فونداسیون ها و انواع آنها

۱–۱ مقدمه

با افزایش مهاجرت به شهرها، ساخت و سازهای شهری به سرعت در حال افزایش است در چنین حالتی در صورتی که توسعه شهرها به صورت افقی انجام گیرد در طی زمانی نه چندان طولانی دیگر جایی برای توسعه باقی نمی ماند. در این حالت چنانچه شهرها بخواهند رشد نموده و پیشرفت نمایند، توسعه عمودی کلید حل مسئله خواهد بود. ساختمان های بلند افراد بیشتری را در فضای کمتر اسکان می دهند. ساختمان های بلند فضای سطحی کمتری مصرف نموده و بنابراین زمین بیشتری برای توسعه زیرساخت ها همانند پارکینگ ها، باغ ها و دیگر تاسیسات در اختیار قرار خواهد گرفت.

ساختمان های بلند نیاز به فونداسیون های مقاومی دارد که پایداری آن ها را تامین می نماید. در نواحی شهری با تراکم بالای ساختن ها، حفر زیرزمین های عمیق برای ساختمان های بلند مخصوصاً در مجاورت دیگر ساختمانهای سنگین، باعث ایجاد مشکلات مرتبط با گودبرداری می شود. در این حالت نیاز به فونداسیون های خاص همانند سپری ها، دیوارهای ساخته شده با دوغاب بتن، مهاربندی دیوار و حفاری در زیر ساختمان های مجاور یا حتی متروها وجود خواهد داشت. در صورتی که در محل حفاری تراز آب زیرزمینی وجود داشته باشد، نیاز به پمپاژ آب و کاهش تراز آب خواهد بود که این مسئله خود باعث نشست ساختمان های اطراف می شود.

تمام اینها تنها گوشه ای از مشکلات و مسائلی است که در هنگام ساخت و ساز پروژه های عمرانی ممکن است رخ دهد. بررسی این مسائل در شاخه ای مهندسی عمران انجام می شود که مهندسی ژئوتکنیک نام دارد. مهندسی ژئوتکنیک زیرمجموعه ای از مهندسی عمران در زمینه مسائل مرتبط با بکارگیری و بررسی رفتار خاک و مصالح خاکی می باشد. این شاخه از مهندسی متشکل از دو بخش کلی مکانیک خاک و مهندسی پی است. در واقع مهندسی پی شامل بکار گیری اصول مکانیک خاک در طراحی فونداسیون سازه ها و ابنیه در تماس با خاک می باشد.

۱–۲ تعریف فونداسیون و اهمیت آن

کلمه فونداسیون از واژه فرانسوی **Fondation** (با همان تلفظ فونداسیون) به معنی اساس و بنیاد اقتباس شده است. در زبان انگلیسی به آن **Foundation** (با تلفظ faʊnˈdeɪʃən) گفته می شود که به همان معنی بنیاد، اساس و پی می باشد. با توجه به فعالیت گسترده مهندسین فرانسوی در قرن بیستم در ساخت و سازهای زیربنایی کشور، بسیاری از کلمات رایج بین مهندسین (مثل شناژ و پوتر) از واژه های فرانسوی اقتباس شده است. حتی امروزه هم با گذشت زمان زیاد هنوز هم استفاده از این واژه ها بین مهندسین رایج است. معادل پارسی کلمه فونداسیون "**پی**" می باشد که به اشتباه در بعضی کتب و متون فنی به آن شالوده هم گفته می شود. در ادامه خواهیم دید که پی یا فونداسیون لزوماً به معنی شالوده نیست و مهندسین در استفاده از واژه های فنی جهت انتقال کامل مفاهیم باید کمی محتاط باشند.

حال بیایید تعریف جامعی از فونداسیون یا پی ارائه نماییم. کلیه سازه هایی که بر روی زمین بنا می شوند از جمله ساختمان ها، پل ها، خاکریز ها و ..... از دو بخش تشکیل می شوند:

۱- **سازهٔ فوقانی**[1]: بخش نمایان سازه

۲- **سازهٔ زیرین**[2]: بخش مدفون سازه

بخش سازهٔ زیرین به عنوان حائل بین سازهٔ فوقانی و زمین تکیه گاه عمل می کند. یعنی بار سازهٔ فوقانی را به زمین منتقل می نماید. پی یا فونداسیون عبارت است از سازهٔ زیرین و بخشی از خاک مجاور آن که تحت تاثیر سازه و بارهای وارد بر آن می باشد. این یک تعریف پایه از فونداسیون می باشد اما تعریف کاملی نیست. بیاید تعدادی از تعاریف مختلف فونداسیون که در متون فنی مختلف ارائه شده اند را بررسی نماییم.

تعریف (۱): مبحث ۷ مقررات ملی ساختمان، فونداسیون را به صورت زیر تعریف نموده است:

مجموعه بخش هایی از سازه و خاک در تماس با آن که انتقال بار بین سازه و زمین از طریق آن صورت می گیرد.

تعریف (۲): فونداسیون: قسمت زیرین سازه که در تماس مستقیم با خاک بوده و وزن آن را به زمین منتقل می نماید.

با در نظر گرفتن مباحث فوق، تعریف کاملی از فونداسیون به صورت زیر ارائه می نماییم:

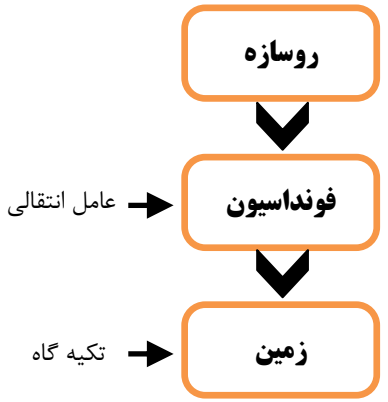
تعریف فونداسیون: **مهم!**

بخش زیرین سازه (شامل المان های سازه ای و خاک زیر آن) که نیروها و لنگرهای ناشی از روسازه را طوری به خاک یا سنگ بستر زیرین منتقل می نماید که تنش ها در خاک در محدوده ای قرار می گیرند که نه تسلیم رخ می دهد و نه نشست سازه بیش از میزان مجاز می گردد. فونداسیون همچنین پایداری سازه را در برابر لغزش و واژگونی تامین می نماید. در واقع فونداسیون یک عامل انتقالی بین روسازه و زمین است.

به طور خلاصه وظیفهٔ فونداسیون انتقال بارهای بخش های فوقانی به خاک یا سنگ بستر زیر آن می باشد به نحوی که تنش های بیش از حد و نیز نشست های اضافی ایجاد نگردد.

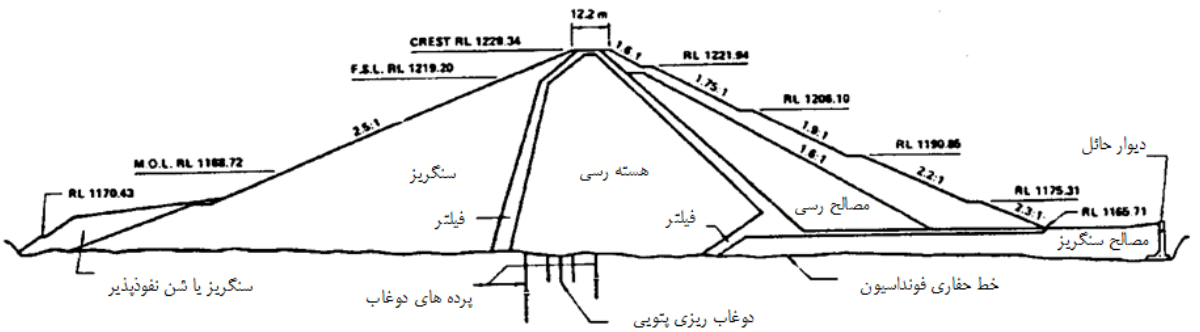
به عبارت دیگر در اینجا زمین نقش تکیه گاه را برای ما دارد و خاک زیر فونداسیون بخشی از سازه ما تلقی می شود زیرا به لحاظ مهندسی ما این خاک را مطالعه، بارگذاری، تحلیل و طراحی می نماییم (شکل ۱-۱). توجه داشته باشید که این تعریف قابل تعمیم به تمام سازه ها می باشد. به طور مثال شکل ۱-۲ را در نظر بگیرید. در این شکل آسمانخراشی داریم که بر روی سیستم فونداسیون عمیق بنا شده است (در ادامه فونداسیون های عمیق را بررسی خواهیم نمود) این ساختمان همچنین شامل چندین طبقه زیرزمین هم می شود. این زیرزمین ها در افزایش ظرفیت باربری خاک زیر سازه تاثیر مثبت دارند. در اینجا مجموعه زیرزمین، شمع ها و خاک زیر آن جزوه زیرسازه یا همان فونداسیون ما محسوب می شوند. حال شکل ۱-۳ را مشاهده نمایید. سازه ما یک سد ناحیه بندی شده خاکریزه ای با هسته رسی می باشد. مسلماً این سازه وزن بسیار زیادی داشته و تنش های قابل توجهی به خاک زیرین منتقل می نماید. در اینجا روسازه شامل خود سد خاکی و زیرسازه ناحیه ای از خاک زیرین است. مطالعه و طرح فونداسیون سدهای خاکی از یکی طولانی ترین و پیچیده ترین عملیات مطالعاتی میدانی در مهندسی عمران بوده و شامل مطالعات و آزمایش های زیرسطحی بسیار زیادی می شود.

[1] Superstructure
[2] Substructure

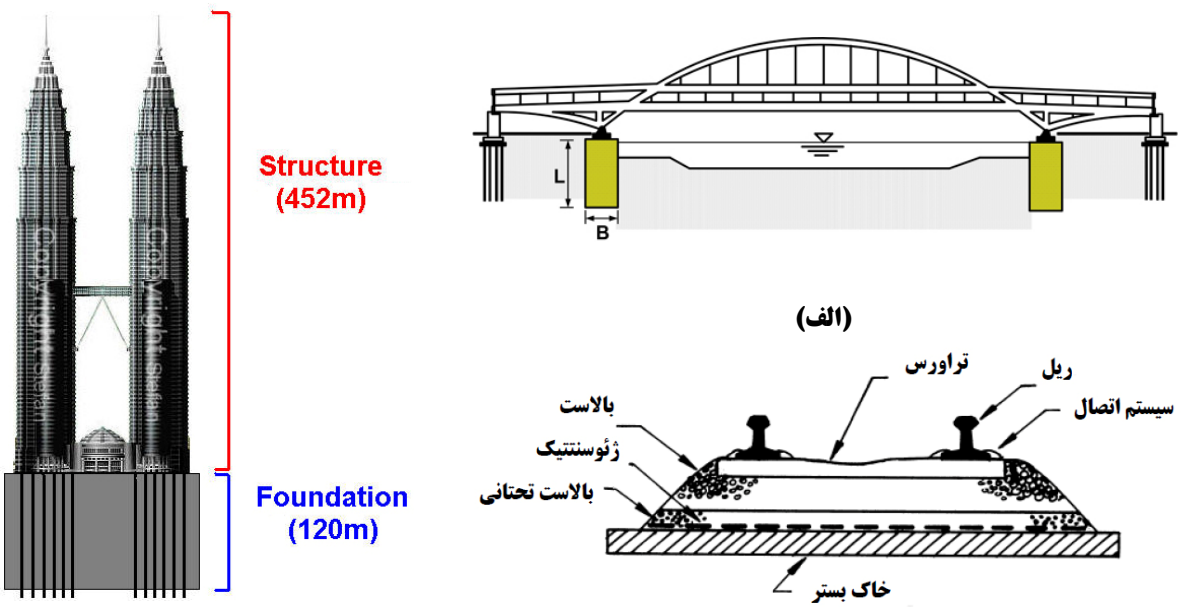


شکل ۱–۱ تعریف شماتیک فونداسیون

شکل ۱–۲ فونداسیون ساختمان



شکل ۱–۳ فونداسیون سد خاکی



شکل ۱–۴ فونداسیون سازه های مختلف (الف) پل قوسی (ب) فونداسیون راه آهن (پ) فونداسیون آسانخراش های پتروناس

در شکل ۱-۴ نیز فونداسیون چندین نوع سازه دیگر نشان داده شده است. به طول مثال شکل ۱-۴-ب و ۱-۴-پ را با هم مقایسه نمایید. شکل ۱-۴-ب سازه یک راه آهن را نشان می دهد که فونداسیون آن شامل مصالح بالاست و خاک بستر بوده و عمق آن بسیار کم است در مقابل فونداسیون سازه آسمانخراش شکل ۱-۴-پ که ساختمان های پتروناس در مالزی را نشان می دهد تا عمق ۱۲۰ متر در داخل زمین ادامه یافته است. در واقع سیستم فونداسیون این سازه شامل شالوده گسترده به ضخامت ۴/۵ متر با حجم بتن مسلح ۱۳۲۰۰ متر مکعب با مقاومت فشاری ۶۰ مگاپاسکال و وزن تقریبی ۳۲۵۵۰ تن در زیر هر برج است که در زیر آن ۱۰۴ شمع بتنی با طول متغییر از ۶۰ تا ۱۱۵ قرار گرفته است.

۱-۳ | مهندسی پی

مهندسی پی شامل تحلیل و طراحی فونداسیون (شالودهٔ ساختمانهای متعارف) یا سازه های در تماس با خاک (ابنیهٔ حائل) با بکارگیری اصول مکانیک خاک و مکانیک سازه توام با قضاوت مهندسی می باشد. مهندسی پی مباحثی همچون محاسبه ظرفیت باربری، طراحی انواع مختلف فونداسیون مانند فونداسیون های منفرد، نواری، گسترده، عمیق (شمع) را شامل می شود.

علاوه بر طراحی فونداسیون های متعارف (فونداسیون ساختمان ها)، طراحی سازه های حائل نیز جزء مبحث مهندسی پی می باشد.

مهندس پی به کسی گفته می شود که به وسیلهٔ آموزش و تجربهٔ کافی در اصول علمی و قضاوت مهندسی مهارت یافته است تا پی را طراحی نماید. می توان گفت که قضاوت مهندسی بخش خلاق کار طراحی پی می باشد. در واقع قضاوت مهندسی در طرح پی همان گردآوری و به هم آمیختن تجارب، مطالعهٔ کارهای دیگران در شرایط نسبتاً مشابه و جمع آوری اطلاعات ژئوتکنیکی مخصوص ناحیهٔ تحت بررسی برای ایجاد طراحی اقتصادی، علمی، ایمن سازی برای سازهٔ زیرین می باشد.

بر حسب جنبه های ژئوتکنیکی، مهندسی پی اغلب موارد زیر را شامل می شود **(day, 1999)**:

- انتخاب نوع فونداسیون برای سازه و همچنین عمق و ابعاد فونداسیون
- تعیین پارامترهای طراحی فونداسیون همانند ظرفیت باربری و فشار لهیدگی مجاز خاک
- بررسی پایداری شیروانی ها و اثر آن ها بر روی سازه های مجاور
- بررسی احتمال حرکت فونداسیون در اثر نیروهای لرزه ای که همچنین شامل احتمال روانگرایی هم می شود.
- انجام مطالعات و آزمون ها جهت تعیین احتمال تخریب فونداسیون
- ارزیابی روش های بهسازی خاک جهت افزایش ظرفیت باربری فونداسیون
- تعیین پارامترهای طراحی فونداسیون دیوار حائل
- ارائه توصیه و دستورالعمل جهت زهکشی و کاهش تراز آب گودبرداری ها جهت احداث فونداسیون
- بررسی مشکلات مرتبط با تراز آب زیرزمینی و تراوش آب
- آماده سازی بستر از جمله خصوصیات تراکمی و آزمایش های تعیین تراکم حین تسطیح
- آزمون های صحرایی فونداسیون ها

۱–۴ انواع فونداسیون ها

پی ها بر اساس عمق و نوع عملکرد طبقه بندی می شوند. در حالت کلی چنانچه لایه مقاوم در عمق کمی از سطح زمین قرار گرفته باشد، پی در نزدیکی سطح زمین بنا می گردد. در غیر اینصورت برای رسیدن به لایه ی مقاوم عمق پی افزایش می یابد. به طور کلی می توان پی ها را به سه دسته تقسیم نمود:

۱– پی های کم عمق موسوم به پی های سطحی[1]

۲– پی های عمیق[2]

۳– پی های ویژه

در ادامه به بررسی هر یک از این فونداسیون ها می پردازیم.

۱–۵ فونداسیون های سطحی

اغلب به فونداسیون های سطحی شالوده اطلاق می شود. مبحث ۷ مقررات ملی ساختمان هم فونداسیون های سطحی را شالوده نامیده است اما باید توجه داشت که فونداسیون های سطحی و شالوده ها به لحاظ مفهومی اندکی با هم تفاوت دارند. در اینجا این تفاوت ها را بررسی خواهیم نمود.

همانطور که گفته شد طبق تعریف، فونداسیون بخش زیرین سازه و خاک زیر آن است که در زبان انگلیسی به آن **Foundation** گفته می شود. چنانچه همین فونداسیون بار را به اعماق سطحی خاک انتقال دهد به آنها فونداسیون های سطحی و در زبان انگلیسی **Shallow Foundation** اطلاق می شود. اما این فونداسیون های سطحی خود از دو عنصر المان سازه ای (اغلب بتن مسلح) و خاک زیرین آن تشکیل شده است که ما به این المان سازه ای شالوده و در زبان انگلیسی **Footing** می گوییم. بنابراین استفاده از واژه شالوده عمیق درست به نظر نمی رسد زیرا شالوده همان المان سازه ای فونداسیون سطحی است.

بنابراین شالوده را به این صورت می توان تعریف نمود:

قسمتی از فونداسیون سطحی متشکل از عناصر سازه ای (بتن، فولاد، یا حتی چوب) که فشار روسازه را به صورت لهیدگی (فشار تماسی) به خاک فونداسیون (پی) منتقل می نماید.

پی های سطحی (منظور شالوده و خاک زیر آن است) از متداول ترین فونداسیون ها به خصوص برای پروژه های ساختمانی و دیوارها بوده و اغلب عمق استقرار آن ها کمتر از عرضشان است در عین حال در بعضی مراجع پی های با نسبت عمق تا ۴ الی ۵ هم بعنوان پی کم عمق طبقه بندی شده است. این پی ها پس از گودبرداری و پی کنی و برداشتن خاک های نباتی، ضمن عبور از عمق یخبندان و لایه های نامناسب سطحی و در پاره ای موارد با حفاری بیشتر جهت احداث طبقاتی در زیرزمین، اجرای می شوند و به لحاظ آنالیز و طراحی سازه ای شامل پی های منفرد، نواری (با بارگذاری ممتد و خطی) و تیرهای متکی (با بارگذاری متمرکز و منقطع) بر زمین می باشند.

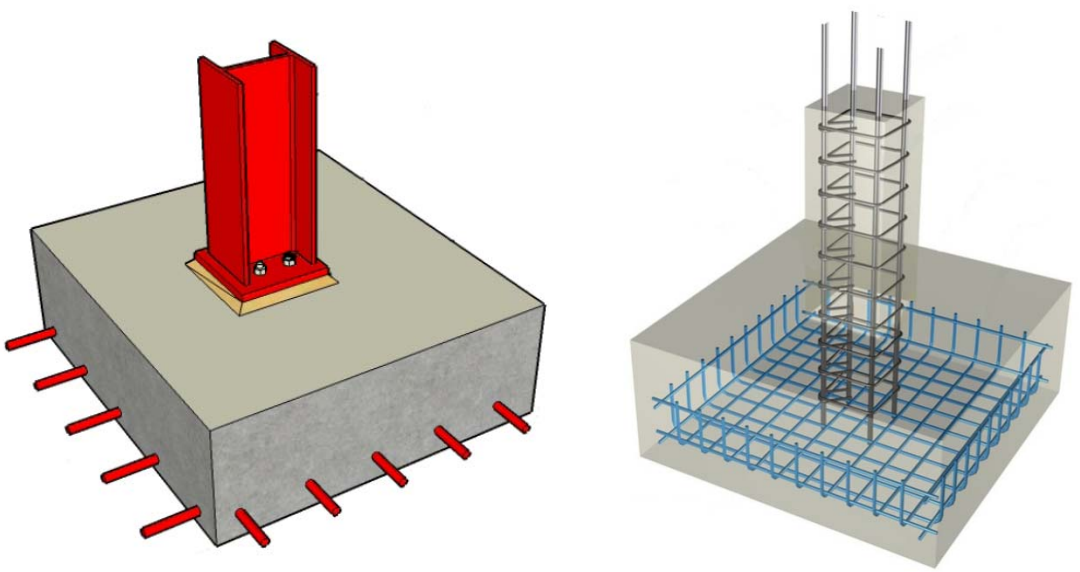
[1] Shallow Foundations
[2] Deep Foundations

فونداسیون های سطحی را به صورت زیر می توان دسته بندی نمود:

- **شالوده منفرد:** در زبان انگلیسی به آن ها **Isolated Footing** (به همان معنی شالوده منفرد یا تک) و در بعضی کتب فنی **Pad Footing** (به معنی شالوده پاشنه ای یا بالشتکی) اطلاق می شود. این شالود ها اغلب دارای شکل مربع یا مستطیل در پلان بوده و از آن ها برای تحمل بار یک ستون تک استفاده می شود.
- **شالوده مرکب (Combined Footing):** شالوده های مرکب بتن مسلح که اغلب شکل مستطیلی یا ذوزنقه ای در پلان دارند و بار بیش از چندین ستون را تحمل می نمایند (اغلب دو تا چهار ستون).
- **شالوده نواری (Strip or Continuous Footing):** از این نوع شالوده اغلب برای تحمل بار دیوارهای باربر استفاده می شود. این شالوده ها معمولاً اعضای بتن مسلح با طول زیاد و عرض یکنواخت در اعماق سطحی زمین هستند.
- **شالوده شبکه ای (Grid Footing):** چندین ردیف معمولاً متعامد از شالوده های نواری که در زیر کل ساختمان بار چندین ستون و یا دیوار را تحمل می نماید.
- **شالوده گسترده (Mat Footing):** نوعی شالوده است که بار چندین ستون با فواصل نامنظم یا چندین ردیف ستون موازی را حمل می نماید و در زیر بخشی از ساختمان و یا کل آن قرار می گیرد.

۱–۵–۱ شالوده منفرد:

فونداسیون منفرد بار یک ستون را تحمل نموده و از ساده ترین، معمول ترین و عمدتاً کم هزینه ترین نوع فونداسیون ها می باشد. در پلان به شکل مربع، مستطیل و یا دایره بوده که انتخاب شکل تا حدودی به مقطع ستون و همچنین نوع بارهای وارده اعم از محوری، لنگر در یک و یا دو جهت بستگی دارد. از نقطه نظر ضخامت، پروفیل پی های منفرد و یا تک ممکن است به صورت ثابت، پله ای و یا شیب دار باشند. این پی ها از مصالح بنایی، بتنی وزنی و یا بتن مسلح ساخته می شوند. در صورت مسلح نمودن فونداسیون های منفرد غالباً در آن ها از یک سفرهٔ آرماتور مستقر در قسمت زیرین پی استفاده می شود. یک نمونه فونداسیون منفرد در شکل ۱–۵ نشان داده شده است.



(ب) **(الف)**

شکل ۱–۵ فونداسیون منفرد (الف) شالوده و ستون بتنی (ب) شالوده بتنی و ستون فولادی

- **چه موقعی می توان از شالودهٔ منفرد استفاده کرد؟**

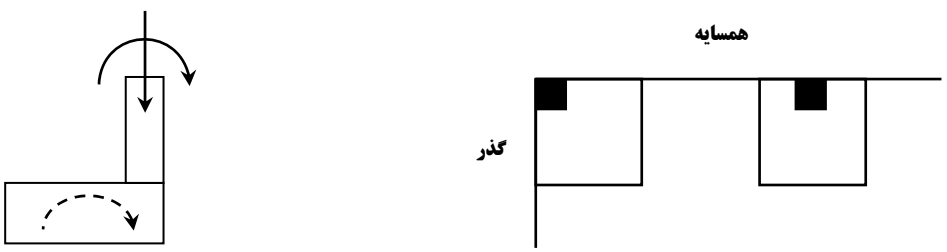
(الف) زمانی که حجم بار وارد بر شالوده در قیاس با مقاومت مجاز خاک آنقدر زیاد نباشد که منجر به ابعاد بزرگ و غیر متعارف شالوده شود.

$$\uparrow\uparrow A = \frac{P \uparrow}{\downarrow q_{all}}$$

(ب) زمانی که ستون روی شالوده خروج از مرکزیت ایجاد نکرده باشد. به عبارتی ستون در مرکز شالوده یا حدوداً در مرکز شالوده قرار گرفته باشد.

با توجه به بند فوق می توان نتیجه گرفت که در سازه های بتنی که پای ستون گیردار است استفاده از این نوع شالوده توصیه نمی شود زیرا لنگر پای ستون باعث ایجاد خروج از مرکزیت می شود در حالی که این نوع شالوده قادر نیست لنگر را به خوبی انتقال نماید. علاوه بر این در صورت وجود برون محوری، فشار در یک طرف فونداسیون بزرگتر از طرف دیگر می شود که این اختلاف فشار باعث نشست نامساوی دو طرف و در نتیجه کج شدن[1] فونداسیون می شود. طراحی شالوده منفرد جهت انتقال لنگر منجر به ابعاد بزرگ شالوده در پلان می شود. در بعضی کتب استفاده از فونداسیون منفرد تحت بار برون محور فقط در خاک های متراکم و یا بستر سنگی مجاز دانسته شده است به شرطی که شالوده هم برای بار محوری ستون و هم برای لنگر گیرداری طراحی شده باشد. البته دراین حالت نیز عدم قطعیت زیادی در رابطه با تخمین واقعی لنگر ها و خروج از مرکزیت ها وجود دارد.

از بحث فوق می توان نتیجه گیری نمود که مطابق شکل ۱-۶ هنگامی که فونداسیون منفرد در مجاورت حریم گذر یا ملک شخص دیگری قرار دارد استفاده از این فونداسیون ممکن نیست.



شکل ۱–۶ فونداسیون منفرد قرار گرفته در مجاورت حریم یا گذر

کلاف[2] (شناژ)

وقتی که در یک ساختمان از فونداسیون های منفرد استفاده می شود، آن ها را باید توسط کلاف هایی به یکدیگر متصل نمود. کلاف ها به هیچ وجه برای جلوگیری از نشست های نامساوی نیستند و وظیفه آن ها بستن شالوده های منفرد به یکدیگر و جلوگیری از بازی کردن آن ها مخصوصاً در مقابل تکان های ناشی از زلزله می باشد.

شناژ: عنصری است غیر سازه ای یا سازه ای درجه ۲ که هیچ نقشی در تحمل بارهای وارده و انتقال آن ها به زمین نداشته و نمی تواند نشست های نامتجانس (نشست نسبی) را کنترل کند. تنها وظیفه شناژ به هم کلاف کردن شالوده و جلوگیری از حرکت افقی آن ها نسبت به یکدیگر است.

[1] tilting
[2] Tie

سوال:

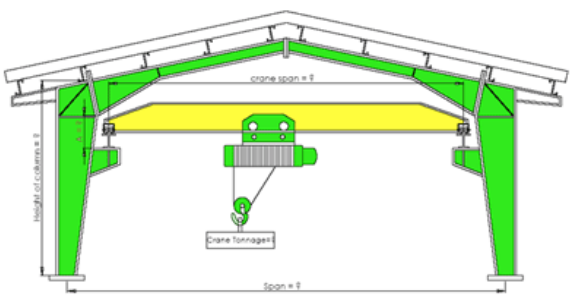
قرار است ساختمان سه طبقه مسکونی با اسکلت فلزی در منطقه ای که دارای خاک ماسه ای متراکم است احداث شود. مشکل حریم در اطراف سازه وجود ندارد. آیا می توان از شالوده منفرد به عنوان سیستم فونداسیون این ساختمان استفاده نمود؟

پاسخ: از آنجایی که سازه مسکونی بوده و وزن زیادی ندارد و با توجه به مقاومت نسبتاً خوب خاک احتمالاً می توان از این نوع فونداسیون استفاده نمود البته به شرط اینکه پای ستون ها مفصل شود تا لنگری به شالوده انتقال نیابد. همچنین از بادبند هم نباید استفاده شود زیرا می تواند باعث بلند شدن شالوده شود. علاوه بر این شالوده های منفرد باید با شناژ به یکدیگر متصل شوند تا رفتاری یکپارچه در مقابل زلزله داشته باشند. مشاهده می شود که انتخاب سیستم فونداسیون بر روی روسازه هم تاثیر گذار است. در صورتی که پای ستون مفصل شود بازتوزیع لنگر در ستون های طبقه پایین می تواند باعث افزایش ابعاد ستون شود. همچنین اگر بخواهیم از بادبند هم استفاده نماییم باید در زیر شالوده های منفرد از شمع های کششی استفاده نماییم یا اینکه در زیر ستون هایی که بادبند به آنها متصل است از نوع دیگری از شالوده های منفرد استفاده نماییم. بنابراین مشاهده می شود که شالوده منفرد به طور کلی محدودیت های زیادی به همراه می آورد.

سوال:

چرا در سوله ها از شالوده منفرد استفاده می شود؟

پاسخ: سوله نشان داده شده در شکل روبرو در نظر بگیرید.



معمولاً سوله ها دارای ارتفاع زیاد بوده و بار جانبی قابل توجهی هم به آنها در اثر باد یا زلزله وارد می شود. بنابراین انتظار می رود لنگر های قابل توجهی در پای ستون ایجاد شود. حال اگر پای ستون گیردار باشد شالوده مورد استفاده باید برای مقادیر قابل توجهی لنگر طرح و اجرا شود که اینکار منجر به افزایش ابعاد شالوده در پلان خواهد شد.

بنابراین در سوله ها رویکرد دیگری انتخاب می شود. به جای گیردار کردن پای ستون، آنرا به صورت مفصل اجرا می نمایند. این کار باعث بازتوزیع لنگر در ستون و انتقال لنگر به سمت بالا می شود. حال برای مقابله با این لنگر مقطع ستون به صورت متغیر طرح می شود یعنی هرچه به سمت بالا می رویم ابعاد ستون افزایش می یابد. مشاهده می شود که در اینجا هم طرح روسازه بر زیرسازه تاثیر گذار است و بالعکس.

۱-۵-۲ شالوده دو ستونی (مرکب):

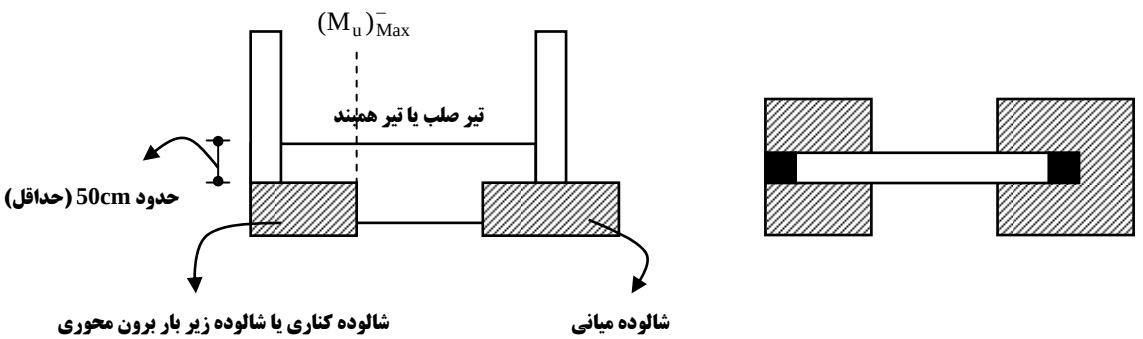
اگر دو ستون بهم نزدیک باشند (به نحوی که فاصلهٔ شالوده های منفرد آنها کمتر از نصف فاصلهٔ دو ستون گردد)، اقتصادی و مناسب است که از شالودهٔ دو ستونی استفاده شود (شکل ۱-۷). کاربرد اصلی این نوع شالوده در مواردیست که نمی توان یک ستون را به طور مرکزی بر روی شالودهٔ منفرد قرار داد مانند ستونهای کناری (در نوار مرزی ساختمانهای محدود). شالودهٔ دو ستونی می تواند به صورت مستطیلی، ذوزنقه ای، باسکولی،**T** شکل، حفره ای و تیری طرح شود. این شالوده ها به نحوی طراحی می شوند که مرکز هندسی آنها بر نقطه اثر برآیند بارهای وارده منطبق گردد.

(الف)

(پ) (ب)

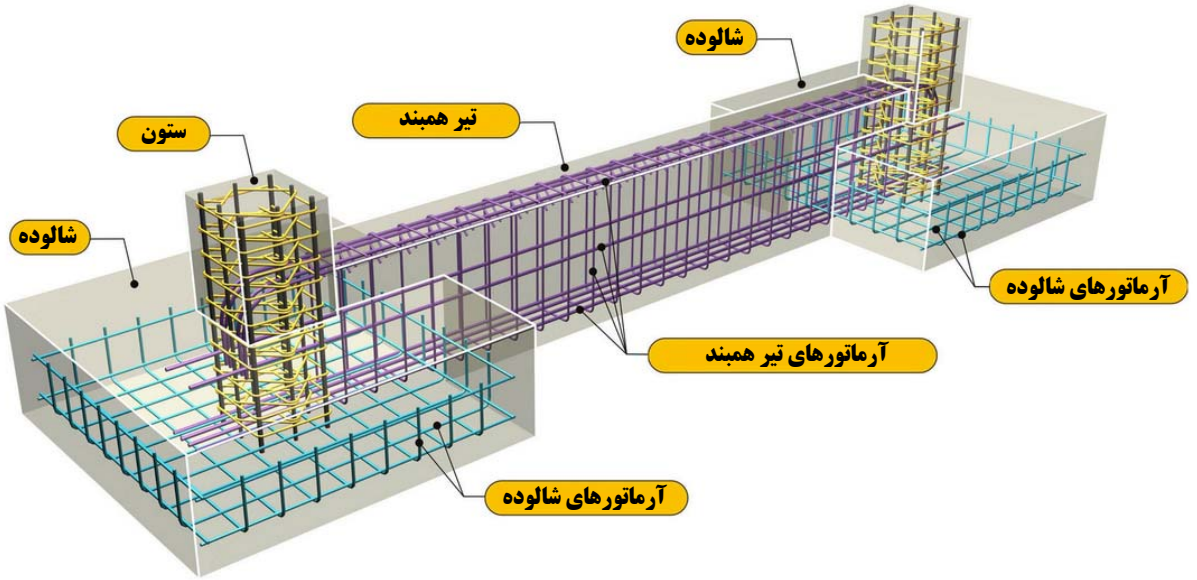
شکل ۱–۷ فونداسیون دو ستونی (الف) فونداسیون در حال اجرا (ب) نمای سه بعدی
(پ) فونداسیون قرار گرفته در مجاورت حریم

در فونداسون های باسکولی برای مقابله با خروج از مرکزیت ستون کناری، آن را توسط یک تیر قوی (تیر صلب یا تیر همبند) به داخل شالوده داخلی مجاور متصل می نمایند (شکل ۱-۸ و ۱-۹). اینکار ممکن است برای جلوگیری از نشست نامساوی ستونها مورد توجه قرار گیرد.



(ب) (الف)

شکل ۱–۸ فونداسیون باسکولی (الف) پلان (ب) عناصر تشکیل دهنده فونداسیون باسکولی



شکل ۱–۹ جزئیات اجرایی شالوده باسکولی

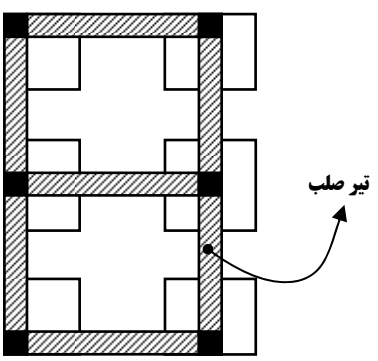
- **نکات مربوط به شالوده باسکولی:**

۱. تیر صلب بایستی بالاتر از سطح زمین قرار گرفته باشد (حداقل ۵ تا ۱۰ سانتی متر) تا در انتقال بار به زمین مشارکت نداشته باشد. تنها وظیفه این تیر به هم بستن شالوده ها به منظور جلوگیری از واژگون شدن شالوده کناری است.

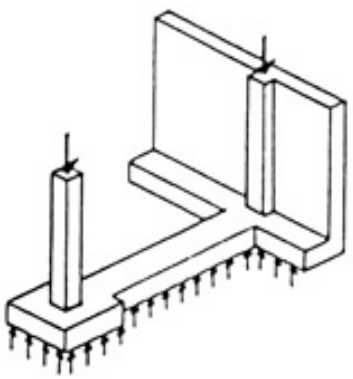
۲. ارتفاع تیر صلب بایستی به گونه ای اختیار شده باشد که ممان اینرسی آن حداقل به اندازه ممان اینرسی شالوده زیر بار برون محور باشد به همین علت ارتفاع تیر صلب از ارتفاع شالوده بیشتر است.

توجه: در اجرا مشاهده می شود به غلط به جای شالوده باسکولی از شالوده ای که ارتفاع شناژ آن برابر ارتفاع شالوده و میلگرد بیشتر در بالا است استفاده می کنند.

نکته: استفاده از شالوده های تک و باسکولی در مناطقی مثل تهران که ساختمان ها به صورت متراکم در کنار هم ساخته می شوند و شالوده ها خروج از مرکزیت دارند به کل مردود و ممنوع است. زیرا با توجه به شکل (۱–۱۰) برای رفع مشکل شالوده های تک باید تیر صلب به صورت شکل نشان داده اجرا شود اما ملاحظه می شود که پی باسکولی شامل بیش از ۲ ستون خواهد شد حال آنکه کلیه روابط شالوده باسکولی بر مبنای دو ستون محاسبه شده است.



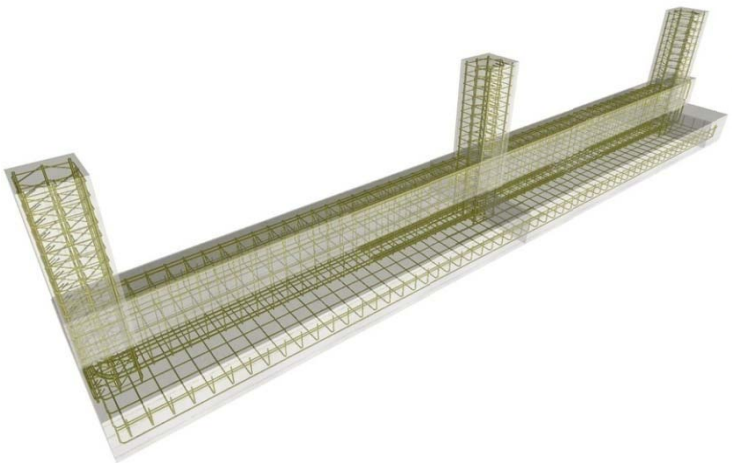
شکل ۱–۱۰



شکل ۱–۱۱

۱–۵–۳ شالوده نواری:

با اتصال فونداسیون های ستون های یک ردیف و یا برای فونداسیون زیر یک دیوار باربر فونداسیون نواری ایجاد می گردد که نسبت طول به عرض آن بسیار زیاد است شکل (۱-۶). این فونداسیون ها ممکن است با مصالح بنایی، بتن وزنی و یا بتن مسلح اجرا شوند. در صورت مسلح نمودن این فونداسیون ها، آرماتورهای اصلی در راستای طول قرار گرفته و آرماتورهای عرضی معمولاً نقش فرعی و مقابله با تغییر شکل های مربوط به نشست و یا حرارتی را دارند. برای افزایش سختی آن ها در مقابله با نشست غیر یکنواخت می توان آن ها را در مقطع عرضی به صورت **T** شکل و یا **T** معکوس اجرا کرد (شکل ۱-۱۲).

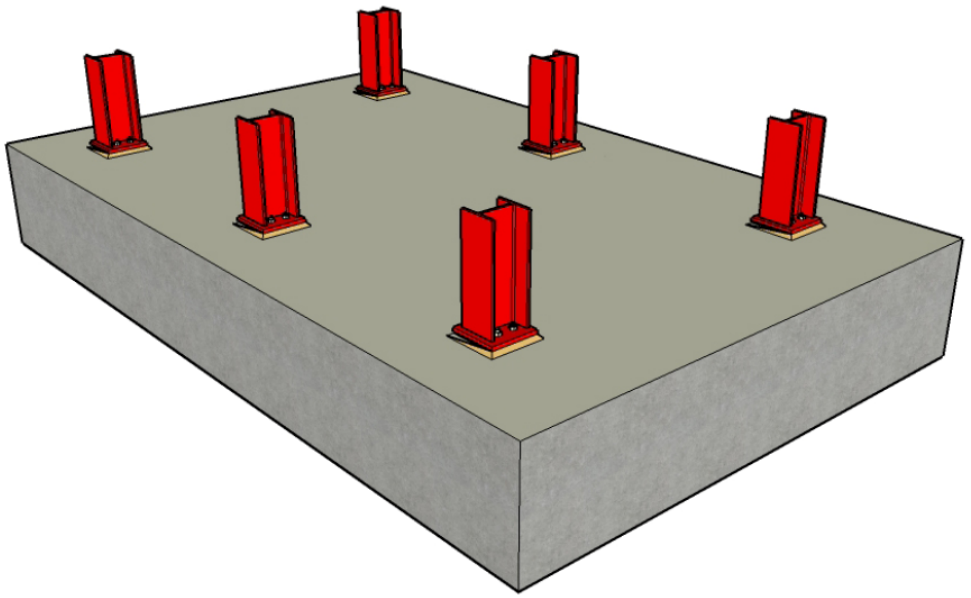


شکل ۱–۱۲ فونداسیون نواری

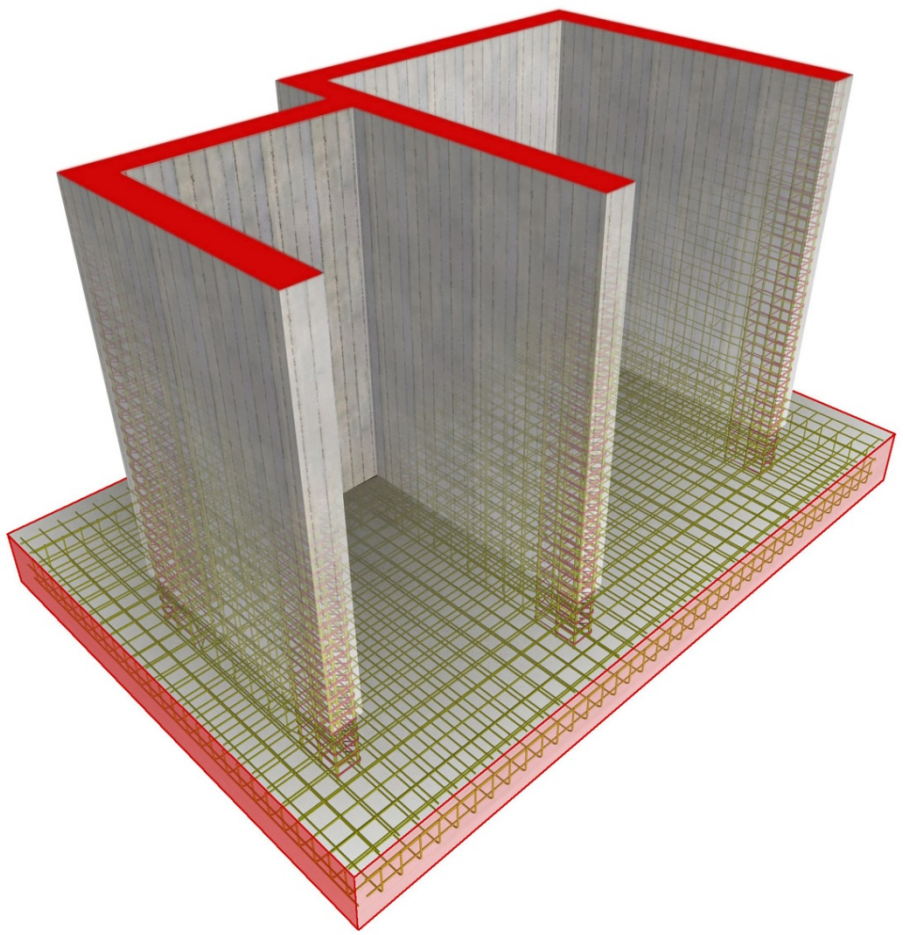
۱–۵–۴ شالوده شبکه ای:

به لحاظ اقتصادی (کاهش هزینهٔ قالب بندی) گاهی مقرون به صرفه است که شالوده های یک ردیف در هم ادغام و شالوده به صورت نواری اجرا گردد. چنانچه این نوارها در هر دو امتداد عمود برهم قرار گیرند شالودهٔ شبکه ای بوجود می آید (شکل ۱-۱۳). عملکرد این شالوده ها مرکب بوده و متفاوت از عملکرد شالوده های منفردی است که توسط کلاف به یکدیگر متصل می شوند. کلافها کلاً نقشی در جلوگیری از نشست شالوده های منفرد ندارند (قادر به حمل برش و خمش نمی باشند) و تنها صلبیت جانبی سازه را افزایش می دهند.

شکل ۱–۱۳ فونداسیون شبکه ای



(الف)



(ب)

شکل ۱–۱۴ فونداسیون گسترده (الف) فونداسیون گسترده با ستون های فولادی (ب) فونداسیون گسترده در زیر دیوار برشی بتنی

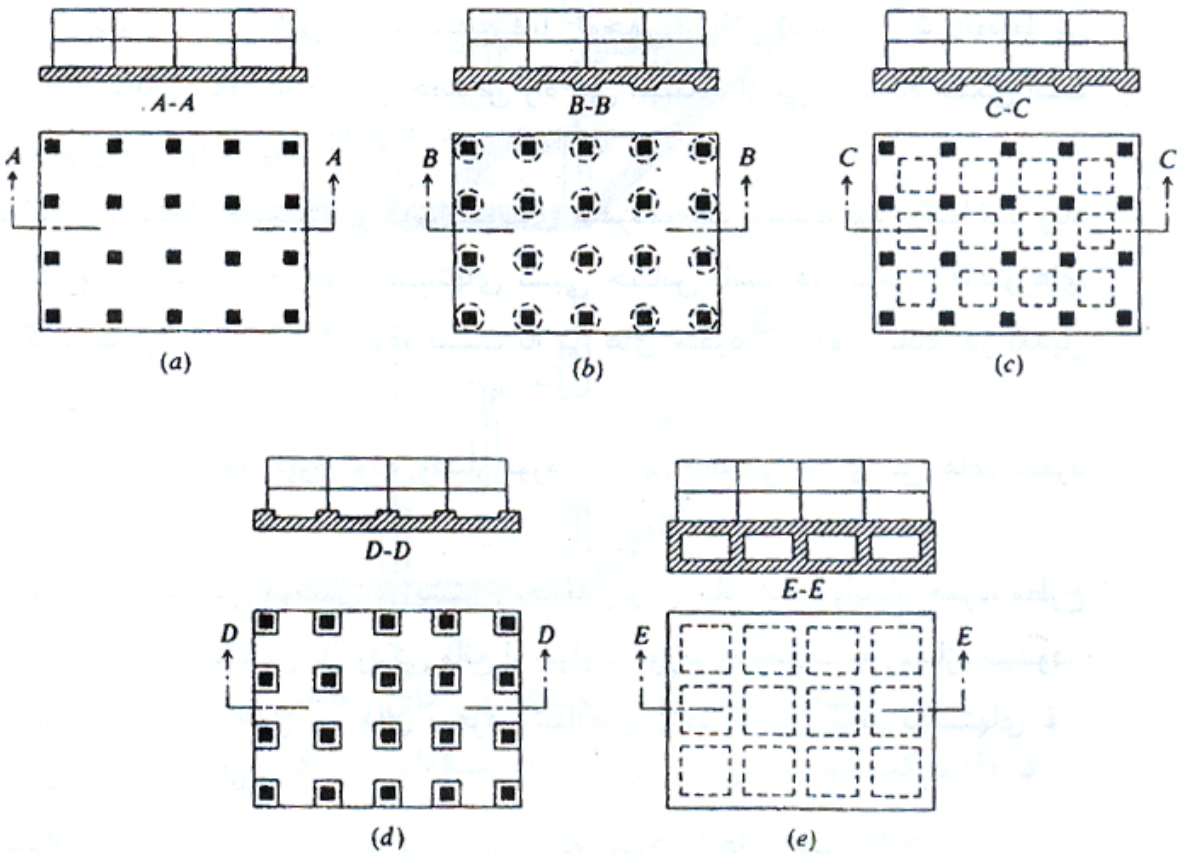
۱-۵-۵ شالوده های گسترده:

در صورت اجرای پروژه های بزرگتر و سنگین تر بر روی زمین های با مقاومت کمتر و یا در صورت تفاوت قابل ملاحظه بار دیوارها و ستون های مجاور، جهت ایجاد عکس العمل یکنواخت و به حداقل رساندن نشست های غیر یکنواخت، مقابله با عوارض موضعی و نقاط ضعف موضعی و نقاط ضعف موردی در خاک بستر، در صورتی که استفاده از فونداسیون های منفرد و یا نواری میسر نباشد و یا بخش عمدهٔ زمین زیر بنا توسط فونداسیون های منفرد، نواری و یا شبکه ای اشغال شود، تمام محدودهٔ زیربنا به ساخت فونداسیون اختصاص داده می شود و تمامی بارهای دیوارها و ستون ها توسط یک سیستم یکپارچه دالی تحمل می شود (شکل ۱-۱۴). به این سیستم، فونداسیون گسترده و یا به اصطلاح فرانسوی، رادیه جنرال گفته می شود و معمولاً دو سفره آرماتور در پایین و بالای فونداسیون در دو جهت طولی و عرضی در آن به کار گرفته می شود. فونداسیون گسترده نیز به اشکال مختلف در پلان و مقطع اجرا شده که چند سیستم سازه ای آن را در شکل ۱-۱۵ دیده می شود.

پی های گسترده دال های بتنی یکپارچه ای هستند که در پاره ای موارد با تلفیق تیرهای سخت کننده، دال های کف و سقف و دیوارهای پیرامونی یا میانی زیرزمینی، بار ستون ها و یا دیوارهای مختلف را حمل می کنند.

- **چه زمان هایی از شالوده گسترده استفاده می نماییم؟**

۱. بارهای روسازه نسبتاً بزرگ بوده و شرایط خاک بستر ضعیف است به قسمی که مساحت فونداسیون های سطحی به اندازه کافی بزرگ و سطح قابل توجهی از پلان (بیش از ۵۰٪) توسط فونداسیون های منفرد اشغال شود که در این خصوص راه حل استفاده از فونداسیون گسترده ممکن است اقتصادی تر و ایمن تر باشد.
۲. خاک بستر متغییر و استفاده از فونداسیون های منفرد موجب نشست غیر یکنواخت زیاد شده و یا روسازه نسبت به وقوع نشست های نسبت حساس باشد. در این مورد فاکتورهای پیوستگی، سختی نسبی فونداسیون گسترده نسبت به فونداسیون های منفرد تا حدود زیادی در تعدیل نشست ها موثر است.
۳. زمین زیر بنا مستعد تورم بوده و فشار تورم موجب جابجایی جدی فونداسیون های منفرد می شود.
۴. احتمال وقوع عوارض موضعی در بستر از جمله ریزش چاه، قنات و ایجاد حفره، مطرح بوده که فونداسیون گسترده با نقش پل زدگی مانع از سرایت عوارض نامطلوب به سازه می شود.
۵. ضعیف استحکام و سختی پی های منفرد و شناژهای رابط که نمی تواند نشست های غیر یکنواخت را تعدیل نماید.
۶. احتمال تخمین نادرست بارهای روسازه که وقوع بارهای غیر عادی ایجاد غیر یکنواختی در توزیع تنش و نشست را ممکن است به دنبال داشته باشد.
۷. بارهای جانبی به طور یکدست در روسازه توزیع نشده و ممکن است جابجایی های افقی بیش از حد مجاز به فونداسیون های منفرد را به همراه داشته که فونداسیون گسترده با یکپارچگی مانع چنین وضعیتی خواهد شد.
۸. کف زیر سازه پایین تر از تراز آب زیرزمینی واقع شده و آب بندی کف مهم می باشد. بکارگیری فونداسیون گسترده موجب جلوگیری از نفوذ آب به زیر زمین شده و علاوه بر این تا حدودی با زیر فشار مقابله می شود.
۹. جهت افزایش باربری و تقلیل نشست، راه حل پی شناور (گودبرداری و پی سازی جای آن) مطرح شده که در این راستا تلفیق فونداسیون گسترده با دیوارها و سقف زیرزمین می تواند راه حل مطلوبی باشد.



شکل ۱–۱۵ انواع مختلف فونداسیون های گسترده (a) سیستم دال تخت (b) سیستم قارچی (در بالا یا پایین) (c) سیستم دال دیوار (دال کف، دال سقف و دیوارهای میانی و جانبی (d) سیستم جعبه ای

۱–۶ تثبیت فونداسیون های سطحی

اگر نشست مورد انتظار یک فونداسیون سطحی زیاد باشد، آنگاه باید گزینه های دیگری همچون تثبیت خاک را مورد ارزیابی قرار دارد. بعضی از این راه حل های جایگزین عبارتند از:

۱. خاکریز سازه ای: در این روش خاک تراکم پذیر برداشته شده و با یک خاکریز سازه ای جایگزین می شود. این روش معمولاً زمانی اقتصادی است که خاک تراکم پذیر در نزدیکی سطح بوده و تراز آب زیرزمینی در زیر لایه خاک تراکم پذیر است یا اینکه تراز آب را می توان با هزینه کم کاهش داد.

۲. سربار: در صورتی که خاک از نوع چسبنده تراکم پذیر باشد، با قراردادن سربار در بالای سطح می توان خصوصیات آن را بهبود بخشید.

۳. متراکم سازی خاک. از روش های مختلف می توان برای متراکم سازی خاک شل یا نرم استفاده نمود. به طور مثال ویبروفولوتاسیون و تراکم دینامیکی اغلب در افزایش تراکم نهشته های ماسه ای شل موثرند. روش دیگر تزریق تحکیمی است. در این روش یک توده دوغاب پر مایه با فشار وارد خاک شده و علاوه بر جابجایی خاک باعث متراکم نمودن آن می شود.

۱–۷ فونداسیون های عمیق

از فونداسیون های عمیق زمانی استفاده می شود که خاک در اعماق سطحی دارای مقاومت باربری کافی نبوده و بارها باید به لایه های سخت زیرین منتقل شوند.

فونداسیون های عمیق را می توان به سه دسته تقسیم نود:

۱. سیستم های لاغر متداول یا شمع
۲. سیستم های قطورتر که شامل پایه های عمیق و کیسون ها می شود.
۳. فونداسیون های عمیق تثبیت شده با المان های ستونی

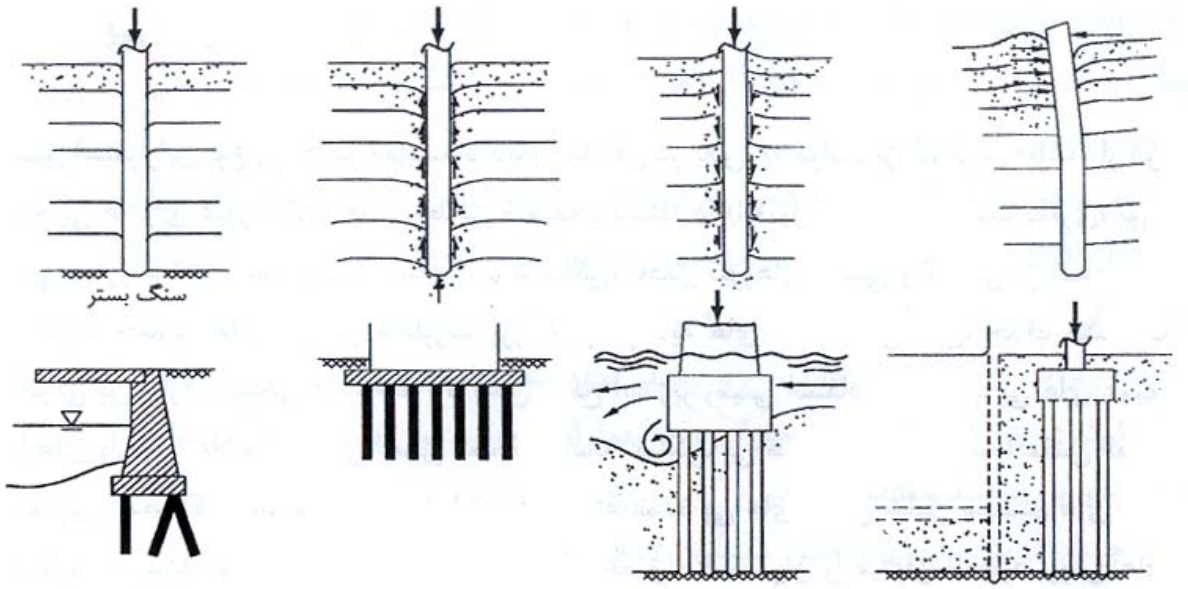
اغلب شمع های با قطر کم لاغر به داخل خاک کوبیده می شوند در حالی که شمع های قطور پس از خاک برداری و حفر یک چاه عمیق به صورت درجا اجرا می شوند. البته مرز مشخصی بین قطر این شمع ها وجود ندارد. از پایه های عمیق و کیسون ها (فونداسیون های صندوقه ای) عموماً برای احداث کوله ها یا پایه های میانی پل ها و فونداسیون های سنگین و خاص همانند دکل های نفتی استفاده می شود.

عمق استقرار فونداسیون های عمیق در مقایسه با دیگر ابعاد آن در پلان، به مراتب بزرگتر می باشد. از این نوع فونداسیون ها برای عبور از لایه های سطحی ضعیف و مسئله دار (از قبیل معضلات نشست پذیری، تورم زایی و فروریزشی)، مصونیت در مقابل آب شستگی، تحمل نیروهای جانبی و کششی بزرگ، مقابله با اثرات حفاری های آتی در مجاورت پروژه، تراکم لایه های ضعیف در عمق، حذف مشکلات اجرایی پی سازی سطحی در شرایط بالا بودن سطح آب زیرزمینی استفاده می شود. در مبحث ۷ مقررات ملی ساختمان معیار دیگری برای پی عمیق عنوان شده است و آن عبارت است از اینکه هرگاه نسبت عرض به ارتفاع پی کمتر از یک ششم باشد و عمق آن از سه متر تجاوز نماید به آن پی عمیق می گویند. پی های عمیق بارهای وارده را علاوه بر عکس العمل کف که مشابه عملکرد پی های سطح است، با عکس العمل جداری (اصطکاکی) نیز تحمل می نمایند. روش های مختلفی برای اجرای پی های عمیق مطرح است. شمع های کوبیدنی از نوع چوبی، بتنی و یا فولادی که از طریق انواع چکش ها، جک ها و ویبراتورهای کوبنده، به زمین رانده می شوند. شمع ها و پایه های درجا توسط حفاری چاه و یا گمانه و سپس ریختن مصالح بنایی، بتنی وزنی و یا مسلح و یا استقرار مقاطع پیش ساخته در مجاری حفاری شده اجرا می گردند. شمع های کوبیدنی-درجا نیز شامل مواردی می شوند که ابتدا یک پوسته و یا غلاف به زمین رانده شده و سپس داخل آن با بتن پر می شود. پوسته و یا غلاف پس از بتن ریزی در محل باقی مانده و یا بیرون کشیده می شود. شکل ۱-۱۶ چند نمونه از پی های عمیق را نشان می دهد.

در این قسمت به بررسی هر یک از این سیستم های انتقال بار می پردازیم.

۱–۷–۱ شمع ها:

رایج ترین نوع فونداسیون عمیق شمع ها **(Pile)** هستند. یک شمع عضو سازه ای نسبتاً بلند، لاغر و ستون مانندی است که با قرار گرفتن در داخل خاک وزن سازه را به خاک زیرین منتقل می نماید. شمع در واقع همان ستون است که در داخل خاک مستقر شده. شمع بارهای وارده از روسازه را در عمق خاک عبور داده و آنرا به خاک مقاومتر (در عمق بیشتر) منتقل می کند.



شکل ۱–۱۶ نمونه هایی از کاربردهای فونداسیون های عمیق

- **شمع ها را می توان به طرق مختلف دسته بندی نمود:**

دسته بندی شمع ها از لحاظ نوع جنس:

(۱) شمع های بتنی (بتن پیش ساخته و یا بتن درجا)

(۲) شمع های فولادی

(۳) شمع های چوبی (چوب فرآوری شده)

(۴) شمع های با مصالح ترکیبی

دسته بندی شمع ها از لحاظ نحوهٔ انتقال بار به زمین:

(۱) شمع های باربری نوک

(۲) شمع های اصطکاکی

(۳) شمع های با باربری نوک و جداره

(۴) شمع های مایل

دسته بندی شمع ها از نظر نحوه اجرا:

(۱) شمع های کوبشی (پیش ساخته)

(۲) شمع های درجا

در ادامه هر یک از دسته بندی های فوق را به طور مختصر و مجزا مورد بررسی قرار می دهیم.

بررسی شمع ها از منظر جنس مصالح:

شمع های فولادی: انواع معمول شمع های فولادی، شمع های لوله ای و شمع های **H** می باشند. شمع های لوله ای نیز در دو حالت انتهای بسته و انتهای باز به زمین کوبیده می شوند. هرچند که از تیرآهنهای **I** و بال بهن نیز می توان برای شمعکوبی استفاده کرد، لیکن تیرآهن ها با نیمرخ **H** به علت مساوی بودن ضخامت بال و جان معمولاً ترجیح داده می شوند.

در صورتی که طول مورد نیاز برای شمع بزرگتر از طول یک شاخه شود، شمع های فولادی را به وسیله جوش و یا پرچ به یکدیگر وصله می کنند. وقتی که انتظار لایه ای سخت نظیر شن متراکم، شیل و سنگ نرم می رود در نوک شمع فولادی از کفشک[1] استفاده می شود. در زمین های باتلاقی، خاک های نباتی، مناطق ساحلی و سایر خاک های خورنده، املاح خاک و آب می توانند شمع های فولادی را تحت حملات شیمیایی قرار داده و خرودگی ایجاد نمایند. خاک هایی که **pH** آن ها بزرگتر از ۷ است خورنده نیستند. برای جبران کردن کاهش ضخامت به علت خوردگی بر ضخامت محاسباتی، معمولاً یک ضخامت اضافی در نظر گرفته می شود. برای جلوگیری از خوردگی، در روی شمع ها می توان از یک لایهٔ پوشش اپوکسی استفاده کرد. این پوشش که در کارخانه روی شمع ها زده می شود، در هنگام حمل و نقل و کوبیدن شمع، به سختی آسیب پذیر است. گاهی مواقع برای جلوگیری از خوردگی شمع فولادی، از پوشش بتنی استفاده می شود.

شمع های بتنی:

این نوع شمع ها به دو دسته تقسیم می شوند . شمع های بتنی پیش ساخته و شمع های ساخته شده در محل. شمع های بتنی پیش ساخته را می توان تقریباً به هر شکل و اندازه ای در کارخانه ساخت. مقاطع معمول این نوع شمع ها مربع، دایره و چند ضلعی است. شمع های بتنی پیش ساخته معمولا با طول ۱۸ متر می سازند. در سر شمع های بتنی پیش ساخته برای جلوگیری از تخریب شمع در موقع کوبیده شدن کلاهک فلزی نصب می کنند.

شمع های چوبی:

شمع های چوبی از جمله پر مصرف ترین نوع شمع ها هستند. مقطع آنها معمولاً به شکل مربع و به ابعاد $22.5\times22.5\text{cm}$ تا $65\times65\text{cm}$ به طول ۱۲ متر ساخته می شود. این شمع ها از تنهٔ درختی با چوب سخت نظیر کاج و بلوط درست شده است و دو سر آنها برای جلو گیری از خوردگی شن در موقع کوبیدن با کلاهک فلزی مسلح می سازند.

شمع های چوبی از جمله مقطع دایره ای را معمولاً بدون کندن پوست بکار می برند تا نیروی اصطکاک حاصله بین سطح جانبی شمع و زمین به حداکثر مقدار ممکنه افزایش یافته و شمع قابلیت تحمل فشار زیادی داشته باشد. قطر شمع های چوبی استوانه ای ۲۰ تا ۲۵ سانتی متر است. شمع های چوبی نسبت به شمع های دیگر ارزانتر و از لحاظ برش و اتصال آسانتر و حمل و نقل و اجرای آنها نیز نسبتا راحت است. حداکثر طول شمع ها را به فواصل ۸۰ تا ۱۲۰ سانتی متر از همدیگر و به صورت یک در میان می کوبند. پس از آنکه شمع به اندازه کافی در زمین فرو رفت انتهای آن را با ارهٔ مخصوص قطع می کنند به طوریکه همگی در یک سطح قرار می گیرند. برای آنکه فشار یکنواختی به شمع ها وارد آید می توان آنها را با با چوب های افقی بهم وصل کرد و روی آنها قرار داد. امروزه روش های مختلفی برای جلوگیری از پوسیدگی چوب در آب و یا در خشکی وجود دارد که با استفاده از آنها به میزان قابل توجهی از خطر پوسیدگی و حملهٔ حشرات کاسته می شود.

[1] Driving point or shoe

شمع های مرکب

در شمع های مرکب، قسمت فوقانی و تحتانی شمع از دو مصالح مختلف ساخته می شوند. به عنوان مثال، شمع های مرکب ممکن است از فولاد و بتن و یا چوب و بتن ساخته شوند. شمع های مختلط فولاد و بتن مرکب از قسمت تحتانی فولاد و قسمت فوقانی بتن درجا می باشند. از نوع شمع وقتی مورد استفاده قرار می گیرد که طول شمع لازم برای تامین ظرفیت باربری از ظرفیت باربری بتن درجای ساده تجاوز کند. شمع های مختلط چوب و بتن دارای قسمت تحتانی چوبی می باشند که به طور دائم در سفرهٔ آب زیرزمینی قرار دارد و قسمت فوقانی آن ها از بتن است. در هر صورت ایجاد وصله در محل تلاقی دو مصالح مشکل بوده و به همین علت است که شمع های مختلط دارای کاربرد وسیعی نمی باشند.

بررسی شمع ها از منظر نحوه انتقال بار:

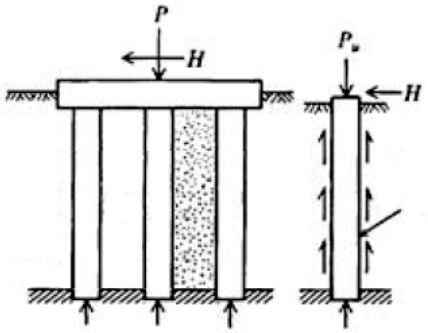
- شمع های با باربری انتهایی: شمعی که قسمت عمده باربری آن توسط مقاومت مصالح فونداسیون که نوک شمع در روی آن قرار گرفته انجام می شود. از شمع های باربری نوک معمولاً در خاک هایی استفاده می شود که در آن لایه خاک سفت در زیر لایه فوقانی نرم قرار گرفته است. در صورتی که لایه نرم فوقانی نشست هم نماید شمع در معرض یک نیروی رو به پایین اضافی هم قرار می گیرد که شمع باید برای تحمل این نیرو ها هم طراحی شده باشد.
- شمع های اصطکاکی: در مواقعی که زمین خوب در اعماق زیاد و دور از دسترس باشد ممکن است شمع ها مقاومت خود را از طریق نیروی اصطکاکی که بین سطوح جانبی آنها و زمین به وجود می آید کسب می کنند. این نوع شمع ها را شمع های اصطکاکی می نامند. از شمع های اصطکاکی اغلب در رس های نرم که مقاومت انتهایی کم بوده و احتمال برش سوراخ کننده در نوک شمع وجود دارد استفاده می شود. شمعی که در برابر نیروهای رو به بالا یا برکنش مقاومت می کند هم جزو شمع های اصطکاکی محسوب می شود.
- شمع های با باربری نوک و جداره: شمعی که بار را از طریق ترکیب مقاومت جدار و نوک انتقال می دهد در این رده قرار می گیرد.
- شمع مایل: شمعی که با زاویه مایل داخل خاک کوبیده می شود تا مقاومت بیشتری در برابر بارهای جانبی ایجاد نماید.

بررسی شمع ها از منظر نحوه اجرا:

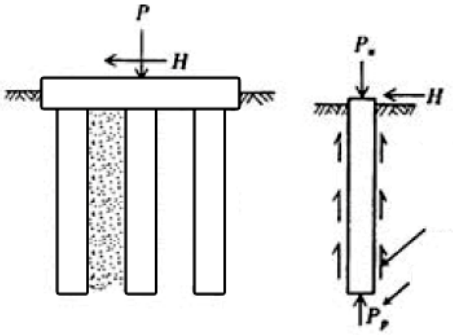
شمع ها یا به داخل خاک کوبیده می شوند یا اینکه پس از حفر چاه در داخل آن به صورت درجا اجرا می شوند. شمع هایی که به داخل خاک رانده می شوند بسته به میزان خاکی که به طرفین می رانند به دو نوع جابجایی کم و جابجایی زیاد تقسیم می شوند. مثال هایی از شمع های کوبشی با جابجایی کم، مقاطع H و لوله های فولادی ته باز هستند. شمع های با جابجایی زیاد هم شمع های با مقاطع پر همانند شمع های چوبی یا بتنی پیش ساخته و لوله های فولادی با انتهای بسته هستند.

آرایش های معمول شمع ها در شکل ۱-۱۷ نشان داده شده اند.

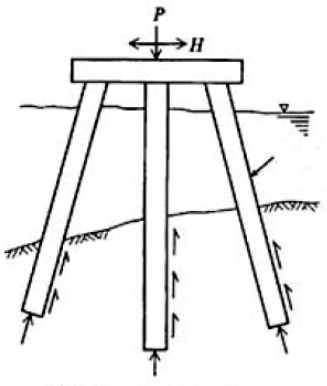
ظرفیت باربری یک شمع بستگی به مقاومت شمع و مقاومت خاک زیرین دارد. تخمین ظرفیت باربری شمع ها بسیار پیچیده است. ظرفیت باربری شمع ها را می توان توسط تحلیل های استاتیک، تحلیل های دینامیک یا آزمایش های بارگذاری بدست آورد. در تحلیل های استاتیکی که اغلب برای طرح اولیه استفاده می شود، ظرفیت باربری بر مبنای ملاحظاتی همچون مقاومت خاک، هندسه شمع، مقاومت کف، مقاومت جداری، اثر گروه، وجود لایه باربر و ..... بدست آورد.



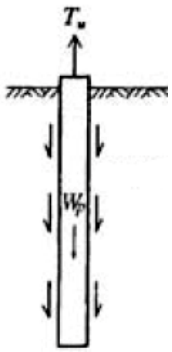
(الف) شمع تک یا گروه شمع در روی خاک سخت یا سنگ



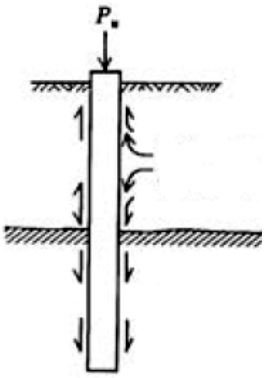
(ب) شمع تک یا گروه شمع شناور در توده خاک



(پ) گروه شمع مایل در ساحل دریا



(ت) شمع کششی



(ث) شمع نفوذ کرده در داخل خاکی که یا متورم می شود یا تحکیم می یابد

شکل ۱–۱۷ آرایش معمول شمع ها

در شمع های بلند لاغر، مقاومت نوک شمع دارای اهمیت کمی می باشد در نتیجه این شمع ها معمولاً به صورت اصطکاکی عمل می نمایند هرچند در خاک های رسی بیشتر مقاومت توسط چسبندگی تامین می شود. تخمین طول شمع همواره کار راحتی نیست. چنانچه شمع ها از نوع باربری نوک بوده و در روی مصالح سخت سنگ مانند قرار گرفته باشند، در این حالت طول شمع مشخص بوده و شمع همانند یک ستون کوتاه عمل می نماید که می توان اثر خاک نرم اطراف آن را در نظر نگرفت. بنابراین اندازه شمع بستگی به ظرفیت باربری مصالح باربر کف و مقاومت شمع دارد. اما زمانی که خاک باربر سختی وجود ندارد، باید از شمع های اصطکاکی استفاده نمود. در این حالت طول شمع بستگی به اندازه شمع و مقاومت جداری در طول شمع دارد که این مقاومت خود بستگی به مقاومت برشی خاک یا چسبندگی رویه شمع دارد. بعضی وقت ها نیز شمع ها پس از عبور از یک لایه خاک نرم و برخورد با یک خاک سخت چندین متر در داخل این خاک ادامه یافته و به صورت یک شمع اصطکاکی –باربری کف عمل می نماید. شمع های کوتاه را می توان داخل خاک های دانه ای کوبید تا خاک نزدیک سطح زمین متراکم شود. چنین شمع هایی را شمع های تراکمی می گویند. از شمع ها معمولاً به صورت گروهی استفاده می شود به طور مثال می توان از سه شمع برای تحمل وزن یک ستون با بار سنگین استفاده نمود. برای توزیع مناسب بارها از روسازه به شمع ها معمولاً از یک کلاهک بتنی یا همان سرشمع استفاده می شود. یک گروه متشکل از چندین شمع را می توان با هر نوع آرایشی در زیر ستون، دیوار یا فونداسیون های مرکب استفاده نمود. معمولاً برآیند نیروهای شمع ها با برآیند بارهای وارده منطبق است. فاصله شمع ها باید به اندازه ای باشد که ظرفیت باربری هر شمع منفرد کاهش پیدا نکند در غیر اینصورت رفتار گروهی باید در نظر گرفته شود.

در صورتی که گروه شمع در معرض نیروهای جانبی بوده و مقاومت جانبی شمع های قائم پاسخگوی نیروی جانبی نباشد، آنگاه باید از شمع های زاویه دار یا مایل استفاده شود. علاوه بر این در صورتی که نیروهای لنگر واژگونی نیز قابل توجه باشد، آنگاه شمع ها باید در مقابل نیروی کششی هم مقاومت نمایند.

۱-۷-۲ پایه های عمیق و کیسون ها

فونداسیون از نوع پایه های عمیق **(Pier)**، یک سیستم فونداسیون مشابه شمع های درجا است که از اعضاء ستون مانند بتن مسلح تشکیل شده است. قطر پایه های عمیق آنقدر هست که بتوان داخل آن ها را بازرسی چشمی نمود. به پایه های عمیق اغلب محورهای حفاری شده، شمع های درجا یا کسیون های حفاری شده هم می گویند. شکل ۵-۷ مراحل معمول اجرای یک پایه عمیق حفاری شده را نشان می دهد.

باید توجه داشت که پایه های عمیق و کیسون ها اندکی با هم متفاوت اند. پایه های عمیق مشابه شمع های درجا بوده و اغلب دارای قطر بزرگی هستند و از بتن مسلح ساخته می شوند اما کیسون ها همان پایه های عمیق با قطر بزرگ هستند. کیسون همچنین می تواند یک سازه آب بند زیرزمینی باشد که عملیات ساختمانی در داخل آن انجام می گیرد.

کیسون ها را به سه دسته می توان تقسیم نمود:

۱. فونداسیون های صندوقه ای جعبه ای یا شناور (روباز و ته بسته)
۲. پی صندوقه ای باز (روباز و ته باز)
۳. پی صندوقه ای بادی (رو بسته، ته باز و پر شده با هوای متراکم جهت جلوگیری از ورود آب به داخل فضای داخلی)

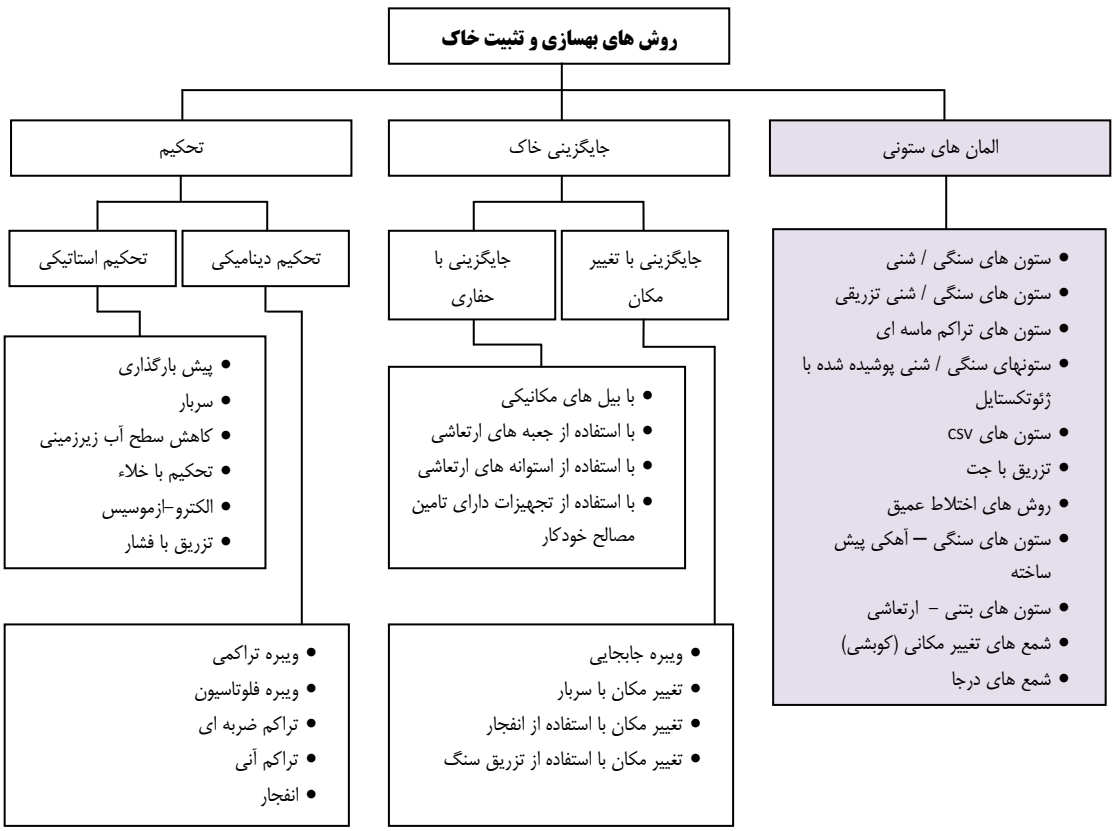
در عمل از این نوع پی ها بیشتر برای سازه های دریایی استفاده شده و بصورت پیش ساخته می باشند به نحوی که بتوان آنها را بصورت شناور به محل مورد نظر حمل و سپس آنرا تثبیت نمود. تثبیت صندوقه در محل با پر کردن آن از آب و یا مصالح وزین دیگر انجام می شود.

۱-۷-۳ فونداسیون های عمیق تثبیت شده با المان های ستونی

در هنگام ساخت و اجرای راه ها، راه آهن ها و دیگر سازه های مهندسی بر روی خاکهای نرم معمولاً با مسائلی همانند نشست های بیش از اندازه، تغییر شکل و مسائل مربوط به پایداری مواجه می شویم. برای جلوگیری و یا کاستن از این گونه مسائل روش های متعددی در مهندسی ژئوتکنیک وجود دارد که بهسازی و تثبیت خاک یکی از آن ها می باشد. بهسازی و تثبیت خاک حوضه ی وسیعی از روش ها و تکنیک ها را شامل می شود. این روش ها به صورت طبقه بندی شده در شکل ۱-۱۸ نمایش داده شده اند. البته در این فصل ما فقط خود را محدود به روش های تثبیت خاک با استفاده از المان های ستونی خواهیم نمود.

روش های بهسازی خاک با استفاده از المان های ستونی در مهندسی ژئوتکنیک از سال ۱۹۶۰ تا به اکنون رشدی روزافزون را شاهد بوده است. این روش ها در ساخت راه ها و خاکریزهای راه آهن و همچنین فونداسیون های مخازن، انبارها و ساختمان های سبک به کار گرفته می شوند. اصل اساسی در این روش، کاهش و تخفیف بار وارده بر خاک های نرم بدون

ایجاد تغییر قابل توجه در ساختار آن ها می باشد و این امر با نصب سازه های ستون و یا شمع مانند با الگویی شبکه ای که تا لایه باربر امتداد دارند محقق می گردد. بر روی ستون ها از یک پلتفورم انتقال بار که معمولاً شامل مسلح کننده های ژئوتکستایل یا ژئوگرید و یا یک صفحه ی صلب است استفاده می شود. کاهش تنش در خاکهای نرم ناشی از توزیع مجدد بارهای خاکریز از طریق اثر قوس زدگی و متعاقب آن مسلح کنندگی ژئوتکستایل و یا ژئوگرید است که این مسلح کنندگی توسط اثر غشایی تأمین می شود. در نتیجه تراکم پذیری خاک بهسازی شده کاهش یافته و ظرفیت باربری و مقاومت برشی افزایش می یابد. از آنجائیکه اکثر سازه های شمع مانند همانند زهکش های قائم عمل می نمایند، تحکیم خاکهای نرم تسریع یافته و بنابراین نشست ها پس از احداث سازه به میزان قابل توجهی کاهش می یابند.



شکل ۱–۱۸ روش های مختلف تثبیت و بهسازی خاکها (Kempfert, 2006)

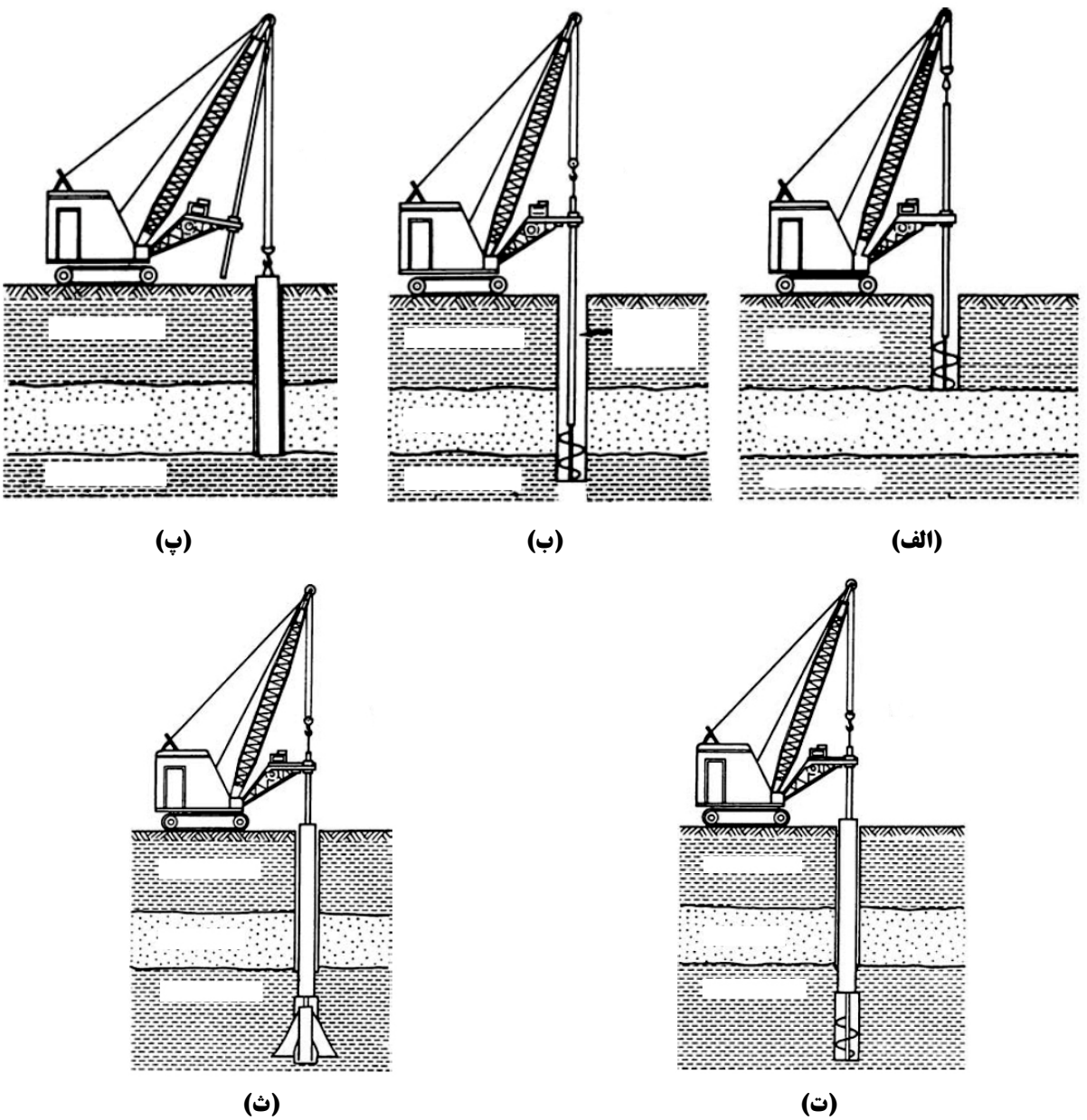
روش ها بسیاری برای ایجاد المان های عمیق وجود دارند. البته این روش ها را اغلب در قالب سیستم های تثبیت خاک درنظر می گیرند ولی به هر حال عملکرد آنها ایجاد یک فونداسیون عمیق جهت انتقال بار به لایه های زیرین است. تعدادی از این روش ها عبارتند از:

شمع های اختلاط درجا: این شمع ها با استفاده از تزریق با فشار دوغاب سیمان یا آهک داخل خاک ایجاد می شوند. همزمان با تزریق دوغاب به داخل خاک یک مته یا پره، خاک را اختلاط می نماید تا شمع درجا ایجاد شود.

ستون های سنگی ارتعاشی: در این روش با استفاده از غرقاب کردن و ایجاد ارتعاش یا دیگر روش ها یک حفره قائم استوانه ای در داخل خاک ایجاد شده و با شن یا سنگ متراکم پر می شود.

ستون های سنگی تزریقی: این روش مانند روش فوق است با این تفاوت که حفارت با بنتونیت سیمان یا مخلوط آب-ماسه-بنتونیت پر می شوند.

ستون های لرزه ای بتنی: مشابه ستون های سنگی اما به جای سنگ از بتن استفاده می شود.



شکل ۱-۱۹ روش اجرای پایه های عمیق

دال سطحی به عنوان پی گسترده جهت تامین پاره ای ضروریات اجرایی، فنی، اقتصادی و سرویس دهی ممکن است به طور خاصی در عمل مورد استفاده قرار گیرد که در ادامه به بررسی تعدادی از این فونداسیون های خاص می پردازیم.

۱–۸–۱ پی های شناور[1]:

پی های شناور در مواردی کاربرد دارند که لایه های نشست پذیر و یا ضعیف تا عمق قابل توجهی وجود داشته و استفاده از شمع هم امکان پذیر نباشد. در آن صورت می توان پی گسترده سازه را در عمق پایین تر مستقر و با برداشت خاک حاصل از گودبرداری با بار ثقلی حاصله از روسازه مقابله و یا حتی فشار روسازه با میزان خاک حاصل از حفاری معادل نمود. در این حالت آنقدر خاک حفاری و برداشت می شود که وزن خاک گودبرداری شده بعلاوه نیروهای بلند کننده ناشی از فشار هیدرواستاتیکی با بار ناخالص روسازه و زیرسازه برابر شود. به عبارت دیگر فشار در کف خاک گودبرداری شده تغییر نخواهد کرد. یعنی فشار خاک جابجا شده برابر فشار ایجاد شده توسط ساختمان خواهد شد و به لحاظ نظری نشستی ایجاد نخواهد شد. در این حالت به نظر می رسد که سازه در روی خاک همانند کشتی در روی آب شناور است. چنانکه وزن خاک جابجا شده در اثر حجم زیرزمین سازه طبق اصل ارشمیدس وزن سازه شناور را به تعادل رسانده است. معمولاً یک متر مکعب خاک را می توان به لحاظ وزنی معادل دو طبقه ساختمان مسکونی معمولی در هر متر مربع به حساب آورد. به طور طبیعی این مسئله تنها یک مدل نظری می باشد زیرا در اثر تغییر بارهای زنده و تراز آب زیرزمینی، ناهنگمنی خاک و تراکم مجدد آماس خاک حفاری شده، مقداری نشست رخ خواهد داد.

برای ساختمان های بلند استفاده از ایده شناوری نیازمند ایجاد چندین طبقه زیرزمین خواهد بود که خود با مشکلات اجرایی بسیاری همراه است و بعضاً وزن طبقات زیرزمینی خود قابل توجه می باشد. بنابراین استفاده از فونداسیون های گسترده با شناوری جزئی به جای شناوری ناقص اقتصادی تر خواهد بود. همچنین از آنجایی که فونداسیون های گسترده شناور در عمق خاک اجرا می شوند مسئله تراز آب زیرزمینی باید در نظر گرفته شود مخصوصاً تراز آب زیرزمینی بالا در فصول بارانی. در چنین حالتی نیاز به فونداسیون های جعبه مانند آب بند خواهد بود (شکل ۱-۲۰). در طراحی چنین فونداسیون هایی اثر غوطه وری و فشارهای جانبی باید مدنظر قرار گیرند.

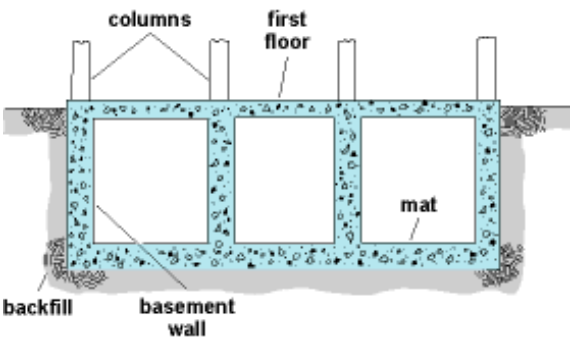
۱–۸–۲ پی های سلولی و پوسته ای[2]:

بر اساس استفاده از عملکرد، شکل پی در ساختار پی های شناور و یا تقلیل وزن مرده بتن در پی های حجیم مدفون، و نیز تامین سختی کافی در طبقات مختلف زیرزمین از صفحات متناوب و متقاطع جهت تامین مقاومت کافی در مقابل نیروهای برشی و لنگر خمشی و نیز صرفه جویی در احجام بتن و آرماتور مصرفی استفاده می شود (شکل ۱-۲۱). ویژگی های فرمی روسازه عاملی تعیین کننده در انتخاب شکل این پی ها می باشد.

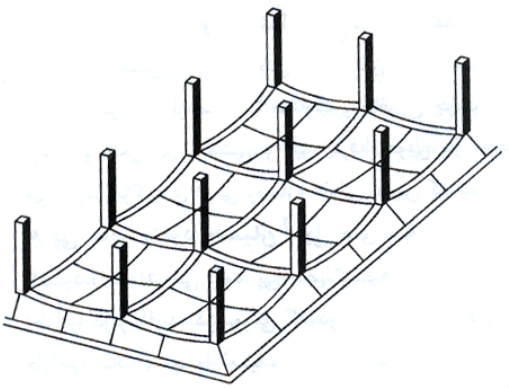
[1] Floating (Buoyant) Foundations
[2] Cellular or Shell Foundations

۱–۸–۳ پی های باکسی با جعبه ای[1]:

در مواردی که سازه سنگین تر و از اهمیت ویژه ای برخوردار باشد، سیستم فونداسیون باید از صلبیت خمشی ویژه ای برخوردار بوده که بدین ترتیب تلفیق دال های کف و سقف و نیز دیوارهای اطراف و میانی زیرزمین، ملاحظات خاص تحلیل، طراحی سازه ای و اجرای پی های شناور را مطرح می سازد.



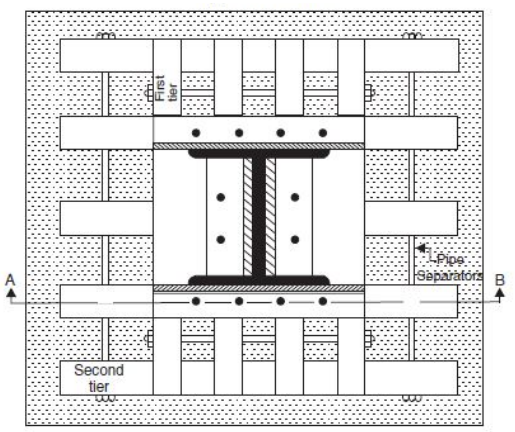
شکل ۱–۲۰ فونداسیون شناور



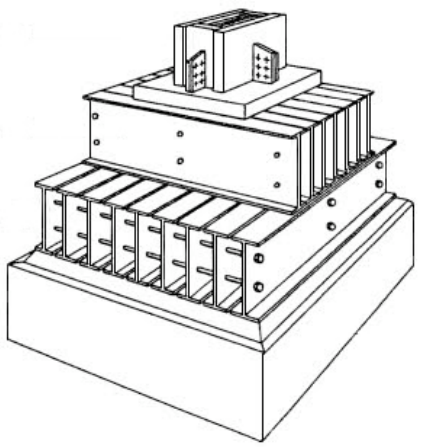
شکل ۱–۲۱ فونداسیون پوسته ای

۱–۸–۴ پی های فولادی یا پروفیله[2]:

استفاده از پی های فولادی در مواردی است که بارهای حاصل از روسازه سنگین و زمین بستر سخت و یا سنگی باشد و راه حل های استفاده از بتن مسلح پاسخگوی وضعیت سیستم های معمول پی سازی نبوده که در این صورت استفاده از پروفیل های فولادی بال پهن در دو لایه عمود و بر روی یکدیگر با قالب بتنی درجا در اطراف به کار گرفته می شود (شکل ۱-۲۲). در موارد بارهای کمتر و در دسترس نبودن پروفیل های بال پهن فولادی و یا پی سازی موقتی در بستر های سست، می توان از دو ردیف الوارهای چوبی متعامد روی هم محصور در بتن استفاده کرد.



(الف)



(ب)

شکل ۱–۲۲ شالوده فولادی یا پروفیله (الف) نمای فوقانی (ب) نمای سه بعدی

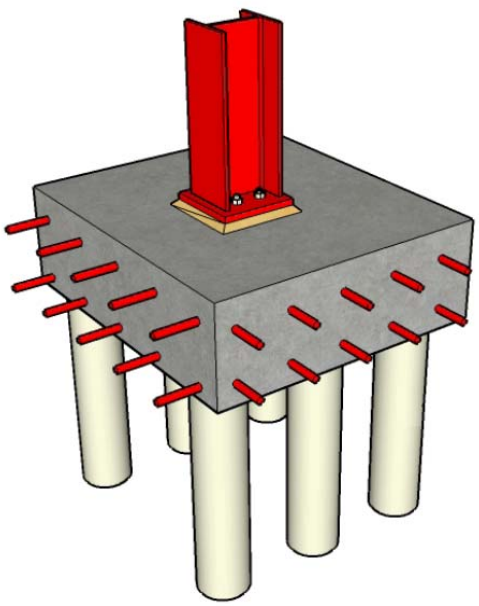
[1] Box Foundations
[2] Grillage

۱–۸–۵ پی های منفرد چسبنان[1]:

پی های منفرد چسبان به عنوان جایگزینی برای پی های گسترده استفاده می شود. پی های گسترده معضلاتی از نقطه نظر تحلیل، طراحی و در نهایت اجرا را در بر دارند. در صورتی که در پی های منفرد با فرض صلبیت آن ها روش های تحلیل و طراحی، ساده و معمول می باشد. در اجرا نیز با وجود شبکه آرماتور فوقانی در پی های گسترده، معضلات دسترسی برای بتن ریزی و عبور بتن از شبکه آرماتور بالایی وجود داشته و مضافاً به این که با توجه به ابعاد قابل توجه پی گسترده در سطح، مشکلاتی نیز در اجرای یکپارچه بتن مطرح است لذا برای تسهیل در طراحی و اجرا می توان بجای پی گسترده، یک ردیف پی هیا منفرد، مجاور را جایگزین آن نمود که به صورت منقطع در قسمت بالایی و متصل در قسمت پایینی بوده و لذا به علت عدم پیوستگی در بالا، لنگری رد و بدل نشده و مانند پی های منفرد نیازی به سفرهٔ آرماتور پایین مطرح می شود. جهت سهولت بیشتر در اجرا و ایفای نقش شناژ می توان یک سفرهٔ مشترک حداقل آرماتور در پایین پی های مجاور منظور نموده و سپس در صورت لزوم هر پی تک، آرماتور اضافی منظور گردد. سیستم پی های منفرد در زیر یکپارچه شده و علی رغم مجاورت و سراسری بودن پلان فونداسیون، مدل پی منفرد را می توان در تحلیل، طراحی و اجرا به کار گرفت.

۱–۸–۶ تلفیق پی گسترده و پی های عمیق:

اگرچه پی گسترده در میان پی های سطحی راه حل نسبتاً مناسبی به شمار می رود ولی ایراداتی از قبیل معضلات اجرایی و بتن ریزی یکپارچه، غیر اقتصادی بوده و در نهایت وقوع نشست های زیاد را به دنبال دارد. به طور کلی وقوع نشست در خاک اعم از تحکیمی و آنی را می توان تابعی از شدت بارگذاری (q) و عرض پی (B) محسوب نمود (اسلامی و همکاران، ۱۳۸۳). در این صورت با توجه به عرض نسبتاً زیاد پی های گسترده در مقایسه با پی های نواری و منفرد و منطقه تاثیر تنش نسبتاً زیاد در زیر پی معضلات نشست در زیر پی های گسترده ممکن است برای سازه های مهم و سنگین از محدوده مجاز نشست ها تجاوز نماید. به علاوه برای پروژه های سنگین فشارهای بزرگی را به زمین وارد می سازند و معضلات باربری نیز به صورت قابل توجهی مطرح خواهد بود. در این خصوص می توان با تلفیق پی گسترده به همراه پی های عمیق و مشارکت در باربری، یکی از کاملترین انواع فونداسیون ها را اجرا نمود (شکل ۱-۲۳).



شکل ۱–۲۳

۱–۹ ضوابط کلی و ملاحظات دیگر در طراحی فونداسیون ها:

ابعاد و اجزاء پی می بایستی بنحوی طرح شوند که هم تنش تماس با خاک در حد ایمن باشد و هم نشستها را به یک مقدار قابل قبول محدود نماید اما مشکلات نشست اضافی عمومی بوده وتا حدووی مخفی باقی مانده اند زیرا تنها موارد بسیار دیدنی

[1] Attached single Foundations

انتشار یافته اند . تعداد اندکی ساختمانهای مدرن در اثر نشستهای اضافی فرو می ریزند . اما وقوع فروریختگی ها جزئی یا گسیختگی موضعی در یک عضو سازه ای چندان غیر معمول نیست، بیشتر آسیبهائی که روی می دهند شامل ترکهای نا خوشایند در دیوار و کف، کف های ناهموار (خیز هاوشیب ها) درهاوپنجره های چفت شده و غیره می باشند. تغییرپذیری خاک همراه بابارهای پیش بینی نشده یا حرکت های بعدی خاک (نظیرزلزله ها) می توانند به مشکلاتی از نشست منجر شوند که مهندس، کنترل اندکی برآنهادارد. بعبارت دیگر آخرین روشهای موجود طراحی ممکن است احتمال مشکلات نشست (ضریب خطر) رابه مقدار زیادی کاهش دهند، اما عموماً یک پروژه خالی از خطر بدست نمی دهند. بااین همه بطور منطقی برخی مشکلات نتیجه مستقیم طراحی ضعیف یا بی دقتیهای ساده یا عدم توانائی مهندسی می باشند . یک عامل عمده که کارطراحی پی را مشکل می سازد آن است که پارامترهای خاک مورد استفاده در طراحی قبل از شروع پروژه بدست می آیند. بعداً هنگام اجرائی برخاکی بنا می شود که خواص آن به مقدار زیادی نسبت به حالت اولیه اصلاح شده است که این اصلاح یا بواسطه روند اجرا یا احداث پی ایجاد می گردد این بدان معنی است که خاک ممکن است حفاری ویا جایگزین گشته و متراکم گردد. حفاری درجهت برداشتن بار از روی خاک زیرین بوده وسبب انبساط آن رافراهم می نماید کوبش شمع معمولاً خاک رامتراکم تر می نماید. هریک از این وقایع یا مستقیماً خواص خاک راتغییر داده (جایگزین خاک) یا پارامترهای مقاومتی برآورد شده اولیه را اصلاح می نمایند.

به طور کلی ضوابط زیر در طراحی پی ها باید مد نظر قرار گیرند:

۱- عمق پی ها می بایست به قدر کافی زیاد باشد تا از بیرون زدگی جانبی مصالح از زیر پی برای شالوده ها وپی های گسترده جلوگیری شود. بطور مشابه در گود برداری پی می بایست این نکته مد نظر باشد که مشکل بیرون زدگی مصالح پی می تواند برای شالوده های ساختمان موجود در نواحی مجاور گود اتفاق بیفتد و ضرورت دارد که تدابیر مقتضی در نظر گرفته شود. تعداد ترکهای ناشی از نشست که به هنگام گود برداری برای سازه های مجاور مالکین ساختمانهای موجود یافت می شوند بسیار قابل توجه می باشد.

۲- عمق شالوده ها می بایست زیربخشی از خاک باشد که دارای تغییرات حجمی فصلی ناشی از یخ زدگی، ذوب شدن یخ و رشد گیاهان می باشد. اکثر آیین نامه های ساختمانی محلی مقررات مربوط به حداقل عمق پی را در بردارد.

۳- در پی ممکن است لازم شود شرایط خاک منبسط شونده در نظر گرفته شود در چنین شرایطی بنای ساختمان در جهت حبس بخار آب موجود در خاک است که به طرف بالا حرکت می نماید. این بخار آب به تدریج فشرده شده و خاک واقع در بخش درونی زیر دال کف وپی ساختمان را حتی در شرایطی که تغییر محیطی به طور عادی روی می دهد اشباع می نماید.

۴- علاوه بر ملاحظات مربوط به مقاومت فشاری، سیستم پی می بایست در برابر واژگونی، لغزش وهر نوع بالا زدگی (شناوری) ایمن باشد.

۵- سیستم پی باید در برابر خوردگی یا تخریب ناشی از تماس با مواد مضر موجود در خاک محافظت گردد.

۶- سیستم پی باید بتواند تغییرات بعدی را در ناحیه یا هندسه ساختمان را تحمل کند و در صورت لزوم به ایجاد تغییرات در سازه فوقانی و بارگذاری به سادگی قابل اصلاح باشد.

۷- پی می بایست توسط نیروی انسانی موجود در محل قابل ساخت باشد.

۸- اجرا وتوسعه محل می بایست مطابق با استانداردهای محیط زیستی محل باشد از جمله اینکه می بایست تعیین شود که آیا ساختمان از طریق تماس با زمین در معرض آلودگی است یا خیر.

۱–۱۰ | حداقل مراحل لازم برای طراحی یک فونداسیون:

۱- **گردآوری اطلاعات سازه ای شامل موقعیت اجزاء باربر و میزان بارگذاری**. معمولاً تخمین تقریبی از بار (یا بارهای) شالوده توسط کارفرما تامین می شود.

۲- **بررسی وضعیت فیزیکی محل و برنامه ریزی برای شناسایی های محلی**. قبل از هر گونه اقدامی برای طراحی پی، می بایست اطلاعات کافی از شرایط فیزیکی و ژئوتکنیکی محل جمع آوری گردد. اطلاعات این مرحله با انجام آزمایشهای صحرائی و آزمایشگاهی کامل می گردد.

۳- **تعیین پارامترهای طراحی خاک بر مبنای آمیزه ای از داده های آزمایشات، اصول علمی و قضاوت مهندسی**. در این مرحله می توان از تحلیل های ساده یا پیچیدهٔ کامپیوتری استفاده کرد.

۴- **انتخاب سیستم پی و طراحی آن با استفاده از پارامترهای طراحی بدست آمده از مرحلهٔ قبل**. پی طرح شده می بایست از طرفی اقتصادی و از طرف دیگر ایمن و پایدار باشد و کلیهٔ ضوابط فنی در آن لحاظ گردیده باشد.

مهندس پی می بایست در کلیهٔ مراحل فوق تجربه داشته و در آنها مشارکت نماید. معمولاً یک شرکت ژئوتکنیکی متخصص عملیات شناسایی و آزمایشات خاک مسئول انجام مراحل ۱ تا ۳ می گردد. سپس نتایج حاصله و خروجی مرحله ۳ به کارفرما، که غالباً یک مهندس پی متخصص در طراحی اجزاء سازهٔ زیرین است، تحویل می گردد. نقص عمدهٔ در این روش دقیق و قطعی انگاشتن پارامترهای خاک است که معمولاً از طریق آزمایشهای خاک با کیفیت متغیر بدست آمده و شدیدا آمیخته به قضاوت مهندسی می باشد. از اینرو مهندس پی و مشاور ژئوتکنیک می بایست به صورتی بسیار نزدیک با یکدیگر کار نمایند و بخصوص مهندس پی می بایست از واقعیت تقریبی بودن روش های تعیین پارامترهای خاک بخوبی آگاه باشد.

۱–۱۱ | انتخاب سیستم فونداسیون

انتخاب سیستم فونداسیون بستگی به نوع سازه، موقعیت، بزرگی و نوع نیروهایی دارد که باید به زمین منتقل شوند و همچنین شرایط زیرسطحی، ظرفیت باربری و نشست خاک و همچنین شرایط آب زیرسطحی. ساختمان می تواند در روی خاک یا به صورت مستقیم یا غیر مستقیم بر روی سنگ بنا شود. به طور طبیعی زمانی که سنگ بستر در نزدیکی سطح است فونداسیون های سطحی را می توان مستقیماً در روی سنگ بستر بنا نمود اما اگر سنگ بستر در عمق زیادی باشد آنگاه صلبیت خاک فوقانی و بزرگی بارها تعیین می نمایند که آیا لزومی وجود دارد که ساختمان مستقیماً یا غیر مستقیم بر روی سنگ بنا شود. هنگامی که ساختمان بر روی خاک احداث می شود، انتخاب نوع فونداسیون بستگی به ظرفیت باربری و نشست و همچنین سازگاری با روسازه دارد. هنگامی که خاک متشکل است از لایه های سخت ضخیم، استفاده از شالوده های سطحی یا گسترده می تواند رضایت بخش باشد. اما در صورتی که خاک موجود دارای ضخامت زیاد ولی مقاومت پایین باشد، ساختمان های بلند را نمی توان تنها در روی شالوده گسترده بنا نمود زیرا احتمال وقوع نشست های بیش از حد وجود دارد مگر اینکه عمق استقرار را افزایش دهیم تا ساختمان به صورت شناور رفتار نماید. استفاده از شمع های اصطکاکی می تواند بار شالوده گسترده را به عمق منتقل نماید. چنانچه خاک نرم در بالای خاک سخت قرار داشته و ضخامت لایه خاک نرم زیاد باشد، می توان از پایه های عمیق و شمع های باربری نوک استفاده نمود. استفاده از شالوده منفرد در صورتی که نشست های تفاضلی کنترل شده باشند نیز دارای توجیه اقتصادی بهتری خواهد بود. از طرف دیگر هنگامی که خاک سخت در بالای خاک نرم قرار گرفته باشد، در بارهای سنگین فونداسیون های گسترده احتمالاً به همراه شمع برای کنترل نشست ها مورد نیاز خواهد بود. برای بارهای سبک هم فونداسیون های سطحی رضایت بخش خواهند بود.

۱-۱۲ اجرای فونداسیون ها، گودبرداری و مخاطرات اجرایی

چطور خطرات گودبرداری ساختمانی را کاهش دهیم؟ سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران مطلبی درباره چگونگی گودبرداری ایمن و بدون خطر، تلفات و خسارات برای همسایگان و کارگران منتشر کرده است که در ادامه می‌خوانید:

اندازه کوچک قطعات زمین و فاصله عرضی صفر ساختمان‌ها از یکدیگر در بسیاری از نقاط تهران باعث شده گودبرداری امری دلهره‌آور و نگران کننده برای مالکان ساختمان‌ها و همسایگان شود. در سال‌های اخیر با افزایش تراکم و تعداد طبقات و نیاز به تأمین پارکینگ و سایر سطوح خدماتی در ساختمان‌ها، عمق گودبرداری نیز بیشتر شده است. اما در بیشتر موارد از همان روش‌های سنتی که در گودهای کم عمق گذشته استفاده می‌شود. متأسفانه بسیاری هنوز فکر می‌کنند که به کارگیری تمهیدات ایمنی لازم در گودبرداری هزینه و زمان بیهوده‌ای را به کار تحمیل می‌کند، در حالیکه گودبرداری اصولاً جزو کارهای پیچیده و بسیار خطرناک مهندسی محسوب می‌شود و به ویژه در گودهای با عمق زیادتر نیازمند بررسی‌های همه جانبه، دقت و نظارت و در نهایت صرف وقت و هزینه قابل ملاحظه‌ای است تا جان و مال مردم از این طریق به خطر نیافتد. با این حال عدم آشنایی به اصول فنی، سهل‌انگاری و یا سودجویی غیرمسئولانه منجر به ایجاد حادثه می‌شود. در ادامه نشانه‌های یک گودبرداری سالم و یا خطرناک را می‌خوانید.

۱-۱۲-۱ خطرهای ناشی از گود برداری

موارد ایمنی مربوط به گودبرداری را می‌توان در سه دسته عمده زیر قرار داد:

۱. ایمنی کارکنان داخل و اطراف گود و عابران و وسایل نقلیه در مقابل حوادث احتمالی به ویژه خطر ریزش گود.
۲. خطر آسیب‌دیدگی و تخریب ساختمان‌های مجاور گود در اثر گودبرداری یا ریزش گود.
۳. خطر آسیب‌دیدگی تاسیسات و شریان‌های شهری در اثر گودبرداری یا ریزش گود.

۲-۱۲-۱ نشانه‌های خطرناک بودن گود

موارد زیر علامت خطرناک بودن گود بوده و بررسی‌ها و احتیاط های همه جانبه بیشتری را ضروری می‌کنند:

(الف) ضعیف و یا حساس بودن ساختمان مجاور: مواردی نظیر عدم وجود اسکلت، ضعیف بودن ملات دیوارها و علائم ضعف اجرایی ساختمان، وجود ترک و شکستگی یا نشست و شکم‌دادگی دیوارها، از این جمله‌اند. وجود دیوار مشترک بین ساختمان مورد نظر برای تخریب و ساختمان مجاور آن نیز غالباً می‌تواند منبع ایجاد مشکل باشد. در پاره‌ای موارد ساختمان مجاور دارای ارزش تاریخی و فرهنگی بوده و هر گونه نشست می‌تواند باعث خسارات جبران‌ناپذیر به آن شود. در بعضی موارد دیوار مجاور به ساختمان مورد نظر برای تخریب تکیه داده است و با انجام تخریب ممکن است بدون هرگونه خاکبرداری ساختمان مجاور ریزش کند.

به خاطر داشته باشید که ضعیف بودن ساختمان مجاور تنها دردسرها و بررسی‌ها و احتیاط‌های لازم از طرف صاحب‌کار و افرادی که در مراحل مختلف طرح و اجرای ساختمان کار می‌کنند را بیشتر می‌کند و هیچ عذری برای خراب شدن آن به دست نمی‌دهد. به عبارت دیگر در دادگاه‌هایی که برای رسیدگی به تخریب ساختمان‌های مجاور در اثر فعالیت‌های ساختمانی انجام می‌شود، مسئول اجرای ساختمان نمی‌تواند به بهانه اینکه ساختمان مجاور، خود ضعیف بوده از زیر مسئولیت‌های ریزش و خرابی ایجاد شده شانه خالی کند و جواب قاضی در این گونه موارد این است که شما باید به تناسب ضعف ساختمان مجاور اقدامات حفاظتی و احتیاطی بیشتری به کار می‌بستید.

(ب) ضعیف بودن خاک: معمولاً هر چه خاک محل ضعیف‌تر باشد خطر بیشتری برای ریزش گود و تخریب ساختمان‌های مجاور وجود دارد. خاک‌های دستی بارزترین نمونه خاک‌های ضعیف هستند. توضیح آنکه در گذشته بسیاری از نقاطی که اکنون در داخل شهر تهران هستند، خارج از شهر محسوب می‌شده‌اند و کامیون‌های حامل خاک و نخاله بار خود را در آنجا تخلیه می‌کرده‌اند. بعدها با ضمیمه شدن این محل‌ها به داخل شهر، اغلب این خاک‌ها و نخاله‌ها در همان جا بدون تراکم مهندسی تسطیح شده‌اند و اکنون خاک دستی را تشکیل می‌دهند.

همچنین در بسیاری از موارد محل به صورت تپه و ماهور و یا بستر مسیل بوده و با خاک یا نخاله به صورت غیرمهندسی تسطیح شده است. همچنین در بعضی بخش‌های جنوبی تهران به ویژه مناطق ۱۲و ۱۶ در گذشته گودهایی بعضاً عمیق به منظور تهیه مواد اولیه ساخت آجر وجود داشته که بسیاری از آنها اکنون با خاک دستی پر شده‌اند. رسوبات سست جوان که غالباً در اطراف مسیل‌ها و پای دامنه‌ها وجود دارند نیز از جمله خاک‌های ضعیف محسوب می‌شوند.

امکان زیادی وجود دارد که سازنده ساختمانی که در مجاورت زمین محل احداث پروژه قرار دارد، در زمان ساخت، خاک ضعیف را جا به جا نکرده و پی ساختمان را برروی همان خاک سست قرار داده باشد. در این صورت ساختمان مجاور تا هنگامی‌که گودی در کنار آن ایجاد نشده استوار است اما به محض اینکه با گودبرداری و لو کم‌عمق اطراف آن خالی شد، خاک ضعیف موجود در زیر پی آن ریزش کرده و باعث خرابی ساختمان مجاور خواهد شد.

(ج) عمیق بودن گود: معمولاً هرچه عمق گود بیشتر شود خطر بیشتری کارکنان و ساختمان‌های مجاور را تهدید می‌کند. در سال‌های اخیر با افزایش تراکم ساختمانی، نیاز به پارکینگ و انباری و سطوح مشاع دیگر افزایش یافته و باعث افزایش تعداد طبقات زیرزمین شده است. باید توجه شود که با افزایش عمق گود، خطر ریزش آن به مراتب افزایش می‌یابد و اگر در گذشته می‌شد که در گودهای کم عمق بدون بررسی‌های همه‌جانبه و طرح‌های مهندسی دقیق، تنها با عقد قراردادی با مباشر ماشین‌آلات خاکبرداری و با حضور چند کارگر و بنا اقدام به گودبرداری نمود، اکنون با افزایش عمق گودها و افزایش ارزش ساختمان‌ها و تأسیسات مجاور، گودبرداری غیرفنی بسیار خطرناک بوده و خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیری را در پی دارد.

(د) مدت بازماندن گود: معمولاً با افزایش زمان بازماندن گود حتی اگر بارندگی یا تغییرات جوی مطرح نباشد خطر ریزش گود بیشتر می‌شود، اما افزایش زمان بازماندن گود به ویژه در فصل های بارندگی و رطوبت (زمستان و بهار)، با وقوع بارش‌هایی گاه سنگین و سیل‌آسا همراه است که با اشباع خاک و یا جاری شدن آب‌های سطحی خطر ریزش گود را به مراتب افزایش می دهد. به طوری که بسیاری از ریزش‌های گود در گذشته به فاصله چند ساعت تا چند روز بعد از شروع بارندگی روی داده است.

(و) آب‌های سطحی و زیرسطحی: بالا بودن سطح عمومی آب‌های زیرزمینی در منطقه معمولاً عملیات آبکشی جهت پایین انداختن سطح آب زیرزمینی را ضروری می‌سازد. معمولاً وجود سطح آب زیرزمینی بالا خطر ریزش گود را افزایش می‌دهد به ویژه بعد از چند روز از انجام عملیات گودبرداری و رسیدن سطح آب زیرزمینی به تعادل. همچنین وجود جریان‌های آب زیرزمینی از طرقی نظیر نهرهای مدفون یا قنات‌ها می‌تواند در افزایش خطر ریزش گود بسیار مؤثر باشد. جریان‌های آب‌های سطحی نیز از عواملی هستند که می‌توانند باعث فرسایش خاک گود و اشباع شدن آن شده و به افزایش خطر ریزش گود کمک کنند. دور نگه‌داشتن جریان آب‌های سطحی موجود یا محتمل (مثلاً در اثر بارندگی) از مهم‌ترین و اصلی‌ترین قدم‌های اولیه حفاظت گود است.

۱-۱۲-۳ اقدامات قابل انجام برای کاهش خطر گودبرداری‌ها:

۱. اگر سرمایه گذار و یا صاحب‌کار ساختمان در حال ساخت هستید:

حتماً بررسی های مکانیک خاک را از طریق شرکت‌های معتبر و به صورت کامل و دقیق انجام دهید. از مهندس محاسب خود بخواهید که طرح گودبرداری و حفاظت گود را با استفاده از اطلاعات گزارش مکانیک خاک و با دقت زیاد انجام دهد. همچنین از وی بخواهید که ساختمان‌ها و تأسیسات مجاور گود مورد نظر را دقیقاً بررسی کند و در صورت نیاز اقدامات حفاظتی برای آنها را پیشنهاد کند.

از مهندس‌ناظر و مجری خود بخواهید که حتماً گزارش مکانیک خاک و نیز نقشه‌های اجرایی طراحی گود را کنترل کرده و در صورت وجود نقص، اشکال یا ابهام در آنها از تهیه‌کنندگان آنها بخواهید که موارد را برطرف کنند.

نقشه‌ها و طراحی‌های گود باید براساس گزارش بررسی‌های مکانیک خاک و توصیه‌های مشاور ژئوتکنیک تهیه شده باشند و مراحل کار، روش انجام گودبرداری (دستی، ماشینی) و مشخصات سازه‌های نگهبان و دیگر اقدامات حفاظتی شیب را به خوبی نشان دهند. بهتر است که قبل از اجرای کار جلسه مشترکی با حضور مهندسین ناظر و مجری و محاسب و نماینده شرکت تهیه کننده گزارش مکانیک خاک برگزار کنید و مراحل و اشکالات و خطرات را مرور کنید. بهتر است در این جلسه پیمانکار یا مسئول فنی خاک برداری و مسئول اجرای سازه نگهبان نیز حضور داشته باشد.

۲. اگر در مجاورت ساختمان شما قرار است تخریب و گودبرداری انجام شود:

قبل از صدور پروانه و شروع گودبرداری باید بررسی‌های مکانیک خاک مناسبی انجام شده باشد. ساختمان شما باید مورد بررسی قرار گرفته و مهندس محاسب و یا ناظر با توجه به نوع بنا و عمق قرارگیری پی ساختمان شما نسبت به کف پی مورد نظر راجع به نیاز و نحوهٔ حفاظت و مقاوم‌سازی آن اظهار نظر کرده و در صورت نیاز طرح‌های لازم را ارائه کرده باشد. در نقشه‌های اجرایی، نحوهٔ گودبرداری و حفاظت از گود و یا سازه نگهبان باید به خوبی نشان داده شده باشد و این اقدامات برای محافظت از گود و ساختمان‌های مجاور کافی باشند.

دوره باز بودن گود باید زمانبندی مشخصی داشته باشد (زمان شروع گودبرداری، زمان برپایی سازه نگهبان، زمان خاتمه گودبرداری). مهندس ناظر و در صورت لزوم نماینده شرکت مکانیک خاک باید بر عملیات گودبرداری نظارت کافی اعمال کنند.

گودبرداری و اجرای سازه نگهبان باید مطابق نقشه‌های اجرایی و مشخصات اجرایی (دستی، ماشینی) و اصول فنی پیش انجام شود. در صورت مشاهده هر گونه اقدام خطرناک مراتب را به مسئولین گزارش نمایید. در جریان انجام کار گودبرداری سعی کنید همه چیز را به خوبی زیر نظر داشته باشید و به ویژه با در نظر داشتن وضعیت ساختمان خود ایجاد هرگونه ترک، صدای غیرعادی ساختمان، نشست و غیره را بررسی نمایید و در صورت بروز اینگونه موارد فوراً اقدامات لازم را انجام بدهید. این اقدامات حسب شرایط می‌تواند به صورت تخلیه فوری ساختمان، انعکاس موضوع به مسئولین پروژه و شهرداری جهت انجام اقدامات اصلاحی باشد. در صورتی که عملیات گودبرداری تأسیسات و لوله‌های شهری گاز، آب، برق و...را به خطر انداخته مراتب را به مراجع مربوطه اطلاع دهید.

مراقب باشید که گودبرداری بیش از حد مجاز به ساختمان شما نزدیک نشود. گاه بعضی با بی‌دقتی و یا به خاطر سهولت کار خود، زیر ملک شما را نیز خالی می‌کنند. در صورتی که نقصی در انجام کارها مشاهده کردید، ابتدا از طریق مراجعه به مسئولین فنی ساختمان نظیر مهندس ناظر، مجری یا مالک موضوع را به آرامی و محترمانه در میان بگذارید. در صورت نیاز می‌توانید به ناحیه و منطقه شهرداری و یا دیگر مراجع ذیصلاح مراجعه نمایید. به یاد داشته باشید که یکی از بهترین راه‌های کاهش خطرات گودبرداری، اتمام زودتر عملیات داخل گود و ایمن و پرکردن مجدد آن است. بنابراین مراقب باشید دخالت‌های شما موجب توقف و یا طولانی شدن زیاد و بیهوده کار نشود.

۳. در صورتی که داخل گود کار می‌کنید:

به خاطر داشته باشید که ریزش دیواره‌های گود می‌تواند ظرف چند ثانیه شما را به دام انداخته و در عرض چند دقیقه هلاک کند. وزن هرمتر مکعب خاک ۱/۶ تا ۲ تن است. اگر در زیر خاک ریزش کرده مدفون شوید در عرض کمتر از ۳ دقیقه خفه می‌شوید و حتی اگر زنده بیرون آیید، احتمالاً بار خاک صدمات داخلی شدیدی به بدن شما وارد آورده است. ریزش گود تنها خطر گودبرداری نیست و کمبود اکسیژن، هوای سمی، گازهای قابل انفجار و خطوط برق مدفون نیز ممکن است جزء خطرات باشند.

در داخل گود به ویژه در محل‌هایی که خطر سقوط اشیاء وجود دارد:

- حتماً از کلاه ایمنی استفاده کنید.
- در صورتی که در معرض برخورد با ترافیک عبوری هستید از پوشش‌های براق و شبرنگ استفاده کنید.
- مواظب خطر سقوط قطعات سست خاک یا سنگ باشید.
- در زیر بارهای آویزان نایستید و یا کار نکنید.
- از ماشین‌آلات خاکبرداری فاصله بگیرید.
- در صورتی که کارگرانی در پایین‌دست گود حضور دارند، بر روی دیوارها و یا سطوح مشرف به گود کار نکنید.
- وارد گودی که نشانهٔ تجمع آب دارد نشوید؛ مگر آنکه به خوبی محافظت شده باشد.
- در صورتی که داخل گود مشغول کندن دیواره یا پای آن هستید، حتماً باید فردی مطلع در بیرون از محوطه خطر، مراقب وضعیت پایداری گود و کار شما باشد.
- حتی‌المقدور از بریدن داخل پای دیوار یا شیب و ایجاد شیب منفی (نیم طاقی) جهت اجرای پی‌ها جداً خودداری کنید. در صورتی که مجبور به این کار هستید اولاً سعی کنید این طول حداقل بوده و ثانیاً در حین کار باید فردی مطلع (ترجیحاً مهندس ناظر) مراقب وضعیت پایداری دیواره و کار شما باشد. حتماً از کلاه و دیگر وسایل ایمنی استفاده کنید و سعی کنید کار را در زیر یک میز محافظ فلزی مقاوم انجام دهید.

۴. در صورتی که از طرف شهرداری یا دیگر نهادها، مسئول کنترل طرح و اجرای ساختمان هستید:

- برای گودبرداری‌های عمده (گودبرداری‌های با عمق بیشتر از عمق دیوارها یا پی‌های ساختمان مجاور و به فاصله نزدیکتر از عمق گودبرداری از مرز زمین) بهتر است که سازنده ساختمان حداقل ۳۰ روز قبل از شروع گودبرداری موضوع را به طور کتبی به مالکین اطلاع داده و رونوشت آن را به شهرداری ارائه نماید.
- قبل از صدور پروانه ارائه نقشه‌های سازه نگهبان و کنترل آن‌ها توسط شهرداری ضروری است. کنترل سازه نگهبان طرف معابر عمومی بهتر است توسط معاونت فنی و عمرانی انجام شود.
- در گودهای با عمق بیش از ۳ متر قبل از صدور پروانه، ارائه گزارش بررسی‌های مکانیک خاک انجام شده از طریق شرکت‌های معتبر توسط مالک و کنترل آن‌ها توسط شهرداری منطقه ضروری است.
- سازنده ساختمان را موظف کنید که در نزدیکی محل کارگاه تابلویی با فرم یکسان برای اعلام مشخصات عمومی گودبرداری نصب کند که شامل اطلاعات زیر باشد:

تاریخ شروع گودبرداری(هفته)، تاریخ تکمیل گودبرداری(هفته)، تاریخ تکمیل ایمن‌سازی گود(هفته)، تاریخ خاتمه دوره باز بودن گود (هفته)، عمق گودبرداری، روش گودبرداری، روش حفاظت گود، نام مهندس ناظر پروژه، نام مهندس طراح پروژه، نام مشاور ژئوتکنیک پروژه، نام مهندس طراح گود، نام پیمانکار اجرای گود، نام مهندس ناظر گودبرداری.

- در صورتی که برای حفاظت گود یا ساختمان مجاور نیاز به انجام کارهای ساختمانی عمده در زمین یا ساختمان مجاور باشد، نیاز به اخذ رضایت از مالک آن و یا صدور پروانه جداگانه‌ای خواهد بود.

۱-۱۲-۴ بازرسی ها:

گود و محل‌های اطراف آن و نیز سیستم‌های حفاظتی باید هر روزه توسط فردی مجرب از نظر وجود هرگونه شواهد خطرناک نظیر گسیختگی گود، گسیختگی سیستم‌های حفاظتی و یا سازه نگهبان گود یا جریان آب، بازرسی شوند. بازرسی باید قبل از شروع شیفت کار و در صورت نیاز در تمام ساعات کار انجام شود. همچنین بعد از هر بارندگی یا شرایط خطرناک دیگر نیز الزامی است. این بازرسی‌ها فقط هنگامی مورد نیازند که خطری افراد شاغل در گود و ساختمان‌های مجاور را تهدید کند.

۱-۱۲-۵ بررسی های مکانیک خاک چیست؟

بررسی‌های مکانیک خاک انجام بررسی های محلی در مورد زمین‌شناسی عمومی، مشخصات خاک محل و سطح آب‌های زیرزمینی می باشد و به ویژه باید وجود و عمق خاک‌های مسئله‌داری نظیر خاک‌های دستی را مشخص نمایند. توصیه‌های فنی در مورد نوع پی، مقاومت مجاز خاک زیر پی و نشست‌های مورد انتظار و پارامترهای طراحی دیوارهای حایل دیگر بخش‌های ضروری گزارش مکانیک خاک را تشکیل می‌دهند. همچنین با توجه به عمق گودبرداری مورد نیاز و مشخصات ساختمان‌ها و دیگر تأسیسات مجاور نظیر معابر، خطوط گاز، فاضلاب ... باید خطر گودبرداری ارزیابی شده و روش گودبرداری، شیب ایمنی گودبرداری، مراحل گودبرداری، نیاز به سازه نگهبان، نوع سازه نگهبان و روش طراحی و اجرای آن به تفصیل بیان شود. برای این کار لازم است که مشخصات ساختمان‌ها و تأسیسات مجاور به تفصیل برداشت شده و در گزارش ارائه گردد.

البته گاه می‌توان مشخصات ساختمان‌ها و تأسیسات مجاور را در این مرحله به صورت تخمینی تعیین کرد و تعیین دقیق آنها را به مرحله طراحی گودبرداری واگذار نمود که در این صورت مشاور باید این موضوع را به روشنی در گزارش بیان

نماید. همچنین خطرات احتمالی نظیر چاه‌ها، قنات و حفره‌های زیرزمینی دیگر باید شناسایی شده و عمق، موقعیت و تأثیر آنها بر ساختمان و نحوه مقاوم‌سازی آنها جهت رفع خطر به تفصیل بیان گردد. از موارد دیگری که در گزارش بیان می‌شود تعیین نوع زمین جهت برآورد تأثیر آن بر نیروهای زلزله طراحی ساختمان است که تأثیر زیادی در ایمنی لرزه‌ای و هزینه‌های ساختمان دارد.

مشاور باید با توجه به شیب زمین و مشخصات زمین‌شناسی محل اسکان بروز ناپایداری‌هایی نظیر رانش زمین، ریزش سنگ، جریان گل و نظایر آنها را به طور اجمالی بررسی نموده و در صورتی که خطرات فوق در محل مطرح باشند، به تفصیل این موارد را بررسی نموده و توصیه‌های اجرایی در مورد رفع خطرات آنها بر ساختمان ارائه نماید. همچنین مشاور باید با توجه به بررسی کلی و اجمالی عکس‌های هوایی و نقشه‌های پایه امکان وجود خطراتی نظیر گسل فعال و روانگرایی حین زلزله را بررسی نموده و در صورت نیاز بررسی‌های تفصیلی‌تری را در مورد آنها انجام دهد.

در حال حاضر شهرداری فقط برای ساختمان های ۶ طبقه و بیشتر (در تهران) انجام بررسی‌های مکانیک خاک را الزامی کرده ولی بهتر است که شما اگر ساختن ساختمانی با تعداد طبقات کمتری (۳ طبقه به بالا) را هم در نظر دارید، به ویژه اگر عمق گودبرداری بیش از ۱/۵ متر باشد، حتماً بررسی های مکانیک خاک را انجام دهید زیرا این بررسی ها اگر به درستی انجام شوند، ایمنی ساختمان و عملیات ساختمانی را تضمین کرده و حتی می‌توانند از طریق تعیین دقیق مقاومت خاک و نوع زمین تأثیر زیادی در بهینه کردن و جلوگیری از افزایش هزینه‌ها در موارد غیرضروری داشته باشند.

- سعی کنید شرکت انجام دهنده بررسی ها را از میان شرکت های معتبر انتخاب کنید و مراقب باشید که بررسی ها به طور کامل و دقیق انجام شده و صوری برگزار نشود.
- معمولاً برای انجام بررسی های مکانیک خاک، شرکت انجام دهنده بررسی‌ها بعد از بررسی عکس‌های هوایی و نقشه‌های پایه محل و بازدید و بررسی محلی، گمانه یا گمانه هایی را حفر و از خاک نمونه‌برداری می‌کند و نمونه‌ها را برای انجام آزمایش به آزمایشگاه می‌فرستد. همچنین همراه با حفاری، آزمایش هایی نیز در محل انجام می شود.
- حتماً باید فرد متخصصی از شرکت در هنگام حفاری ها و انجام آزمایش‌های محلی حاضر باشد و شرایط حفاری، آزمایشهای محلی و نمونه برداری را کنترل کند. بعد از انجام آزمایش های آزمایشگاهی شرکت باید گزارش بررسی‌ها را تهیه و ارائه کند.
- دقت کنید که گزارش به طور کامل تهیه شده باشد و در صورت لزوم گزارش را جهت کنترل به فردی متخصص ارائه دهید و رفع نواقص آن را از شرکت بخواهید. به ویژه باید توصیه‌های کاملی در مورد انجام گودبرداری و حفاظت گود از ارائه شده باشد. به خاطر داشته باشید که هرگونه نقص در این قسمت می‌تواند مخارج زیادی را در جریان گودبرداری به شما تحمیل کرده و یا باعث ریزش گود و ایجاد خسارت شود. مهندس محاسب ساختمان باید این گزارش را در طراحی پی و نحوه گودبرداری مورد استفاده قرار دهد. بنابراین از وی بخواهید که در حد موارد استفاده خود از گزارش، کیفیت و محتویات آن را کنترل کند و در صورتیکه اشکال یا ابهامی به نظر وی رسید جهت برطرف کردن به شرکت مکانیک خاک اعلام کند. بنابراین بهتر است تصفیه حساب با شرکت مکانیک خاک را به کنترل کیفیت آن توسط مهندس محاسب، مأمورین کنترل شهرداری و یا متخصصین دیگر موکول کنید.
- باید توجه شود گاه قسمت‌های ضعیفی در خاک وجود دارند که با حفر گمانه‌ها به خوبی وجود آنها مشخص نمی‌شود. تغییرات ضخامت خاک دستی و یا نهرها و مسیل‌های پر شده از این دسته هستند. در این گونه موارد بررسی عکس‌های

هوایی قدیمی که پستی و بلندی‌ها یا مسیل‌های قدیمی را نشان می‌دهند می‌تواند در شناسایی قسمت‌های ضعیف مؤثر باشد. همچنین نظارت یا کنترل یک زمین‌شناس یا متخصص خاک بعد از عملیات گودبرداری و ترجیحاً در زمان گودبرداری برای تشخیص این نقاط ضعف مؤثر خواهد بود.

منابع

منابع فارسی:

۱. پی های گسترده، تحلیل، طراحی و عملکرد.، تالیف: دکتر ابوالفضل اسلامی، دکتر ملک محمد رنجبر، مهندس طه ریاضی، مهندس مهدی ویس کرمی.، انتشارات دانشگاه گیلان، ۱۳۸۵.

۲. اصول مهندسی ژئوتکنیک، جلد دوم: مهندسی پی. مولف: براجا ام. داس.، ترجمه شاپور طاحونی.، چاپ هفتم بهار ۱۳۸۲.

۳. فونداسیون های سطحی، ظرفیت باربری و نشست.، تالیف: براجا ام. داس، ترجمه: عبدالمتین ستایش، رحمان محسنی آستانی، مقداد رمضانزاده بادلی.

۴. مهندسی پی نگارش دکتر محمد علی روشن ضمیر

۵. مبحث ۷ مقررات ملی ساختمان

۶. اجزای ساختمان سیاوش کباری

۷. طراحی ساختمان های بتنی مسلح، تالیف: شاپور طاحونی.، انتشارات دانشگاه تهران.، چاپ چهارم، ۱۳۷۹.

منابع لاتین:

8. Foundation Engineering Handbook., Design and Construction with the 2009 international building code., Robert W. Day., 2nd Edition., McGraw Hill Publications., 2009.
9. Kempfert, H.G., Gebreselassie, B., *Excavations and Foundations in Soft Soils.*, 1st Ed, Springer Berlin, 2006.

منابع و سایت های اینترنتی:

۱۰. روزنامه همشهری - 1387/05/16 به نقل از www.omran.net

۱۱. سایت های تخصصی عمران:

- http//:www.pishtaz-group.com/rahsazi/shamkub.htm
- https//:www.iran-far.com/showthread.php?t=18612&page=3
- http://civil10.blogfa.com
- http://www.buildinghow.com/