelement) به مقدار زیادی کاهش می یابد[٦].

در جدول ۱–۱ خلاصه ای از پروژه های اجراء شده با پی های شمع–رادیه در فرانکفورت آلمان را که از طرف آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه Darmsdatجهت پایش (Monitoring) ابزار گذاری شده، ارائه شده است[۸].

در ذیل به طور خلاصه به شرح ۳ پروژه ای که در شهر فرانکفورت آلمان از پی های شمع-رادیه استفاده شده است؛ ارائه شده است. برای مدل کامپیوتری این پروژه ها از برنامه المان محدود ABAQUSاستفاده شده است. این برنامه یکی از تواناترین برنامه های موجود می باشد که قادر است با در اختیار داشتن انواع المانهای لازم ؛ مدل مورد نظر را تا حد امکان مطابق با واقعیت مدل سازی نماید. زمین محل پروژه شامل لایه ای ضخیم از خاک رس بیش تحکیم یافته می باشد که در زیر آن لایه ای ضخیم از سنگ رسوبی قرار دارد.

الف) پروژه WESTEND

این پروژه شامل ساختمانی به ابعاد ۹۰ متر ×۱۰۰ متر است که مابین سالهای ۱۹۹۳-۱۹۹۰ ساخته شده است . این ساختمان متشکل از ۲ برج به ارتفاع ۲۰۸ متر و ٦۰ متر است که بر روی ۲ شالوده رادیه جداگانه احداث شده است. ضخامت رادیه برج اصلی از ۳ متر در لبه رادیه الی ٤.٦٥ متر در وسط رادیه متغیر است. در زیر رادیه از ٤۰ شمع به طول ۳۰ متر و قطر ۱.۳ متر استفاده شده است.

در شکل (۱-٦) مشخصات هندسه پروژه اعم از ابعاد کلی پی و لایه خاک و تراز آب زیرزمینی و مکانهای ابزارگذاری شده جهت پایش رفتار پی اعم از نشست و باربری ارائه شده است. طبق

محاسبات سهم شمع ها از کل بار اعمالی برابر ٦٦ درصد می باشد ولی در عمل با اندازه گیری این مقدار ٥٠ درصد بدست آمده است ارائه شده است[٨].

ب) پروژه MESSETURM

این پروژه شامل ساختمانی به ارتفاع ٢٥٦ متر است که در زیر پی رادیه آن ٦٤ شمع به قطر ١.٣ متر با طول های متغیر ٣٤.٩٠-٢٦.٩٠ متر استفاده شده است. ضخامت رادیه از ٣ متر الی ٦ متر متغیر است. این ساختمان مابین سالهای ١٩٩١-١٩٩٨ ساخته شده است. در شکل (١-٧) مشخصات هندسه پروژه اعم از ابعاد کلی پی و لایه خاک و تراز آب زیرزمینی و مکانهای ابزارگذاری شده جهت پایش رفتار پی اعم از نشست و باربری ارائه شده است. طبق محاسبات سهم شمع ها از کل بار اعمالی برابر ٦٠ درصد می باشد ولی در عمل با اندازه گیری این مقدار ٤٣ درصد بدست آمده است ارائه شده است[٨].

ج) پروژه TORHAUS DER MESSE

این پروژه شامل ساختمانی به ارتفاع ١٣٠ متر است که مابین سالهای ١٩٨٦-١٩٨٣ ساخته شده است و اولین سازه ای در آلمان است که از پی شمع-رادیه در آن استفاده شده است. در زیر پی رادیه آن از ٨٤ شمع به قطر ٠,٩ متر با طول ٢٠ متر در زیر رادیه ای به ابعاد ١٧.٥ متر× ٢٤.٥ متر و به ضخامت ٢.٥ متر استفاده شده است. پی این سازه از ٢ پی شمع-رادیه جداگانه با فاصله ١٠ متر تشکیل شده است.

در شکل (۱–۸) مشخصات هندسه پروژه اعم از ابعاد کلی پی و لایه خاک و تراز آب زیرزمینی و مکانهای ابزارگذاری شده جهت پایش رفتار پی اعم از نشست و باربری ارائه شده است. طبق محاسبات سهم شمع ها از کل بار اعمالی برابر ۷۶ درصد می باشد ولی در عمل با اندازه گیری این مقدار ۶۷ درصد بدست آمده است.

با توجه به نتایج این ۳ پروژه ملاحضه می شود که در هر ۳ پروژه مقدار باربری رادیه بیشتر از مقدار پیش بینی شده می باشد و در مورد شمع ها شرایط برعکس می باشد ارائه شده است[۸].

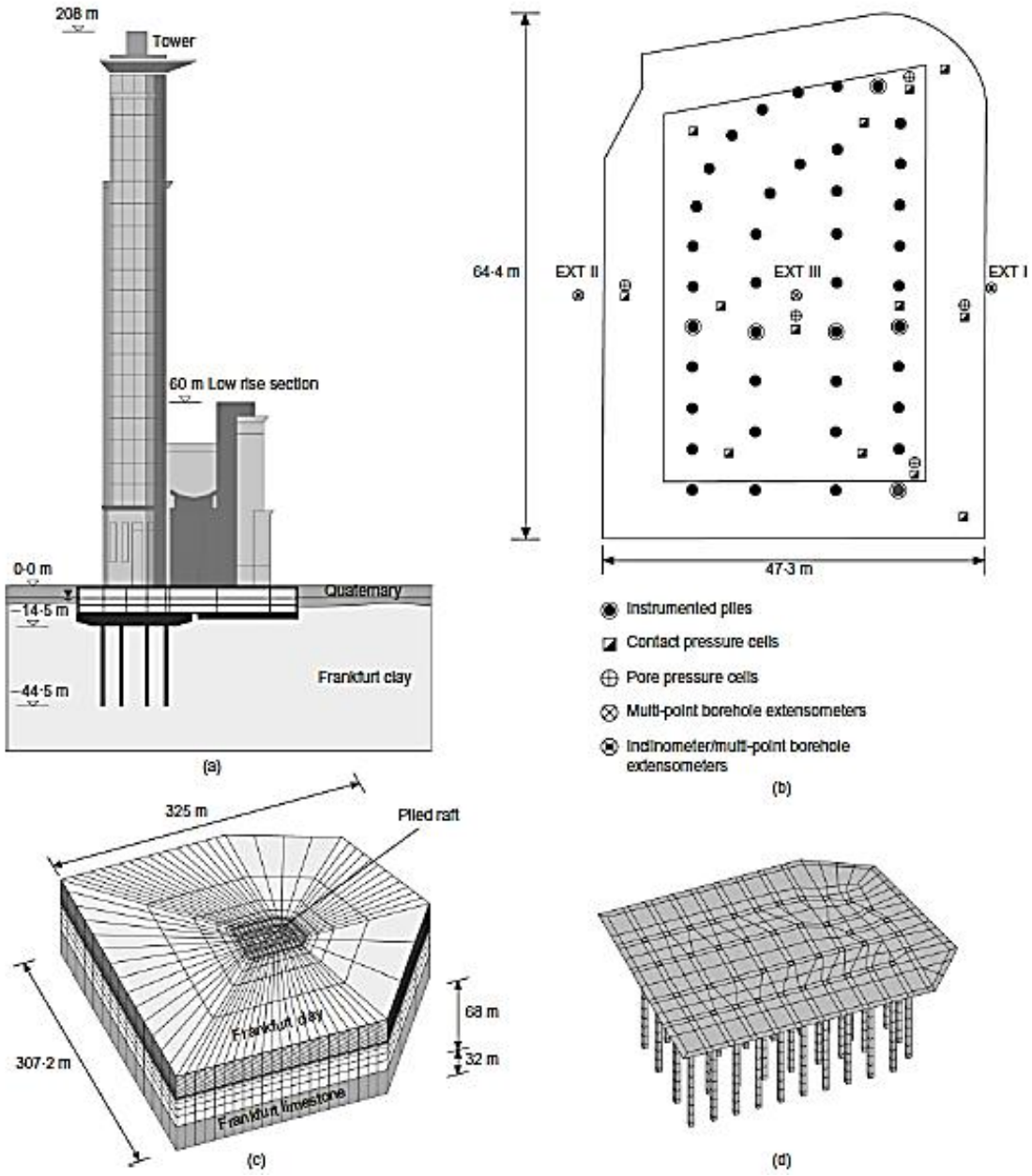
Building	References	H: m	P_{eff}: MN	A: m^2	t_r: m	z_r: m	n	L_p: m	D_p: m	n_{ip}	P_p: MN	s: mm	t: years
American Express	Rollberg & Gilbert (1993); Reul (2000)	75	723	3575	2·0	14·0	35	20·0	0·9	6	2·7–5·1	55	1·0†
Congress Centre	Barth & Reul (1997); Reul (2000)	52	1440	10200	2·7	14·2	141	12·5–34·5	1·3	12	2·4–5·9	58	0
Eurotheum	Katzenbach *et al.* (1998); Moormann (2000)	110	425	1893	2·5	13·0	25	25·0–30·0	1·5	4	2·6–4·7	29	1·0†
Forum-Kastor	Lutz *et al.* (1996); Ripper & El Mossallamy (1999)	95	750	2830	3·0	13·5	26	20·0–30·0	1·3	3	5·0–12·6	55	0†
Forum-Pollux	Lutz *et al.* (1996); Ripper & El Mossallamy (1999)	130	760	1920	3·0	13·5	22	30·0	1·3	3	7·4–11·7	70	0†
Japan Centre	Lutz *et al.* (1996); Ripper & El Mossallamy (1999)	115	630	1920	3·5	15·8	25	22·0	1·3	6	7·9–13·8	65	0·5†
Main Tower	Katzenbach *et al.* (1998); Moormann (2000)	199	1470	3800	3·8	21	112	30·0	1·5	17	1·4–8·0	25	0
Messeturm	Sommer *et al.* (1990, 1991); Sommer & Hoffmann (1991a, b); Sommer (1993); Reul (2000)	256	1570	3457	6·0	14·0	64	26·9–34·9	1·3	12	5·8–20·1	144	8
Torhaus	Sommer (1986, 1991); Sommer *et al.* (1984, 1985)	130	2 × 200	2 × 429	2·5	3·0	2 × 42	20·0	0·9	6	1·7–6·9	140	2
Westend 1	Franke & Lutz (1994); Lutz *et al.* (1996); Wittmann & Ripper (1990)	208	950	2940	4·7	14·5	40	30·0	1·3	6	9·2–14·9	120	2·5†
Haus der Wirtschaft, Offenbach*	Reul (2000)	68	605	5120	2·0	8·5	47 6	25·0 37·5–41·0	1·2	6	1·4–3·1	25	0

H, height of the building; P_{eff}, effective load (settlement-inducing total load minus uplift); A, area of raft; t_r, maximum thickness of raft; z_r, maximum depth of raft below ground level; n, number of piles; L_p, pile length; D_p, pile diameter; n_{ip}, number of instrumented piles; P_p, measured pile load resistance; s, maximum measured settlement; t, time of settlement measurement after completion of construction of building.

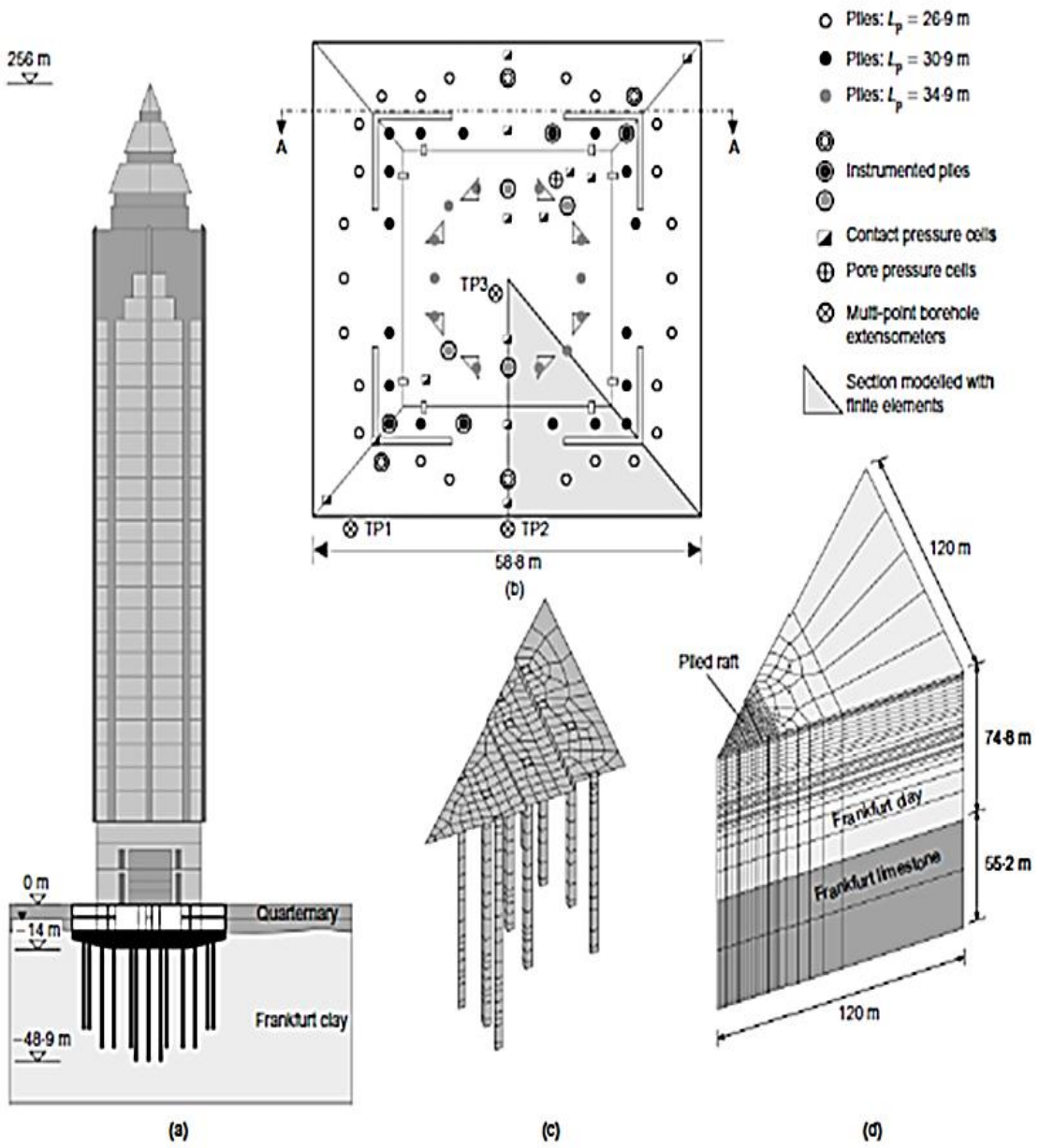
* Foundation in Rupel clay.

† Indicates completion of shell only.

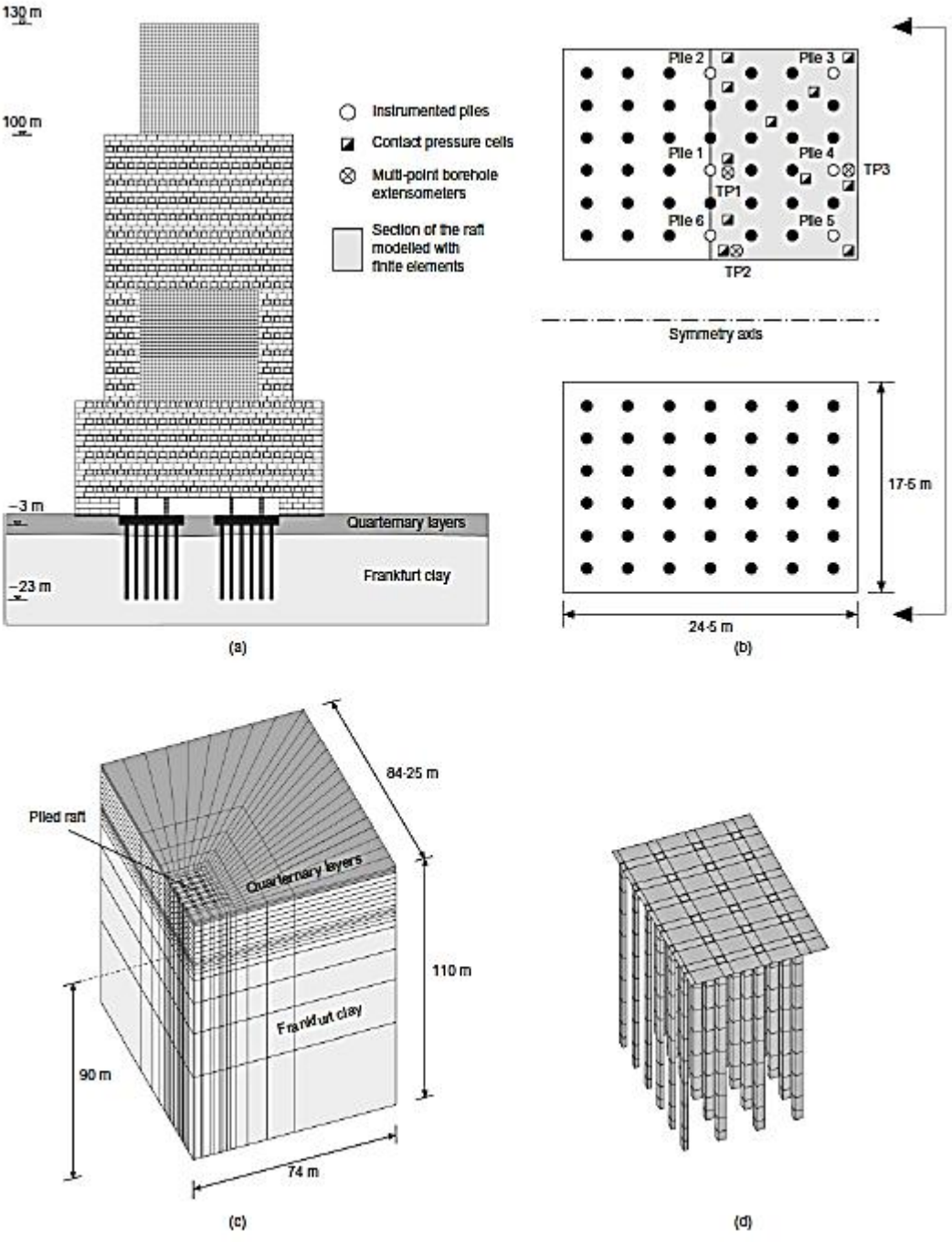
جدول ۱–۱ پروژه های اجراشده با شالوده شمع– رادیه در فرانکفورت آلمان



شکل ۱-٦- پروژه westend واقع در فرانکفورت آلمان



شکل ۱–۷– پروژه eturumMess واقع در فرانکفورت آلمان

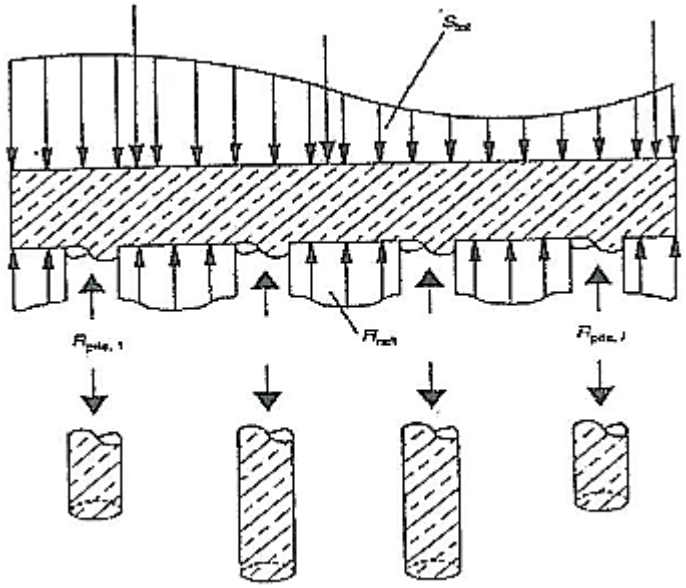


شکل ۱–۸– پروژه Torhaus Der Messe واقع در فرانکفورت آلمان

۱-٤- مفهوم پی شمع-رادیه:

۱-٤-۱- تعاریف و اصطلاحات

پی های شمع-رادیه متشکل از ۳ عضو باربر؛ شمع-رادیه-خاک می باشند. بار اعمالی از روسازه (S_{tot}) بر رادیه توسط رادیه (R_{raft}) و شمع های زیر رادیه ($\sum R_{pile}$) به خاک منتقل می شود(شکل ۱-۹) ارائه شده است[۸].



شکل ۱-۹ اجزای پی شمع-رادیه

برای باربری پی شمع-رادیه (R_{tot}) مطابق رابطه ۱-۱ داریم:

$$R_{tot} = R_{raft} + \sum_{i=1}^{n} R_{pile,i} \geq S_{tot} \qquad ۱-۱$$

S_{tot} = بار اعمالی از روسازه به پی

R_{raft} = سهم باربری رادیه

$R_{i,pile}$ = سهم باربری شمع i ام

n = تعداد شمع های استفاده شده در زیر رادیه

R_{tot} = باربری کل پی شمع–رادیه

طبق نظر آیین نامه Euro Code Ec[۷] ظرفیت باربری پی های شمع–رادیه از کل بار اعمالی از طرف روسازه باید بیشتر باشد(نامساوی موجود در رابطه ۱–۱ به این دلیل است). در اغلب سازه های موجود بار اعمالی از سازه توسط شمع یا رادیه به خاک یا زیرسازه منتقل می شود و فونداسیون، باید بار اعمالی را با یک ضریب اطمینان مناسب و بدون ایجاد مشکلاتی مانند؛ نشست زیاد از حد یا به خطر افتادن پایداری پی و در نتیجه روسازه؛ به خاک انتقال دهد. برای مثال آیین نامه آلمان حداقل ضریب اطمینان فوق الذکر را برای پی های شمع–رادیه برابر ۲ در نظر می گیرد. برای طراحی پی شمع–رادیه و تعیین درصد باربری شمع و رادیه از بار اعمالی بر پی شمع–رادیه، شناخت و فهم دقیق تری از اندرکنش مابین سازه و خاک لازم می باشد. در نظر گرفتن و شناخت دقیق اندرکنش مابین شمع و رادیه منجر به طراحی درست و محاسبه دقیق تر ظرفیت باربری و نشست های پی خواهد شد.

برای نسبت باربری شمع ها در پی های شمع–رادیه ضریبی به نام ضریب شمع–رادیه α_{pr} بصورت زیر تعریف می شود.

$$\alpha_{pr} = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_{pile,i}}{R_{tot}} \qquad ۲–۱$$