اندرکنش ژئوتکنیکی پی‌های گسترده و گروه شمع، ارزیابی دو مورد عملی

مهدی ویس کرمی*، ابوالفضل اسلامی**، ملک‌محمد رنجبر** و طه ریاضی***

گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه شیراز

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان

(دریافت مقاله: ۸۴/۱/۸- دریافت نسخه نهایی: ۸۶/۱/۲۵)

چکیده – در طراحی فونداسیونها، در صورت مواجهه با بارهای سنگین سازه‌ای، کاملترین گزینه، استفاده از تلفیق دو سیستم رادیه و گروه شمع است که اصطلاحا "پی‌های رادیه‌ی مرکب" خوانده می‌شود. از آنجا که رفتار مجموعه از نوع رفتار اندرکنشی بین خاک، شمع و پی گسترده است، تحلیل آنها پیچیده است، تا کنون روشهای متعددی در تحلیل توان باربری و توزیع نیروها بین اجزای این سیستمها، پیشنهاد شده است. این روشها مشتمل بر روشهای دستی و رایانه‌اند. در اغلب این روشها عموماً از توان باربری رادیه، که سهم قابل توجهی را دارا است، صرف‌نظر می‌شود. همچنین تعیین پارامترهای مورد استفاده در این روشها مانند سختی رادیه یا گروه شمع، در عمل با مشکلات فراوانی توام است یا گاه ناممکن است. در این مقاله پس از معرفی روشهای ارائه شده توسط محققان، روشی برای تحلیل ظرفیت باربری و توزیع نیروها بین رادیه و گروه شمع بر اساس تحلیل نشست و عملکرد اندرکنشی به صورت بلوک معادل، پیشنهاد شده است. در این حالت با معرفی صفحه‌یی که در آن نشست گروه شمع و خاک اطراف یکسان می‌شوند، به نام صفحه خنثی، تحلیل نشست مجموعه صورت می‌پذیرد. در انتها با استفاده از این روش و روشهای دیگر دو مثال عملی، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته‌اند. بررسیها، نتایج مطلوبی را برای روش پیشنهادی نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی : پی‌های سطحی، پی‌های رادیه‌ی، اندرکنش رادیه و گروه شمع، نشست، توان باربری

Geotechnical Interaction of Piled Raft Foundations: Two Case Studies

M. Veis Karami, A. Eslami, M. M. Ranjbar and T. Riyazi

Dept. of Civil Eng., Shiraz University

Dept. of Civil Eng., University of Guilan

Abstract: *Application of pile-raft foundations, which are known as "compound foundations", is a suitable alternative in the case of heavy load structures. The interaction behavior of pile raft foundations makes these systems very complex to analyze.*

* – دانشجوی دکترا ** – دانشیار *** – کارشناس ارشد

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]

Different methods have been proposed to determine the bearing capacity of piled raft systems and distribution of loads between the components, i.e., pile group and mat. These methods are generally categorized into computer-based and conventional methods. In most of these methods, the bearing capacity of the mat, which is often a great portion of the total capacity, is neglected. Also, some model parameters used in these methods, as well as pile group or raft stiffness, cannot be determined by routine tests or calculations. In this study, a number of recent analytical methods of piled raft system are presented. A new method is then proposed which is based on settlement analysis of piled raft foundation and distribution of load between pile group and mat foundation, which regards the interaction of compound systems as an equivalent block foundation. In this approach, settlement is computed based on the concept of neutral plane according to which relative settlement of soil and pile group become the same. Two practical case studies are implemented for validation of the method. The comparison demonstrates favorable results for the proposed method.

Keywords: ***Shallow foundations, Mat foundations, Piled raft interaction, Settlement, Bearing capacity.***

۱- مقدمه

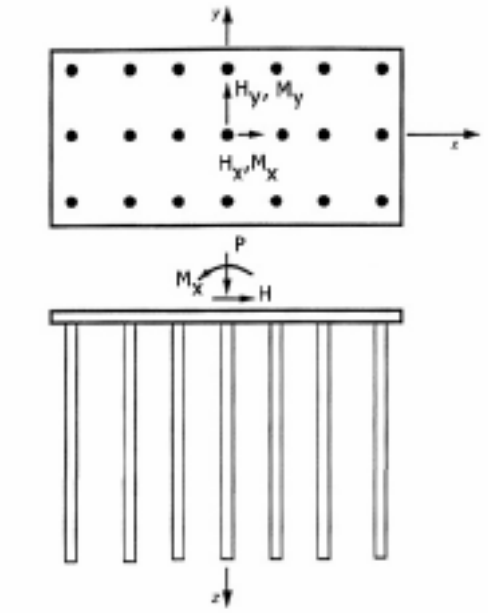
تعیین ظرفیت باربری[۱]، براورد نشست، تحلیل پایداری[۲] (در صورت لزوم) و طراحی سازه‌یی و ملاحظات اجرایی و اقتصادی پنج معیار عمده‌ی طراحی پی‌ها هستند که معمولاً در سه مورد نخست، مهندسین ژئوتکنیک نقش عمده‌یی را به عهده دارند. در اولین مرحله‌ی طراحی ابعاد پلان پی با استفاده از معیارهای موجود در تعیین توان باربری خاک و همچنین کنترل نشست پی مشخص می‌شود. کنترل نشست در پی‌های سطحی بیش از پی‌های عمیق مورد توجه است، تا آنجا که کنترل نشست، معیار اصلی طراحی پی‌های سطحی است [۱ و۲].

در مواجهه با بارهای سنگین سازه‌ای ابتدا پی‌های رادیه[۳] مورد نظر طراحان قرار می‌گیرند. اگرچه سیستم رادیه از کاملترین انواع پی‌های سطحی است، اما به دلیل داشتن ابعاد قابل توجه اعماق زیادی را تحت تاثیر تنش قرار می‌دهد و این امر منجر به وقوع نشستهای قابل توجه در سیستم می‌شود. به همین منظور و به جهت تقویت عملکرد پی‌های رادیه در مورد بارهای سنگین، پروژه‌های حساس به نشست و زمینهای مسئله‌دار و تراکم‌پذیر، می‌توان از سیستمهای رادیه شناور[۴]، بهسازی خاک زیر پی و در نهایت از کاملترین سیستمهای پی‌سازی یعنی رادیه و گروه شمع بهره جست. در حالت اخیر، علاوه بر افزایش توان باربری، نشست پی نیز کاهش می‌یابد. سیستمهای مرکب رادیه و گروه شمع از آن روی "سیستم" خوانده می‌شوند که در آنها اندرکنشهای مختلفی بین اجزای سیستم وجود دارد. این اندرکنشها عبارت‌اند از اندرکنش رادیه و گروه شمع، اندرکنش رادیه و خاک، اندرکنش شمع و خاک و اندرکنش شمعها با یکدیگر. با این تعریف، هرگاه از سیستم رادیه و گروه شمع نام برده می‌شود، منظور این است که هم پی رادیه و هم گروه شمع در باربری کلی زیرسازه ایفای نقش می‌کنند و از قابلیت هیچ‌یک از آنها در این خصوص صرف نظر نمی‌شود. ایده تلفیق پی‌های رادیه و گروه شمع، ایده‌ای نوین در مهندسی ژئوتکنیک است که توسط محققان بسیاری پیشنهاد شده است [۳ - ۶].

در تحلیل سیستمهای مرکب رادیه و شمع روشهای مختلفی وجود دارد که از جمله‌ی آنها می‌توان از روش رادیه‌ی صلب و غیر صلب (انعطاف‌پذیر) استفاده کرد. از روشهای غیر صلب می‌توان به روشهای عددی و اجزای محدودی و نرم‌افزارهای معمول اشاره کرد. در هر یک از این روشها فرضیاتی برای تحلیل نیروها و توزیع آنها در اجزای سیستم وجود دارد.

در این مقاله هدف بررسی روشهای موجود در تحلیل و طراحی سیستمهای رادیه و گروه شمع است که در نهایت پس از بررسی روشهای مورد استفاده جاری و مرسوم در این زمینه، روش پیشنهادی بر پایه ملاحظه‌ی توان باربری و نشست به عنوان پدیده‌های اندرکنشی و یا استفاده از سیستم فونداسیون بلوکی[۵] معادل ارائه شده‌اند. پس از معرفی و شرح این روشها سه مورد عملی از طرح و اجرای سیستمهای رادیه و گروه شمع در نقاط مختلف دنیا معرفی شده‌اند و تحلیل و طراحی آنها با این روشها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]



شکل ۱- نمایش سیستم مرکب رادیه و گروه شمع

۲- ملاحظات کلی طراحی سیستمهای مرکب رادیه و گروه شمع

شکل (۱) تصویری شماتیک را از یک سیستم مرکب رادیه و گروه شمع نشان می‌دهد. در این شکل نیروها و ممانهای وارد بر سیستم مشخص شده‌اند. چنین سیستم مرکبی باید برای معیارهای زیر طراحی شود:

الف – حداکثر ظرفیت باربری ژئوتکنیکی تحت اثر بارهای قائم، افقی و ممانها؛

ب – کنترل نشست بیشینه‌ی کل سیستم و تامین سختی لازم؛

ج – کنترل نشستهای نایکنواخت؛

د – کنترل پایداری سیستم و تامین سختی جانبی آن؛

ه – طراحی سازه‌ای رادیه و شمعها؛

و – بهینه بودن سیستم انتخابی از نظر اجرایی و اقتصادی.

تعیین ظرفیت باربری این سیستمها به دو صورت قابل انجام است: اینکه از یک ضریب اطمینان کلی برای سیستم استفاده شود (روش تنشهای مجاز) و یا اینکه طراحی در حالت حدی انجام پذیرد (روش حالت حدی طراحی[۶]). کنترل نشست و چرخش سیستم نیز قطع نظر از روش کلی طراحی، باید به گونه‌یی انجام شود که مقادیر آنها از مقادیر مجاز بیشتر نشود. مقادیر مجاز نشست فونداسیونها و چرخشهای مجاز[۷] به نوع سازه بستگی داشته، در آیین‌نامه‌های معتبر و کتب طراحی موجود است [۴ و ۷].

برای طراحی پی‌های مرکب سه روند طراحی کلی توسط راندولف[۸] پیشنهاد شده است. این سه روند عبارت‌اند از:

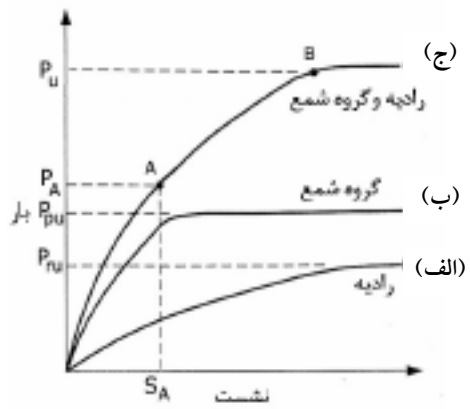
الف – روش سنتی[۹]: در این روش شمعها برای بخش عمده‌ی بارهای وارده طراحی می‌شوند در حالی‌که رادیه سهم بسیار کمی در باربری کل سیستم خواهد داشت.

ب – روش شمع خزشی[۱۰]: در این روش شمعها برای بارهای سرویس طراحی می‌شوند، بدین صورت که تحت اثر بارهای سرویس تسلیم می‌شوند و شروع به حرکت می‌کنند. این حرکت در باری معادل با حدود ٪۷۰ تا ٪۸۰ ظرفیت باربری نهایی شروع می‌شود. بدین ترتیب فشار زیر رادیه کاهش می‌یابد، به طوری‌که تنش وارده بر خاک در زیر رادیه به کمتر از مقدار تنش پی‌تحکیمی خاک رسیده، نشست بسیار کم می‌شود.

ج – روش کنترل نشست نایکنواخت: شمعها در این روش با آرایش خاصی در زیر رادیه تعبیه می‌شوند، به طوری‌که علاوه بر افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست کلی سیستم، از بروز نشست نایکنواخت کل سیستم جلوگیری کنند. مثالی از این روش طراحی برج ایفل در مجاورت رودخانه‌ی سن در فرانسه است که برای پایه‌های پیشین برج در بستر رودخانه از سیستم مرکب رادیه و شمع استفاده شده است، در حالی‌که پایه‌های عقب تنها بر یک پی سطحی قرار دارند و این امر برای جلوگیری از نشست نایکنواخت و دوران سیستم است [۸].

شکل (۲) رفتار اندرکنشی[۱۱] سیستمهای مرکب رادیه و شمع[۱۲] را از نظر ژئوتکنیکی نشان می‌دهد. در این حالت منحنی (الف) نمایانگر رفتار فونداسیون رادیه‌ی منفرد است که در آن نشست نسبتاً قابل توجهی به وقوع می‌پیوندد. منحنی (ب) رفتار گروه شمع تنها را در مقابل بارهای وارده

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]



شکل ۲ - رفتار اندرکنشی و نمودارهای بار- نشست پی‌های رادیه و گروه شمع

نمایش می‌دهد. در این حالت، گروه شمع پس از رسیدن به ظرفیت باربری نهایی خود دچار تسلیم می‌شود. استفاده از واژه‌ی تسلیم به جای گسیختگی بدین علت است که در حقیقت با افزایش جابه‌جایی شمعها در باری بیش از حد نهایی گروه شمع، سیستم دچار ناپایداری نمی‌شود و نشست شمعها در یک سیستم مرکب منجر به‌کارگیری کامل مقاومت کف رادیه می‌شود. منظور از واژه‌ی "تسلیم" در کاربرد اخیر آن، جابه‌جایی کنترل نشده سیستم، اعم از گروه شمع یا رادیه است. در منحنی (ج) رفتار اندرکنشی و توام رادیه و گروه شمع نشان داده شده است. در این منحنی اجزای سیستم به طور همزمان در برابر بارهای وارده مقاومت می‌کنند و هر یک سهمی از باربری را به خود اختصاص می‌دهند. پس از تسلیم یکی از اجزا، جزء دیگر وارد عمل می‌شود و تا حد نهایی مقاومت خود بارهای وارده را حمل می‌کند و بدین ترتیب مقاومت سیستم به مقدار بسیار زیادی افزایش می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود منحنی (ج) مقدار بار نهایی سیستم (P_u) بیش از بار نهایی رادیه‌ی تنها (P_{ru}) یا بار نهایی گروه شمع تنها (P_{pu}) است [۴].

حال در صورتی که تعداد شمعها در حد بهینه باشد، توزیع بار بین رادیه و شمعها به گونه‌ای است که رادیه و شمعها تقریباً همزمان به مرحله‌ی تسلیم می‌رسند و در این حالت طراحی بهینه است. در غیر این صورت، هرگاه تعداد شمعها بیش از حد بهینه باشد، سهم باربری شمعها زیاد می‌شود و توان باربری رادیه به کار گرفته نخواهد شد. در این حالت نشستها خیلی کم هستند و ضریب اطمینان کلی سیستم بسیار بالاست و طرح غیر اقتصادی خواهد بود. بالعکس، هرگاه تعداد شمعها کمتر از تعداد بهینه باشد، شمعها در بارهای کم تسلیم می‌شوند و ظرفیت باربری کلی سیستم پایین می‌آید و نشست آن افزایش خواهد یافت. گاه به این طراحی، طراحی "شمع خزشی" گفته می‌شود و هدف از آن تقویت جزیی رادیه و کاهش نشست است [۴ و ۵].

اصولاً بر اساس توصیه پولوس[۱۳] (۱۹۹۱) بیشترین کاربرد پی‌های مرکب زمانی است که رادیه می‌تواند ظرفیت باربری کلی زیرسازه را تامین کند، اما برای اجتناب از نشستهای بیش از مقادیر مجاز از تعدادی شمع در زیر آن استفاده می‌شود. در صورت وجود پروفیل خاک دارای رسهای سفت و سخت یا خاکهای ماسه‌ای و درشت‌دانه، رادیه خود به تنهایی قادر به تامین ظرفیت باربری است. اما در مواجهه با خاکهای دارای رس نرم، ماسه‌های شل در لایه‌های سطحی و خاکهای مستعد نشست و تورم، پدیده‌هایی چون نشستهای آنی و تحکیمی خاک و همچنین تورم و افزایش حجم خاک، کارایی رادیه را کم می‌کند. قابل ذکر است که در یک تنش یکسان، مقدار نشست پی‌های رادیه بیش از پی‌های منفرد است، زیرا به دلیل ابعاد بزرگتر، اعماق بیشتری را تحت تنش قرار می‌دهد. به همین دلیل استفاده از گروه شمع در کاهش نشست کلی سیستمهای مرکب بسیار حایز اهمیت است [۴ و ۸].

به طور ساده‌تر می‌توان نشست یک پی را با معادله کلی زیر نشان داد:

$$S = KqB \qquad (۱)$$

که

K: سختی خاک؛

q: تنش تماسی خاک و پی؛

B: عرض پی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]

هستند بنا بر توضیحات فوق‌الذکر، در صورت ثابت بودن دو پارامتر K و q برای دو فونداسیون خاص، فونداسیون با عرض بیشتر، نشست بیشتری خواهد داشت [۱ و ۲].

۳- تحلیل و طراحی ژئوتکنیکی پی‌های مرکب رادیه و گروه شمع به روش معمول

برخی مهندسان ترجیح می‌دهند که از ظرفیت باربری رادیه در طراحی ژئوتکنیکی صرف‌نظر کرده، کل بار را برای طراحی شمعها در نظر بگیرند. در این حالت رادیه تنها به عنوان یک سر شمع عمل می‌کند و این روند طراحی غیر اقتصادی است. ذکر این نکته قابل توجه است که برای به کارگیری ظرفیت باربری جداری شمعها، اندکی جابه‌جایی در حدود 1mm تا 2mm کافی است [۱۰]. در صورتی که در کف شمعها و پی‌های سطحی جابه‌جایی بیشتری برای رسیدن به حداکثر ظرفیت باربری لازم است. این نکته از این روی قابل اهمیت است که در طراحی پی‌های مرکب، باید دقت داشت که در صورتی که تعداد شمعها بیش از اندازه زیاد نباشد، باربری سیستم ابتدا توسط شمعها انجام می‌شود و سپس رادیه وارد عمل می‌شود. چنین حالتی یعنی تسلیم شمعها قبل از رادیه، در شکل (۲) به وضوح نمایان است. بنابراین در صورتی که تعداد شمعها بیش از اندازه زیاد نباشند، می‌توان از رادیه نیز انتظار باربری داشت و در این صورت رادیه می‌تواند سهم قابل توجهی از بار را به خود اختصاص دهد، ضمن اینکه، طراحی نیز از نظر گسیختگی کل سیستم، ایمن و قابل اعتماد خواهد بود. پس با این تفاسیر صرف‌نظر کردن از ظرفیت باربری رادیه در سیستمهای مرکب به یک طرح غیر اقتصادی می‌انجامد. تنها نکته‌ی مهم در تحلیل سیستمهای مرکبی که سهم باربری رادیه نیز در آنها در نظر گرفته می‌شود این است که به دلیل تسلیم شمعها، از آنجا که برای استفاده از ظرفیت باربری رادیه، تغییر شکلهای نسبتاً بزرگی نیاز خواهد بود، نشست کلی سیستم ممکن است به مقادیری بیش از مقدار مجاز میل کند. بنابراین در چنین سیستمهایی براورد نشست کلی سیستم و در حقیقت نشست گروه شمع بسیار حایز اهمیت است. چرا که شمعها پس از تسلیم، جابه‌جایی‌های بزرگی را می‌توانند متحمل شوند و برای همین باید تحلیل نشست، به خصوص برای شمعهای اصطکاکی بیش از شمعهای اتکایی، صورت پذیرد.

دو بحث اخیر، یعنی تحلیل ظرفیت باربری و نشست، سیستمهای مرکب که به طور همزمان باید در طراحیها مد نظر قرار گیرند، توسط برخی محققان مورد بررسی قرار گرفته است و روشهای متفاوتی برای تحلیل و طراحی ژئوتکنیکی آن پیشنهاد شده است. در ادامه هر یک از این دو بحث مورد تدقیق قرار می‌گیرند.

۳-۱- تحلیل ظرفیت باربری سیستمهای مرکب رادیه و شمع

برای تحلیل ظرفیت باربری این سیستمها، فرضیات و روشهای متعددی وجود دارد. از اولین روشها روشی دستی‌ای است که توسط پرلوس و دیویس پیشنهاد شده است [۱۱]. اما روشی که در برگیرنده همه روشهای دیگر و در حقیقت از جمله کاملترین روشهاست، با این فرضیات است که اولاً توزیع بار بین شمعها از روش تقریبی راندولف به دست می‌آید [۱۲] و رفتار بار نشست رادیه و شمع نیز به صورت سهموی، شکل (۲)، منظور می‌شود که البته می‌توان این منحنی را با سه قسمت خطی تقریب زد. بر اساس رفتار نشان داده شده در شکل (۲)، نشست کلی سیستم تا نقطه‌ی A از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \frac{P}{K_{pr}} \qquad (۲)$$

که در آن S، نشست کلی سیستم، P، کل بار وارده و K_{pr}، سختی سیستم رادیه و شمع است. پس از این نقطه بار تنها توسط رادیه تحمل می‌شود و نشست با معادله زیر تعیین می‌شود:

$$S = \frac{P_A}{K_{pr}} + \frac{P - P_A}{K_r} \qquad (۳)$$

که در این معادله

K_r، سختی محوری پی رادیه؛

P_A، بار قائمی که کل ظرفیت باربری شمعها را به کار می‌گیرد؛

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]

هستند. اما بار P_A بر اساس بار نهایی شمعها قابل محاسبه است:

$$P_A = \frac{P_{pu}}{\beta_p} \qquad (۵)$$

که:

P_{pu}، ظرفیت باربری نهایی شمعها (شمع تک یا مود گسیختگی کلی (بلوک)، هر یک که کمتر باشند)؛

β_p، سهم بار شمعها؛

هستند. بدین ترتیب از معادلات راندولف در محاسبه K_{pr} در معادلات فوق، معادله‌ی زیر به دست می‌آید:

$$K_{pr} = XK_p \qquad (۶)$$

که K_p بیانگر سختی گروه شمع به تنهایی است. برای تعداد معتنا بهی از شمعها X به صورت زیر خواهد بود:

$$X \cong \frac{1-0.6(K_r/K_p)}{1-0.64(K_r/K_p)} \qquad (۷)$$

$$\beta_p = \frac{1}{1+a}$$
$$a = \frac{0.2}{1-0.8(K_r/K_p)}\left(\frac{K_r}{K_p}\right) \qquad (۸)$$

در این معادلات K_p سختی گروه شمع است. بدین ترتیب سختی گروه شمع و سختی رادیه به صورت زیر محاسبه خواهند شد:

$$K_p = K_{pi}(1-R_{fp}P_p/P_{pu}) \qquad (۹)$$

$$K_r = K_{ri}(1-R_{fr}P_r/P_{ru}) \qquad (۱۰)$$

با جاگذاری معادلات (۴) تا (۱۰) در معادلات (۲) و (۳)، معادله بار- نشست رادیه و شمعها به صورت زیر به دست می‌آید:

$$S = \frac{P}{XK_{pi}\left(1-\frac{R_{fp}\beta_p P}{P_{pu}}\right)} \qquad (۱۱)$$

در معادلات اخیر، P_p، بار گروه شمع، P_r، بار رادیه و P، کل بار سیستم است.

همان‌طور که در این معادله نیز مشهود است، رابطه نشست و بار وارده به صورت یک سهمی است. این معادلات برای براورد نشستهای آنی و بلندمدت این سیستمها استفاده می‌شوند.

برای نشست کوتاه مدت پارامترهای زهکشی نشده خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند و برای نشستهای بلند مدت، سختیهای رادیه و گروه شمع برای حالت زهکشی شده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

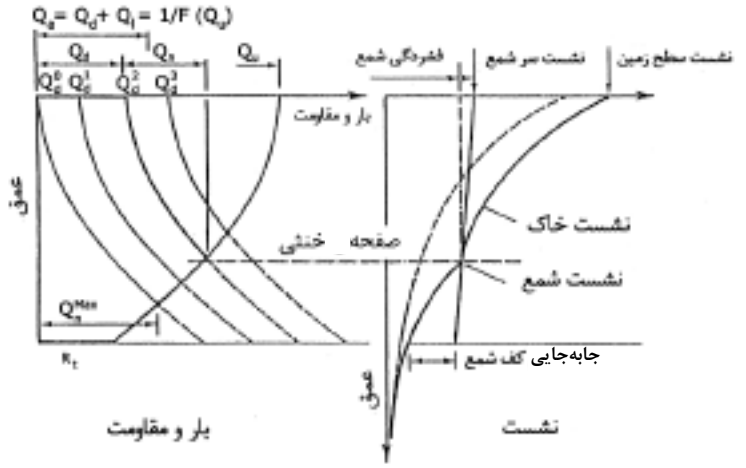
نکته‌ی حایز اهمیت در این روش که یکی از جدیدترین روشهای نظری در رابطه با تحلیل فونداسیونهای مرکب است این است که پارامترهای این روش اگرچه در محاسبه نیروهای داخلی موثر و دقیق‌اند، اما به سادگی قابل تعیین نیستند. به عنوان مثال برای تعیین سختی رادیه (K_r) یا سختی گروه شمع (K_p) روش دقیق و قابل اعتمادی وجود ندارد یا تعیین این مقادیر مستلزم صرف هزینه‌های بسیار هنگفت آزمایشهای درجا در محل است.

۳-۲- تحلیل نشست

در براورد نشست این سیستمها، همان‌طور که اشاره شده، نشست گروه شمع بسیار حایز اهمیت است، زیرا با اندک جابه‌جایی شمعها، کل مقاومت جداری بسیج شده، سیستم شروع به حرکت می‌کند، در حالی‌که برای تسلیم رادیه، جابه‌جاییهای قابل توجهی لازم است. همچنین پی‌های رادیه، اصولاً برای رسیدن به حد تسلیم، باید بارهای بسیار سنگینی را متحمل شوند و در حقیقت به لحاظ نظری و در عمل، رادیه‌ها دارای ظرفیت باربری ایمن (q_{safe}) بسیار بالایی‌اند [۱]. بنابراین در صورتی که نشست مورد ملاحظه قرار گیرد، بار مربوط به نشست مجاز، عموماً در مقادیر بسیار کمتر از ظرفیت باربری رادیه اتفاق می‌افتد و به همین دلیل می‌توان نشست را منحصراً برای گروه شمع مورد ملاحظه و محاسبه قرار داد.

محاسبه نشست گروه شمع، بر اساس تحلیل نشست در صفحه‌ای موسوم به صفحه‌ای خنثی انجام می‌شود. این صفحه محلی است که در آن جابه‌جایی شمع و خاک به عنوان یک سیستم اندرکنشی، نسبت به هم صفر می‌شوند. در حقیقت، پس از بارگذاری بر سیستم، شمع در خاک فرو رفته، مقاومت جداری آن برخاسته می‌شود. سپس خاک اطراف شمع بر اثر

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]



شکل ۳ - روش تعیین محل صفحه خنثی در شمعها

بارهای وارده، دچار نشست می‌شود و در این حالت در نـواحی فوقانی شمع، خاک نسبت به شمع دارای جابه‌جایی قـائم رو بـه پایین خواهد بود و اصطکاک جداری منفی اسـت، در حـالی‌کـه در قسمتهای تحتانی، این جابه‌جایی بر عکس اسـت. بـه همـین ترتیب نیروهای وارد بر شمع در زیر صفحه خنثی رو بـه بـالا و در بالای آن رو به پایین خواهد بود. در حقیقـت صـفحه خنثـی محلی است که در آن نیروهای رو بـه پـایین در شـمع، بـر اثـر بارهای وارده و اصطکاک جداری، با نیروهای رو به بـالا یعنـی، مقاومت احتمالی کـف و اصـطکاک جـداری مثبـت در نـواحی پایین شمع، برابر می‌شود. این محل، محل محاسبه نشست گروه شمع است. تعیین محل صفحه‌ی خنثـی بـه کمـک معادلـه زیـر انجام می‌شود و البته این صـفحه عمومـاً در ۱/۳ تـا ۲/۳ ارتفـاع شمع قرار دارد[۱۲].

$$Q_z = Q_d + \int_0^{z=l} r_z dz = Q_d + \int_0^{z=l} A_s(C' + \beta\sigma'_z)dz \qquad (۱۲)$$

$$Q_z = Q_t + \int_{z=D-l}^{D} r_z dz = Q_t + \int_{z=D-l}^{D} A_s(C' + \beta\sigma'_z)dz \qquad (۱۳)$$

در این معادلات:

Q_z: نیروی محور داخلی شمع؛

Q_d: بار مرده‌ی وارد بر شمع؛

Q_t: ظرفیت باربری نهایی کف شمع؛

A_s: مساحت واحد جداری شمع (در واحد طول) ؛

r_s، β و C: پارامترهای مقاومت جداری شمع؛

l و D: محل صفحه‌ی خنثی و طول شمع؛

هستند.

معادله (۱۲) برای وضعیت وجود اصـطکاک جـداری منفـی بر اثر نشست خاک اطـراف شـمع اسـت و معادلـه (۱۳) بـرای حالتی است که مقاومت ناشی از اصطکاک جداری به طور کامل فعال شده باشد. در صورتی کـه ایـن دو رابطـه برابـر قـرار داده شوند، مقدار l به دست می‌آید. ایـن امـر در شـکل (۳) نمـایش داده شده است.

با داشتن محل صفحه‌ی خنثی می‌تـوان بـا فـرض یـک رادیـه معادل برای گروه شمع در آن صـفحه، نشـست سیـستم را در محل صفحه خنثـی بـا اسـتفاده از معـادلات مرسـوم نشـست، محاسبه کرد.

۴- تحلیل و طراحی پی‌های مرکب رادیـه و گـروه شمع به روش جدید پیشنهادی

این روش که روش پیـشنهادی در ایـن پـژوهش اسـت، بـر مبنـای محاسـبات نشـست در صـفحه خنثـی و تحلیـل چنـد مرحله‌ای رادیه و شمعها قرار دارد. پیش از معرفی روش، برخی مقدمات لازم برای تبیین فرضیات روش عنوان می‌شوند.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]

۴-۱- بررسی حالات حدی ظرفیت باربری و نشست پی‌های مرکب

همان‌طور که پیشتر شرح داده شد، هرگاه سیستم مرکبی از یک رادیه تقویت شده با گروه شمع در نظر گرفته شود، چند حالت حدی برای این سیستم وجود دارد:

الف - تعداد شمعها بسیار کم

در صورتی که تعداد شمعهای تقویت‌کننده بسیار کم باشد، یعنی حالت حدی رادیه بدون شمع، با توجه به شکل (۳)، ملاحظه می‌شود که به دلیل افزایش بار وارد بر شمعها، محل صفحه خنثی بالاتر رفته، در حالت حدی، در تراز کف رادیه قرار می‌گیرد. یعنی منحنیهای بار- مقاومت در سمت چپ شکل، به سمت راست نمودار تغییر مکان می‌دهند تا جایی که صفحه خنثی در ترازی نزدیک به کف رادیه قرار گیرد. در این صورت نشست مجموعه با توجه به نمودار نشست، مقدار قابل توجهی خواهد داشت. در این حالت ظرفیت باربری شمعها به دلیل نشست زیاد، به طور کامل به کار گرفته می‌شود و برای بارهای سنگینتر، فقط رادیه در باربری مجموعه نقش خواهد داشت. در این حالت نیز افزایش بار به افزایش نشست رادیه و افزایش تنش زیر آن می‌انجامد در حالی که شمعها نقشی در باربری ایفا نمی‌کنند.

ب) تعداد شمعها بسیار زیاد

در ادامه‌ی حالت حدی فوق، در صورت افزایش شمعها، با فرض توزیع یکسان بار بین همه شمعهای گروه، سهم بار هر شمع کاهش می‌یابد. در این حالت با توجه به شکل (۳)، از آنجا که نمودار بار- مقاومت به دلیل کاهش سربار وارد بر شمعها به سمت منحنیهای سمت چپ میل می‌کند، تراز صفحه‌ی خنثی پایینتر می‌رود و در نتیجه در حالت حدی تعداد بسیار زیاد شمع، این صفحه به تراز کف شمعها منتقل می‌شود. در این صورت نشست مجموعه بسیار کاهش می‌یابد و به دلیل نشست کم، از آنجا که رادیه بر خلاف شمعها، برای به کارگیری توان باربری کامل نیازمند نشستهای قابل توجه است، لذا سهم باربری رادیه کاهش می‌یابد و به مقدار ناچیزی می‌رسد.

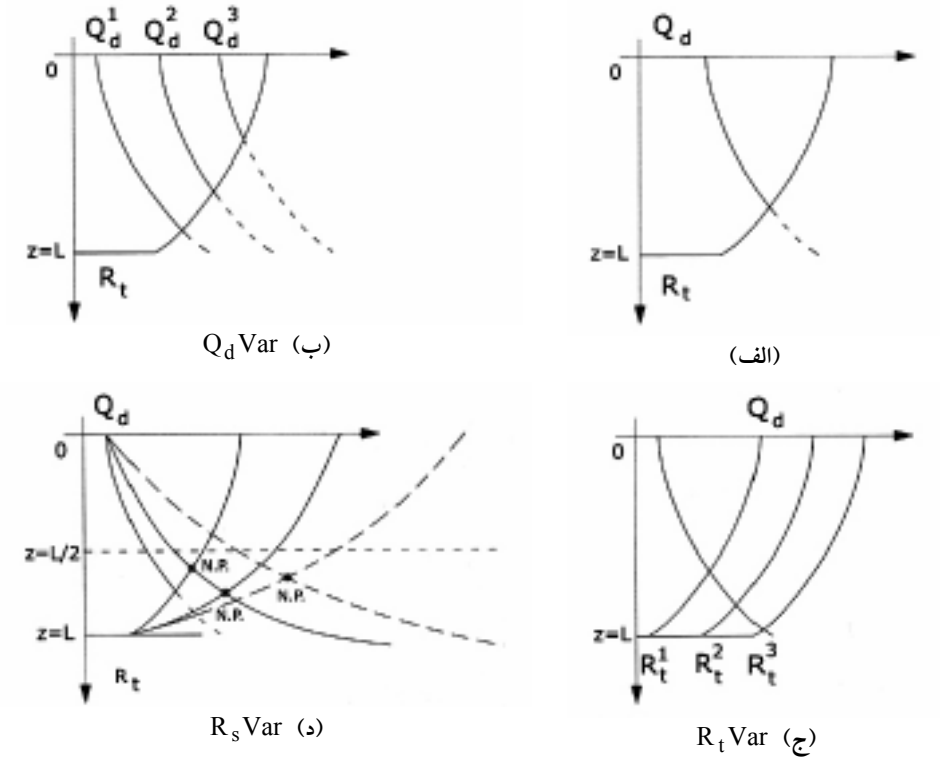
ج) تغییر هندسه‌ی شمعها

در هر یک از حالات فوق، در صورت ثابت بودن تعداد شمعها، با تغییر هندسه شمع نیز تحلیل مشابهی قابل انجام است. بدین صورت که هرگاه تعداد شمعها ثابت در نظر گرفته شود، با کاهش ابعاد هندسی شمعها، توان باربری آنها کاهش می‌یابد و در این صورت به دلیل کاهش مقاومت ژئوتکنیکی شمع، باز هم صفحه خنثی به ترازهای بالاتر منتقل می‌شود. در این حالت به دلیل نشستهای زیاد در ترازهای بالاتر قرارگیری صفحه خنثی، رادیه دارای سهم باربری بیشتر و شمعها دارای سهم باربری کمتری خواهند بود. بالعکس، با افزایش ابعاد هندسی شمعها و توان باربری آنها، همان‌گونه که از شکل (۳) پیداست، محل صفحه‌ی خنثی به سمت تراز کف شمعها پیش می‌رود و نشستهای مجموعه کاهش می‌یابند و در این حالت سهم باربری شمعها افزایش و سهم رادیه در باربری کاهش می‌یابد.

د) تغییرات مقاومت یا بار وارد بر گروه شمع

این مسئله که در تعیین محل صفحه‌ی خنثی و در نتیجه مقدار نشست گروه شمع بسیار مهم است، به چند صورت قابل بررسی است. شکل (۴)، حالات مختلف محل صفحه‌ی خنثی را با تغییرات مقادیر مقاومت یا بار وارد بر گروه شمع نشان می‌دهد. در شکل (۴- الف)، حالت کلی محل صفحه‌ی خنثی نمایش داده شده است. شکل (۴- ب)، تغییرات محل صفحه‌ی خنثی را با تغییرات بار وارد بر سر شمع نمایش می‌دهد. در این حالت، افزایش بار وارد بر سر شمع به تغییر محل صفحه‌ی خنثی به سمت اعماق سطحی می‌انجامد. در این حالت نشست بیشتری در گروه شمع و در نتیجه در کل مجموعه اتفاق می‌افتد. در شکل (۴- ج)، افزایش مقاومت کف شمع به حرکت صفحه خنثی به اعماق بیشتر منجر می‌شود. در این وضع

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]



(ب) $Q_d Var$

(الف)

(د) $R_s Var$

(ج) $R_t Var$

شکل ۴ - تغییرات محل صفحه خنثی با توجه به تغییرات مقادیر بار یا مقاومت شمع

نشست گروه شمع و در نتیجه نشست کلی سیستم کم می‌شود. در نهایت شکل (۴- د)، تغییرات محل صفحه خنثی را در حالتی که مقاومت جداری شمع تغییر کند نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل بر می‌آید، در صورت ثابت بودن مقاومت کف و بار وارد بر سر شمع، محل صفحه خنثی متاثر از مقادیر مقاومت کف و بار وارد بر سر شمع است. اما در حالات حدی، یعنی در حالتی که مقاومت جداری نسبت به مقاومت کف و بار وارد بر سر شمع بسیار بزرگتر باشد، می‌توان نشان داد که محل صفحه خنثی در حوالی وسط شمع قرار خواهد گرفت.

در تمام این حالات، فرض بر این است که توزیع نیروی اصطکاک منفی (یعنی نیروی از بالا به پایین)، مشابه با اصطکاک جداری مثبت (یعنی از پایین به بالا) باشد. در غیر این صورت، یعنی اگر عملکرد خاک در اصطکاک جداری منفی و مثبت، به هر دلیل متفاوت باشد، محل صفحه خنثی نیز دستخوش تغییراتی خواهد شد که از مجال بحث در این محدوده خارج است.

نتیجه اینکه تعداد شمع، نوع شمع و همچنین ابعاد هندسی آن و همچنین نحوه توزیع مقاومت شمع در کف و جداره، به طور قابل ملاحظه‌یی می‌توانند بر سهم باربری اجزای سیستم، توان باربری کل مجموعه و نشست کل تاثیر بگذارند. بنابر این، در حالت خاصی که مقاومت شمعها ثابت فرض شود، در صورتی که سهم بار گروه شمع بیشتر در نظر گرفته شود (افزایش بار وارد بر سرشمع) انتظار می‌رود که مجموعه دارای نشست قابل توجهی باشد، همین امر به افزایش نشست رادیه می‌انجامد و این افزایش نشست خود به خود بر بار حمل شده توسط رادیه تاثیر خواهد گذارد؛ یعنی رادیه با عملکردی اندرکنشی از افزایش بی‌رویه‌ی بار وارد بر گروه شمع جلوگیری می‌کند و بالعکس. همین مسئله مبنای روش تحلیل پی‌های مرکب در ادامه است. یعنی، در صورتی که بتوان، سهم باربری هر یک از اجزای سیستم را محاسبه کرد، مقادیر نشست هر یک از آنها نیز قابل محاسبه خواهند بود. اما در صورتی که سهم باربری هر یک از اجزا به طور دقیق مشخص شود، مقدار نشست به دست آمده از تحلیل نشست هر یک از دو جز رادیه

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]

و گروه شمع با یکدیگر برابر خواهد شد که دلیل آن سازگاری تغییرشکلهای کل مجموعه است. بنابراین در تحلیل سهم باربری اجزای مجموعه، یک نقطه‌ی قطعی وجود دارد و آن اینکه: "نشست هر یک از دو زیر سیستم با یکدیگر برابر و مساوی نشست کل مجموعه است." این نکته می‌تواند راهگشای تعیین سهم باربری هر یک از اجزای سیستم باشد.

در ادامه، روش پیشنهادی با در نظر گرفتن این نکته و چند فرض دیگر، روشی نوین را در تعیین سهم باربری ژئوتکنیکی هر یک از اجزای سیستمهای مرکب رادیه و گروه شمع پیش روی می‌نهد. بدین ترتیب انتخاب بهینه شمعها از نظر تعداد و ابعاد، انتخابی است که با کاهش معقول نشست، از توان باربری رادیه نیز تا حد امکان استفاده کند.

۴-۲- روند پیشنهادی تحلیل سیستمهای مرکب

بر اساس آنچه پیشتر اشاره شد، با فرض معلوم بودن سهم باربری رادیه و گروه شمع و فرض توزیع یکسان بار بین شمعها، می‌توان نشستهای این دو زیر مجموعه را مورد تحلیل قرار داد و در نهایت نشست هر یک از این دو نیز دارای مقادیر مشابهی خواهند بود. یک فرض اولیه با توجه به اندرکنشی بودن رفتار گروه شمع، این است که شمعها یکسان و با فواصل مشابه از یکدیگر قرار داده شوند و رادیه نیز از صلبیت مناسبی برای توزیع بار یکنواخت بین شمعها برخوردار است. اگرچه عدم صحت این شرط خللی بر کلیات روش وارد نمی‌سازد، اما تحلیل مجموعه را پیچیده‌تر می‌کند. قابل ذکر است که کنترل صلبیت رادیه می‌تواند با استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدودی انجام پذیرد. بدین صورت که شمعها همانند فنرهایی با سختی دلخواه ولی مشابه، در زیر رادیه قرار داده شوند و باری یکنواخت بر سطح رادیه اعمال شود. در این حالت در صورتی که نیروی به دست آمده در داخل فنرها در پایان تحلیل تا حد قابل قبولی از نظر طراحی، مشابه باشد، رادیه از صلبیت کافی برخوردار است. در روش پیشنهادی اخیر همچنین فرض می‌شود که رفتار بار- نشست رادیه و گروه شمع در سطوح و بازه‌های مختلف بارگذاری، تقریباً به صورت رابطه‌ای مستقیم باشد.

برای شروع، ابتدا منحنیهای بار- نشست و بار- مقاومت نشان داده شده در شکل (۴) مورد بازبینی قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه محل صفحه خنثی در گروه شمع، علاوه بر ظرفیت باربری ژئوتکنیکی شمعها، وابسته به شدت بار وارد بر سرشمع است، می‌توان چنین نتیجه گرفت که هرچه سهم باربری شمعها کمتر باشد، مطابق با شکل (۴)، محل صفحه‌ی خنثی[۱۴] پایینتر رفته، مقدار نشست کمتر می‌شود. در این حالت چون نشست کل سیستم برابر با نشست گروه شمع است، بنابراین رادیه نیز دارای نشست کمتری خواهد بود. در این حالت، متناسب با نشست رادیه، می‌توان سهم باربری آن را مورد محاسبه قرار داد و با سهمی که پیشتر برای گروه شمع در نظر گرفته شده است، کنترل کرد. هرگاه سهم باربری رادیه و گروه شمع مطابق با فرضیات اولیه در تعیین محل صفحه خنثی باشد، در این صورت تحلیل سیستم به درستی انجام شده است. در غیر آن، باید سهم باربری رادیه و گروه شمع را تغییر داده، بر این مبنا محاسبات را از اول صورت داد تا با به دست آوردن نشستی برابر در رادیه و گروه شمع، سهم باربری هر یک به درستی مشخص شود. به علاوه می‌توان منحنیهای بار و مقاومت گروه شمع را با بارهای مختلف ترسیم نمود و در این حالت مطابق با شکل، برای یک نشست مطلوب، سهم بار گروه شمع را از این منحنیها تعیین کرد. پس از آن با توجه به این نشست، سهم باربری رادیه، بر اساس مقدار نشست و ظرفیت باربری نهایی آن، خود به خود مشخص خواهد شد. روشی که در ادامه می‌آید، مراحل گام به گام فوق را به صورت تحلیلی نشان می‌دهد.

ابتدا تعدادی شمع برای سیستم در نظر گرفته می‌شود. اگر بار وارد بر سیستم رادیه و گروه شمع P باشد، با فرض استقلال رفتار رادیه و شمعها، این بار توسط رادیه (سهم رادیه = P_{1m}) و شمعها (سهم شمعها = P_{1p}) حمل می‌شود. در این حالت نشستهای حاصل از بارهای P_{1m} و P_{1p} به ترتیب S_{1m} برای رادیه و S_{1p} برای گروه شمع در نظر گرفته می‌شود. نشست گروه

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]

شمع در این حالت در صفحه خنثی مربوط به تعداد شمع در نظر گرفته شده محاسبه می‌شود. بدین ترتیب مقدار نشست در هر سطح بارگذاری متناسب با شدت بار وارده در آن سطح است.

اما از آنجا که سیستم به صورت یکپارچه و نه مستقل، عمل می‌کند، نشستهای رادیه و گروه شمع برابر است. بنابراین داریم:

$$\begin{cases} P_{1m} + P_{1p} = P \\ S_{1m} = S_{1p} \end{cases} \qquad (۱۴)$$

بدین ترتیب هرگاه مقادیر نشست به دست آمده در دو تحلیل رادیه و گروه شمع برابر نباشند، می‌توان سهم باربری را تغییر داد و بدین ترتیب با استفاده از فرض نسبت مستقیم رفتار بار- نشست رادیه و گروه شمع در آن بازه بارگذاری، می‌توان مقادیر نشست مجدد هر یک از دو زیرسیستم را محاسبه کرد. بارهای وارد بر سیستم رادیه و گروه شمع در مرحله دوم به ترتیب P_{2m} و P_{2p} و نشستهای متناظر با آنها با S_{2m} و S_{2p} نمایش داده می‌شوند. معادلات زیر برای این مرحله قابل بازنویسی هستند:

$$\begin{cases} P_{2m} + P_{2p} = P \\ S_{2m} = \dfrac{P_{2m}}{P_{1m}} S_{1m} \\ S_{2p} = \dfrac{P_{2p}}{P_{1p}} S_{1p} \end{cases} \qquad (۱۵)$$

فرض نسبت مستقیم مقادیر بار- نشست برای سهولت در محاسبات دور دوم به کار گرفته می‌شود. در صورتی که در این حالت نشستهای رادیه و گروه شمع برابر شوند، با توجه به آنچه پیشتر اشاره شد، محاسبات پایان یافته، سهم بار هر یک از دو زیر سیستم مشخص می‌شود. حال در صورتی که نشست به دست آمده در محدوده مجاز باشد، تعداد شمعها در حالت بهینه قرار دارد، در غیر این صورت باید تعداد شمعها را افزایش داد تا نشست حاصل کمتر شود. همچنین هرگاه نشست بسیار کمی در سیستم رخ دهد، این مسئله نشانگر تعداد شمع بیش از تعداد بهینه در سیستم یا استفاده از شمعهای قطور و عمیق است که می‌تواند کاهش یابد.

نکته حائز اهمیت این است که باید ظرفیت باربری شمعها را برای محاسبه نشست در صفحه خنثی مورد توجه قرار داد؛ در حقیقت باربری جانبی (و حتی کف) شمع در نشستهای بسیار کوچک به طور کامل فعال می‌شود در حالی که مقادیر نشست موضوع بحث نشستهایی بسیار بیشتر از نشست لازم برای فعالیت کامل ظرفیت باربری جداری (و حتی کف) شمعهاست. بنابراین باید توجه داشت که سهم باربری در هر مرحله از مراحل فوق از ظرفیت باربری زیرسیستم گروه شمع تجاوز نکند و با آن ظرفیت کنترل شود.

۵- بررسی موارد عملی

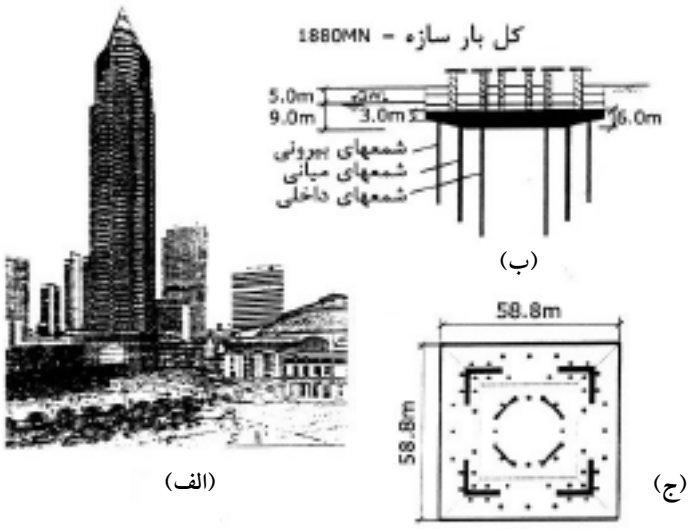
در ادامه، پنج مورد عملی از طراحی سیستمهای مرکب رادیه و گروه شمع در نقاط مختلف دنیا مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

۵-۱- مورد عملی ۱: برج M در فرانکفورت آلمان

ساختمان این برج ۶۰ طبقه در سال ۱۹۹۰ میلادی به اتمام رسید. ارتفاع سازه در حدود ۲۵۶ متر و کل سربار آن ۱۹۰۰MN است. مقطع عرضی برج مربعی به ضلع ۴۱ متر است که البته برای فونداسیون آن از یک رادیه به ابعاد ۶۰ متر استفاده شده است. نشست پی رادیه‌ی تنها با توجه به پروفیل خاک که از لایه‌ی رس کواترنری فرانکفورت و نهشته‌های ماسه‌ای در اعماق مختلف تشکیل شده است، با استفاده از روش ارائه شده، در حدود ۴۰۰mm براورد شد. قابل ذکر است که سیستم رادیه در عمقی که شروع لایه رسی است، قرار داده شده است. با توجه به این نشست بالا و همچنین نسبت لاغری بیشتر از عدد ۴ برج و حساسیت آن به چرخش، از یک سیستم رادیه مرکب با گروه شمع به عنوان فونداسیون در این برج استفاده شده است. آرایش شمعها مطابق با شکل (۵)، به صورت دوایری متحدالمرکز در نظر گرفته شده است و در مجموع ۶۴ شمع برای کل پروژه به کار رفته است. این شمعها با فواصلی نسبتاً دور از هم قرار دارند و تعداد آنها کاملاً بهینه است.

تعداد ۱۲ شمع از شمعهای گروه با نصب ابزار اندازه‌گیری، از لحظه‌ی شروع ساخت تا انتهای پروژه مورد بررسی قرار

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]

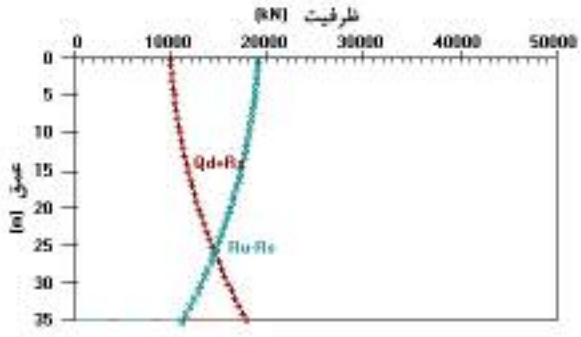


شکل ۵- ساختمان M در فرانکفورت، الف) نمای برج ب) مقطع قائم سیستم رادیه‌ی مرکب ج) پلان پی

گرفتند و این بررسیها نشان می‌دهد که تقریباً ٪۵۰ کل بار توسط شمعها و مابقی توسط رادیه تحمل می‌شود، ضمن آنکه نشست سیستم نیز به حدود ۱۵۰mm تقلیل یافته است. این امر حاکی از آن است که اولاً تعداد مناسب و بهینه‌ای از شمعها ضمن تامین ظرفیت باربری سیستم، به کاهش نشست کلی مجموعه کمک می‌کنند و دوم اینکه، با انتخاب این تعداد بهینه و استفاده از ظرفیت باربری رادیه در باربری کل مجموعه، صرفه‌جوییهای بسیار زیادی در طراحی و اجرای شمعها شده است. چه بسا استفاده از تعداد بیشتر شمعها و صرف‌نظر کردن از ظرفیت باربری رادیه، علاوه بر افزایش هزینه‌ها، تاثیر کمی بر کاهش نشست مجموعه نشان می‌داد. در صورت استفاده از یک آرایش معمول گروه شمع با فواصل معمول (در حدود ۳ تا ۴ متر)، تعداد شمعها به بیش از ۱۰۰ تا ۱۵۰ شمع بالغ می‌شد و در این صورت، مقدار نشست حداکثر به حدود ۵۰mm تقلیل می‌یافت و این امر به ضرایب اطمینان بسیار بالا و طراحی غیر اقتصادی منجر می‌شد.

به عنوان محکی برای روش ارائه شده، این مجموعه به روش پیشنهادی توسط یک نرم‌افزار تخصصی به نام Unipile (محصول شرکت UNISOFT) تحلیل می‌شود. این نرم‌افزار از توانایی محاسبه ظرفیت باربری شمع و گروه شمع، تعیین محل صفحه خنثی، نشست گروه شمع، محاسبات نشست گروه شمع با وجود یک صفحه خنثی دلخواه ارائه شده توسط کاربر و همچنین تعیین نشست رادیه با توجه به پروفیل و مشخصات خاک زیر مجموعه را داراست. مقادیر نشست در این نرم‌افزار برای منظور اخیر به روش Janbo مورد محاسبه قرار گرفته‌اند [۱۴]. در صورت استفاده از روش جدید تحلیل ارائه شده در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار Unipile، می‌توان نشستهای رادیه و گروه شمع را محاسبه کرد و با چند سعی و خطای متوالی، نشست کل سیستم را بر حسب ظرفیت باربری واقعی به دست آمده برای هر یک از دو زیر سیستم (رادیه و گروه شمع) مورد محاسبه قرار داد. بدین صورت با معرفی پروفیل خاک، عمق استقرار فونداسیون و محل و نحوه استقرار شمعها و همچنین سطح سفره‌ی آب زیرزمینی، پس از تحلیل گروه شمع برای سهم باربری واقعی آن، محل صفحه‌ی خنثی در عمقی معادل با ۲۵m به دست می‌آید. نشست کل سیستم که برابر با نشست گروه شمع در صفحه خنثی است، برای شرایط نهایی، در حدود ۱۲۹/۵mm براورد شده است که به مقادیر به دست آمده واقعی بسیار نزدیک است. محاسبات اخیر نشان می‌دهند که در صورت استفاده از تحلیل نشست برای رادیه و گروه شمع (در صفحه خنثی) می‌توان سهم باربری هر یک از

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]



شکل ۶ - ظرفیت باربری و محل صفحه خنثی در نرم‌افزار Unipile

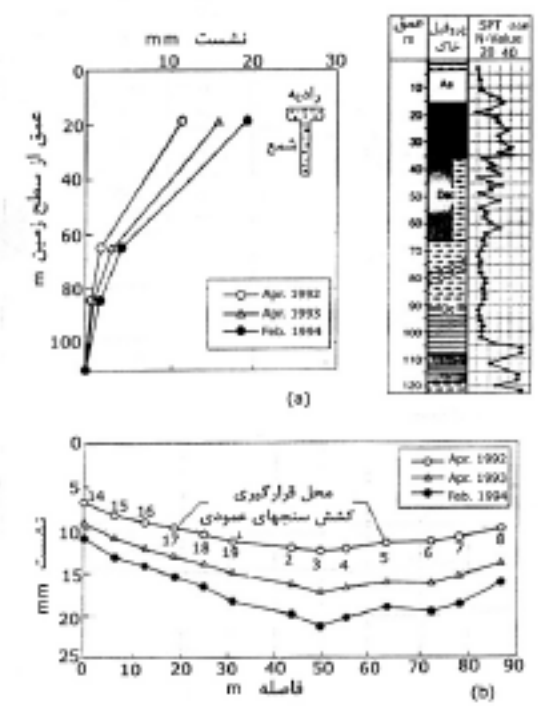
دو زیرمجموعه را به صورت واقعی محاسبه کرد. شکل (۶)، نتایج تحلیل حاصل از نرم‌افزار Unipile را برای تعیین ظرفیت باربری هر شمع در گروه و تعیین محل صفحه خنثی نشان می‌دهد.

همان طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، محل صفحه خنثی در عمقی معادل با حدود 26m محاسبه شده است. بدین ترتیب مقدار نشست مجموعه نیز با توجه به عمق قابل توجه صفحه خنثی به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز صحت این ادعا را تایید می‌کند.

۵-۲- مورد عملی ۲: مجموعه‌ی ساختمانی هتل اداری- مسکونی نیگاتا، ژاپن

این سازه‌ی ۲۱ طبقه، به ارتفاع ۱۲۵m، دارای مساحتی بالغ بر m^2 ۳۳۰۰ در پلان است. در این سیستم از ۱۵۷ شمع درجا به قطری در حدود ۱m تا ۱/۸m در زیر یک سیستم رادیه استفاده شده است. برج اصلی، تقریباً در مرکز فونداسیون بنا شده است و در آن ناحیه تمرکز شمعها بیش از سایر نواحی است. شکل (۷) نمودارهای نشست در زیر پی را در عمق و برای نقاط مختلف طولی پی نشان می‌دهد.

بیشترین نشست کل مجموعه در حدود ۲۲mm است و بیشترین اختلاف نشست در حدود ۱۵mm است. تعداد معتنابهی شمع که در این پروژه به کار رفته است باعث افزایش سهم شمعها در باربری مجموعه و کاهش نشست کل سیستم



شکل ۷ - نمودارهای نشست زیر پی، مجموعه‌ی ساختمان اداری- مسکونی نیگاتا

شده است. در انتهای ساخت در حدود ٪۸۰ کل بار توسط گروه شمع حمل می‌شود و سهم ناچیزی از بار به رادیه می‌رسد. صرف نظر از پروفیل خاک، با مقایسه‌ای اجمالی بین این مجموعه و برج M در فرانکفورت آلمان و با توجه به آنکه مساحت هر دو سازه تقریباً در محدوده یکسانی است، حتی با فرض فشار یکسان زیر پی برای هر دو مجموعه (علی رغم تنش بزرگتر در زیر برج M نسبت به این ساختمان) تعداد ۱۵۷ شمع با قطرهای داده شده به نظر بسیار زیاد و غیر اقتصادی است. با توجه به خصوصیات خاک در این مورد، تحلیل ظرفیت باربری و نشست به روش پیشنهادی برای این مجموعه صورت پذیرفته است. نتایج به دست آمده توسط نرم‌افزار Unipile با مقادیر اندازه‌گیری شده در این مورد، نشان می‌دهد که تحلیل ظرفیت باربری و نشست در این مجموعه سهم باربری بسیار بالایی را برای شمعها به دست می‌دهد. در ادامه‌ی تحلیل، و برای محک بیشتر روش پیشنهادی، کل سربار مجموعه به شمعها داده شد و نشست مجموعه در صفحه خنثی محاسبه شد. با توجه به آنکه به دلیل تعدد شمعها

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]

سهم هر شمع از بار وارده مقدار کمتری را در مقایسه با مقاومتهای کف و جداری نشان می‌داد، در نتیجه محل صفحه خنثی در عمقی در حدود ۱/۴ کف شمع قرار می‌گرفت که همین امر به کاهش قابل توجه نشست منجر می‌شود. همین کاهش قابل توجه نشست به کاهش سهم باربری رادیه در مجموعه‌ی فونداسیون مرکب انجامیده، در نهایت وجود رادیه غیر لازم و طرح غیر اقتصادی می‌شود.

در طراحی سیستمهای مرکب رادیه و گروه شمع، از آنجا که کاربری کل سیستم به کاربری اجزای آن بستگی دارد، لذا چگونگی عملکرد تک تک این اعضا یعنی شمعها و فونداسیون رادیه مهم هستند. به نظر می‌رسد که در صورت استفاده از روش بهتری برای براورد نشست مجموعه‌ی رادیه و گروه شمع در ساختمان اخیر، مبنی بر تحلیل نشست در صفحه‌ی خنثی، حتی با صرف نظر از ظرفیت باربری رادیه، مقادیر نشست به مراتب اصلاح می‌شدند و نیاز به تعداد کمتر شمع معلوم می‌شد.

۶- نتیجه‌گیری

پی‌های رادیه به عنوان یکی از کاملترین پی‌های سطحی می‌توانند در کاهش نشست سازه و افزایش توان باربری خاک موثر قرار گیرند. در مورد سازه‌های حساس به نشست و یا دارای سربارهای بسیار سنگین، با ترکیب پی‌های رادیه و گروه شمع، عملکرد رادیه بهبود می‌یابد و این امر علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست نیز به همراه خواهد داشت. به همین علت، ترکیب رادیه و گروه شمع به عنوان کاملترین سیستم فونداسیون شناخته می‌شود. اما برای بهینه‌سازی سیستمهای مرکب رادیه و گروه شمع، می‌بایست با تحلیلی تا حد امکان دقیق و نزدیک به واقعیت، سهم باربری هر یک از اجزای سیستم را تعیین کرد تا با بهره‌گیری از کمترین تعداد شمع، بیشترین ظرفیت باربری را با حفظ نشستهایی در محدوده مجاز به دست آورد. بدین منظور روشهای متعددی در تعیین سهم باربری هر یک از اجزای سیستم رادیه و گروه شمع ارائه شده است. این روشها هر یک دارای نقاط قوت و ضعفی هستند که به عنوان مثال می‌توان به مشکلات ناشی از تعیین ضرایب سختی رادیه و شمع در روشهای عددی تحلیل سیستمهای مرکب یا پیچیدگی برخی از این روشها اشاره نمود. به همین منظور با بررسی اندرکنشی رفتار پی‌های مرکب رادیه و گروه شمع و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- شمع- رادیه روشی جدید بر پایه تحلیل نشست و محاسبات نشست مجموعه در صفحه خنثی پیشنهاد شده است. به عنوان نتیجه‌گیری نهایی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- در صورت عدم حذف رادیه به عنوان یک جزء باربر در سیستمهای مرکب رادیه و گروه شمع، علاوه بر تامین ظرفیت باربری بالا و کاهش نشست کلی، طرحی اقتصادی و بهینه به دست می‌آید. از آنجا ظرفیت باربری کامل شمعها، بر خلاف رادیه، مستلزم نشست یا جابه‌جایی نسبتاً کوچک شمع در خاک است، بنابراین تعیین تعداد بهینه‌ی شمع، در به کارگیری ظرفیت باربری رادیه مهم است. از این روی، در صورت استفاده از تعداد بهینه‌ی شمع در زیر رادیه، نشست سیستم به اندازه‌ای خواهد بود که علاوه بر استفاده از ظرفیت باربری شمعها، رادیه نیز وارد عمل شود و در توان باربری سهیم شود و طراحی علاوه بر داشتن ایمنی و پایداری کافی، به لحاظ اقتصادی نیز توجیه پذیر باشد.

۲- در طراحی گروه شمع باید توجه داشت که در صورت توزیع مناسب نیروها بین شمعها و رادیه و یک تحلیل اندرکنشی مناسب از سیستم، می‌توان ضمن استفاده از تعداد بهینه‌ی شمع، کاهش نشست کلی سیستم را انتظار داشت. در برخی از موارد عملی ذکر شده، با استفاده از تعداد بهینه و مناسب شمع برای ساختمانهای بسیار حجیم و بلند، حتی در پاره‌ای موارد به سازه اجازه‌ی نشستهای قابل توجه اما معقولی (مثلاً در حدود ۱۵۰ میلیمتر) نیز داده شده است که در عمل مشکلی نیز به لحاظ کاربری و سرویس برای سازه به وجود نیامده است. در نتیجه، در صورت استفاده از

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]

پی‌های مرکب رادیه و گروه شمع، در صورت نشست یکنواخت مجموعه، اجازه نشستهای بیشتری را نیز به سیستم داده، طرحی اقتصادی و بهینه را در ضمن داشتن سرویس مناسب، به دست آورد.

۳- در همه روشهای ارائه شده مانند یکی از روشهای جدید در این رابطه یعنی روش پولوس و دیویس در تحلیل و طراحی پی‌های مرکب، باید به عملکرد وابسته به هم اجزای سیستم و در حقیقت اندرکنش آنها (شمع- رادیه و خاک) توجه داشت و این اجزا به صورت مجزا قابل بحث نیستند. همین‌طور در این روش و روشهای مشابه، پارامترهایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که به سادگی قابل تعیین یا اندازه‌گیری نیستند، مانند سختی رادیه یا گروه شمع که در عمل محاسبه آنها با مشکلات فراوان همراه بوده، راه حل واحد و یکسانی نیز برای آن وجود ندارد. به علاوه اینکه این روشها عمدتاً در مواجهه با این پارامترها، در مورد نحوه‌ی تعیین آنها سکوت کرده‌اند و مسئله را به صورت یک قضاوت مهندسی در شکلی مبهم رها کرده‌اند. بنابراین استفاده از این روشها تنها به لحاظ نظری یا در موارد خاص و یا کوچک امکانپذیر است. در حالی‌که برخی مهندسان طراح عموماً از ظرفیت باربری رادیه در باربری کل سیستم صرف نظر می‌کنند. از آنجا که استفاده از سهم رادیه در طراحی، به طرحی بسیار اقتصادی، بهینه و ایمن منجر می‌شود، بنابراین با در نظر گرفتن اثر توام رادیه و گروه شمع، می‌توان با روشهایی از توان باربری رادیه نیز در کل باربری سیستم بهره جست.

۴- با توجه به رفتار بار- نشست برای زیر سیستمهای رادیه و گروه شمع در یک مجموعه‌ی پی مرکب، می‌توان با تحلیل مرحله‌ای بار- نشست که برای رادیه و گروه شمع به عنوان یک سیستم معمولی (در صفحه‌ی خنثی) به صورت مجزا صورت داده می‌شود، مقادیر سهم باربری هر یک را در مجموعه مشخص کرد. این سهم باربری باید در هر مرحله با ظرفیت ژئوتکنیکی شمعها نیز مقایسه شود. با این روش تحلیل می‌توان تعداد یا شکل هندسی بهینه‌ی شمعها را تعیین کرد. در این حالت، بر مبنای روش پیشنهادی می‌توان نشست مطلوبی را برای گروه شمع در نظر گرفت و بر اساس آن سهم باربری رادیه و گروه شمع را با توجه به نشست سیستم در محل صفحه‌ی خنثی، به تفکیک مورد محاسبه قرار داد.

۵- استفاده از روش پیشنهادی اخیر در موارد عملی کاربردی آن دارای جوابهایی نزدیک به واقعیت بوده، در صورت داشتن اطلاعات صحیح از پروفیل خاک و مشخصات سیستم می‌تواند پیش‌بینی بسیار مناسبی از توان باربری اجزای پی‌های مرکب و توان باربری کل مجموعه داشته باشد. مثالهای عملی از دو ساختمان دارای نتایج اندازه‌گیری شده در محل و مقایسه این مقادیر با نتایج حاصل از تحلیل سیستم بر اساس روش پیشنهادی جدید می‌توانند در طراحیهای ژئوتکنیکی و بهینه‌سازی سیستم فونداسیون مورد ملاحظه قرار گیرد.

واژه نامه

1. bearing capacity
2. stability analsis
3. mat foundations
4. buoyant (Floatation) foundation
5. block foundation
6. limit state design
7. tilting
8. Randolph
9. conventional method
10. creeping pile
11. interaction
12. pile enhanced (piled raft) foundation
13. Poulos
14. neutral

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]

مراجع

۱. اسلامی، ا.، فلنیوس، ب. ا.، و ویس‌کرمی، م. "*معضلات تعیین ظرفیت باربری فونداسیونهای سطحی به روش تحلیلی*"، اولین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران (NCCE)، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، اردیبهشت ۱۳۸۳.

۲. اسلامی، ا.، رنجبر، م. م.، ویس‌کرمی، م.، و ریاضی، ط. "*بررسی ژئوتکنیکی اندرکنش پی‌های رادیه و گروه شمع، ارزیابی دو مورد عملی*،" پذیرفته شده برای دومین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران (2NCCE)، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، اردیبهشت ۱۳۸۴.

3. Hemsley, J. A., *Elastic Analysis of Raft Foundations*, Tomas Telford Publishers, 1998.
4. Hemsley, J. A., *Design Applications of Raft Foundations*, Tomas Telford Publishers, 2000.
5. Davis, E. H. and Poulos, H. G., "The Analysis of Pile-Raft Systems," *Australian Geomechanical Journal*, G2, Vol. 1, pp. 21-27, 1972.
6. Zeeavert, L., "Compensated Friction-Pile Foundation to Reduce the Settlement of Buildings on Highly Compressible Volcanic Clay of Mexico City," *Proc. of 4th Int'l Conf. on Soil Mech. and Foundation Engng.*, London, England, Aug. 1957, Vol. 2, pp. 81-86, Butterworths Scientific Publications, London, 1957.
7. *Canadian Foundation Engineering Manual, CFEM*, Canadian Geotechnical Society, Technical Committee on Foundations. BiTech Publications, Richmond. 1992.
8. Coduto, D. P., *Foundation Design, Principles and Practices,* 2nd Ed., Prentice Hall Inc., 2001.
9. Davis, E. H. and Poulos, H. G., *Pile Foundations Analysis and Design*, John Wiley and Sons, 1980.
10. Fellenius, B. H., *Unified Design of Piles and Pile Groups*, Transportation Research Board, FHWA, Washington, TRB Record 1988.
11. Poulos, H. G., and Davis, E. H., *Pile Foundations, Analysis and Design*, John Wiley and Sons, New York, 1980.
12. Randolph, M. F., "*Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts*," State of the Art, 13th Int'l Conference on Soil Mechanics and Foundation Design, New Delhi, Vol. 1, pp. 183-191, 1994.
13. Fellenius, B. H., "The Critical Depth- How it Came into Being and Why it Does not Exist," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, Vol. 108, No.1. 1994.
14. Goudreault, P. A. and Fellenius, B. H., UNIPILE, Background and Manual (*Ver. 2*), UNISOFT Ltd., 735 Ludgate Court, Ottawa, Canada, 78p, 1994.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1386.26.1.7.4]