



رابطی مقدم

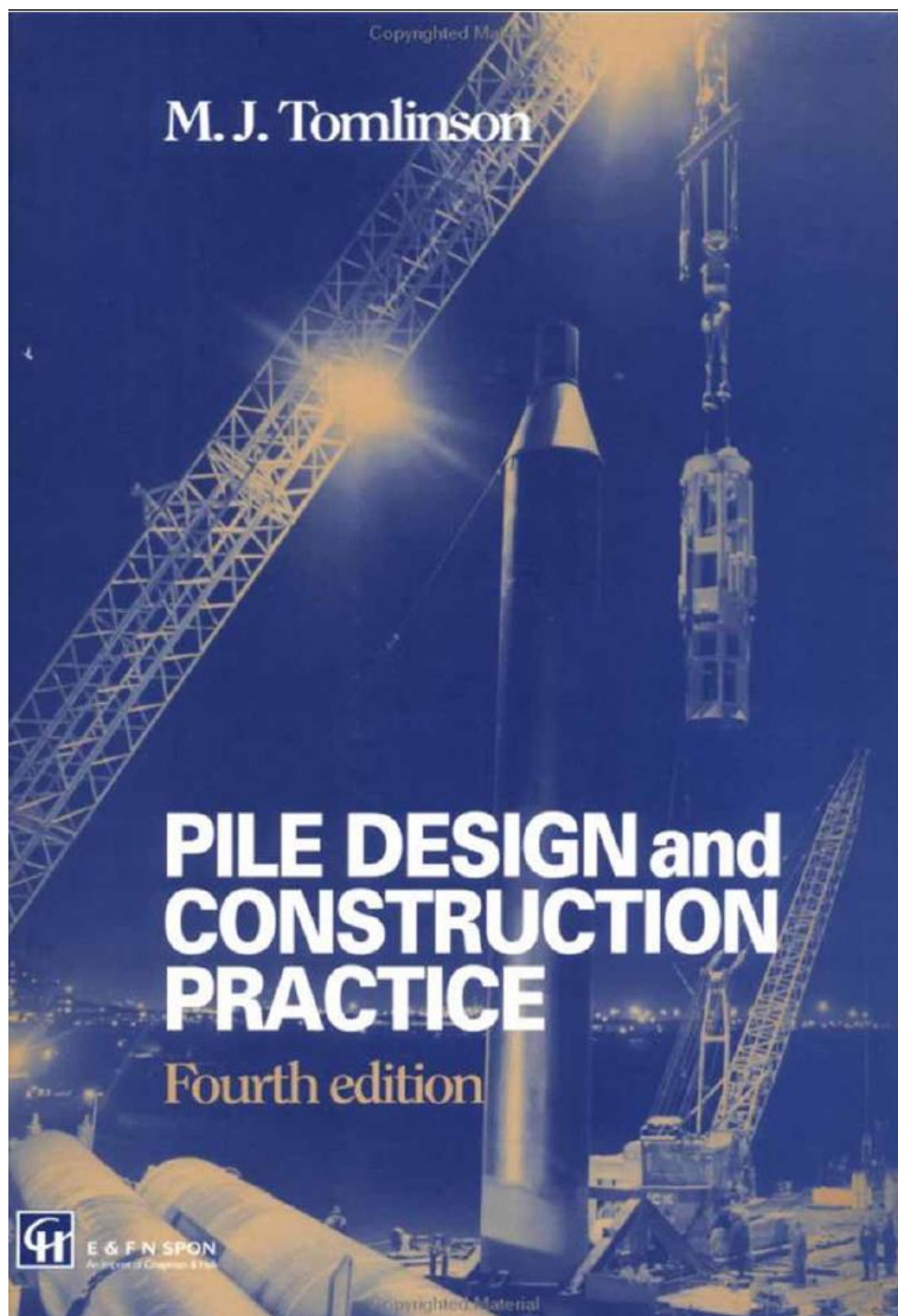
مهندسی پی





# پی های عمیق (شمع ها) Deep Foundations (Piles)

بخش اول: معرفی شمع ها



樁承基礎之分析與設計

# PILE FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN

H. G. POULOS

E. H. DAVIS

The University of Sydney

## شمع (Pile)

شمعها اعضایی از جنس فولاد، بتن، بتن مسلح، و چوب می باشند که در صورت مناسب نبودن ظرفیت باربری زمین برای استفاده از شالوده های سطحی، از آنها برای ساخت شالوده های عمیق (شالوده های شمعی) استفاده می شود. مخارج احداث شالوده های شمعی خیلی بیشتر از شالوده های سطحی است. علیرغم مخارج بیشتر، در عمل موارد متعددی وجود دارد که برای ایمنی ساختمان در مقابل نشست و عوامل دیگر، از شالوده های شمعی استفاده می شود. در زیر بعضی از شرایطی که استفاده از شالوده های شمعی را ایجاب می نمایند، شرح داده می شود.

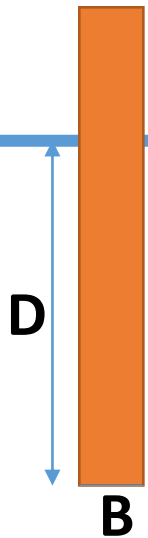


## شمع (Pile)



## ضابطه پی های عمیق: مبحث ۷

پی های عمیق یا شمع ها: به پی هایی گفته می شود که نسبت عمق قرارگیری به کوچکترین بعد افقی آن ها از ۱۰ تجاوز کند ( $\frac{D}{B} \geq 10$ ). این پی ها شامل انواع شمع ها، دیوارک ها و دیوارهای جدا کننده می شوند. پی های عمیق در ساختمان ها معمولاً به وسیله یک سازه میانی، که کلاهک یا سر شمع نامیده می شود، بارهای سازه را به زمین منتقل می نمایند.



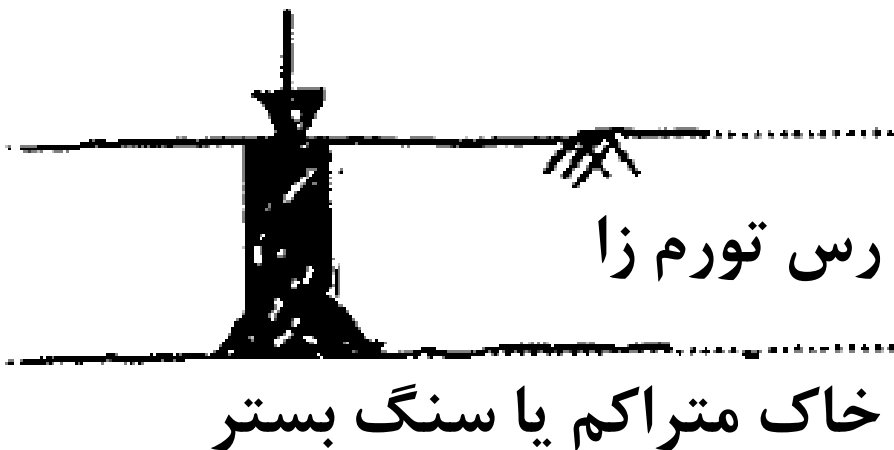
## موارد کاربرد شمع ها

۱. وقتی که لایه یا لایه های فوقانی خاک دارای قابلیت فشردگی زیاد و یا خیلی ضعیف باشند، به طوری که نتوان از شالوده سطحی برای توزیع بار ساختمان استفاده کرد، شالوده های شمعی برای انتقال بار به لایه های تحتانی محکمتر و یا سنگ بستر مورد استفاده قرار می گیرند.



## موارد کاربرد شمع ها

۲. در خیلی از موارد، در منطقه موردنظر برای احداث ساختمان با خاک مسئله دار مانند خاکهای قابل تورم ، فروریزی (رمبنده) یا روانگرا روبرو می شویم. این لایه ها ممکن است دارای عمق قابل توجهی باشند. خاکهای قابل تورم در اثر افزایش یا کاهش میزان رطوبت، تورم و یا کاهش حجم پیدا می کنند. فشار تورم چنین خاکهایی ممکن است به طرز قابل توجهی زیاد باشد. اگر در چنین خاکهایی از شالوده های سطحی استفاده شود، ساختمان ممکن است با صدمات جدی روبرو شود. در این حالت شالوده های شمعی که از لایه قابل تورم عبور کرده و وارد لایه پایدار شده اند، می توانند مورد توجه قرار گیرند.





## موارد کاربرد شمع ها

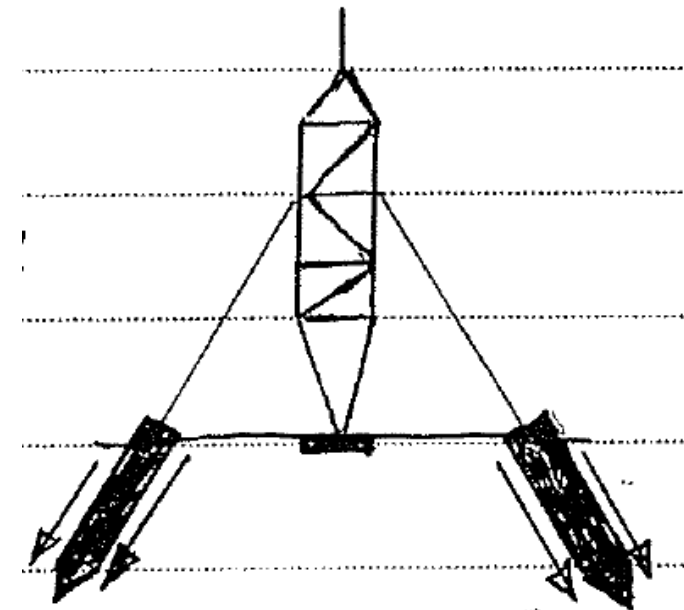
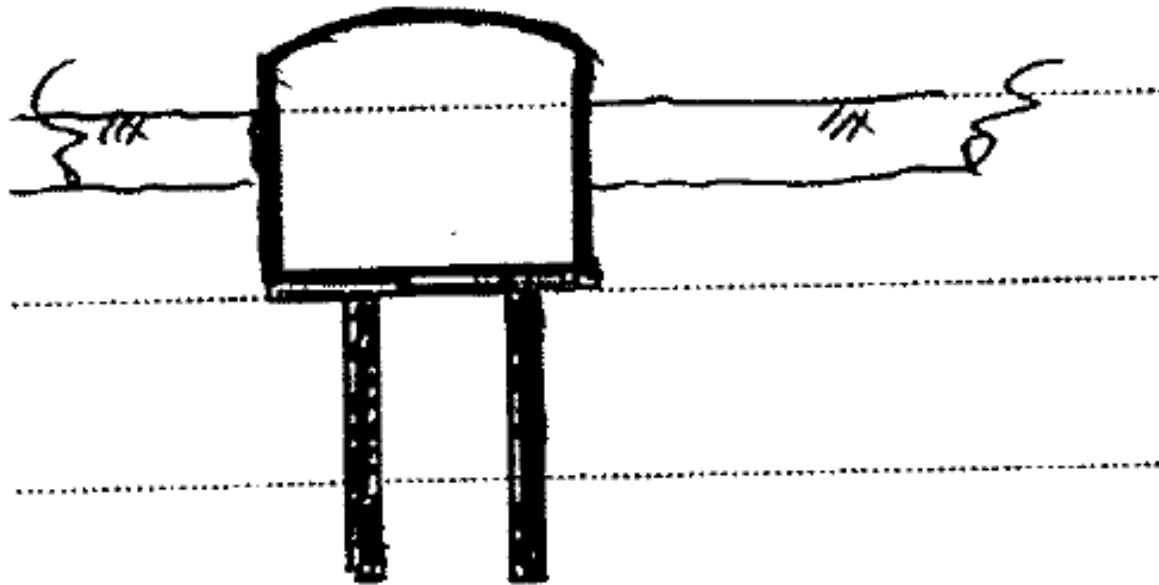
خاک‌هایی نظیر ماسه بادی دارای طبیعت فروریزی (رمبندگی) هستند. وقتی که چنین خاک‌هایی تحت افزایش رطوبت قرار گیرند، اسکلت خاک می تواند دچار شکست گردد. یک کاهش ناگهانی در نسبت تخلخل خاک، باعث نشست زیاد سازه ای می شود که توسط شالوده سطحی حمل می شود. در چنین حالاتی، شالوده شمعی که از لایه سست عبور کرده و وارد لایه پایدار زیر آن شده، می تواند به عنوان راه حل مسئله مورد توجه قرار گیرد.

خاک‌های دانه ای اشباع در حین زلزله مستعد روانگرا شدن می باشند. استفاده از شالوده های شمعی یکی از راه‌های ایمن کردن سازه در این حالتها می باشد.



## موارد کاربرد شمع ها

۳. شالوده بعضی از سازه ها، نظیر خطوط انتقال برق، اسکله ها، شالوده های گسترده در زیر آب زیر زمینی، تحت تأثیر نیروی برکنش قرار دارند. در بعضی مواقع برای مقابله با نیروهای برکنش از شالوده های شمعی استفاده می شود.





## موارد کاربرد شمع ها

۴. به خاطر وجود مسئله آب شستگی و فرسایش در محل پایه های پل، این پایه ها اغلب در روی شالوده های شمعی احداث می شوند.



## موارد کاربرد شمع ها

۵- آب و رسوبات آبرفتی کف دریا قادر به تحمل بار نیستند. بنابراین در اغلب سازه های دریایی به منظور پایداری از شمع استفاده می شود.





## موارد کاربرد شمع ها

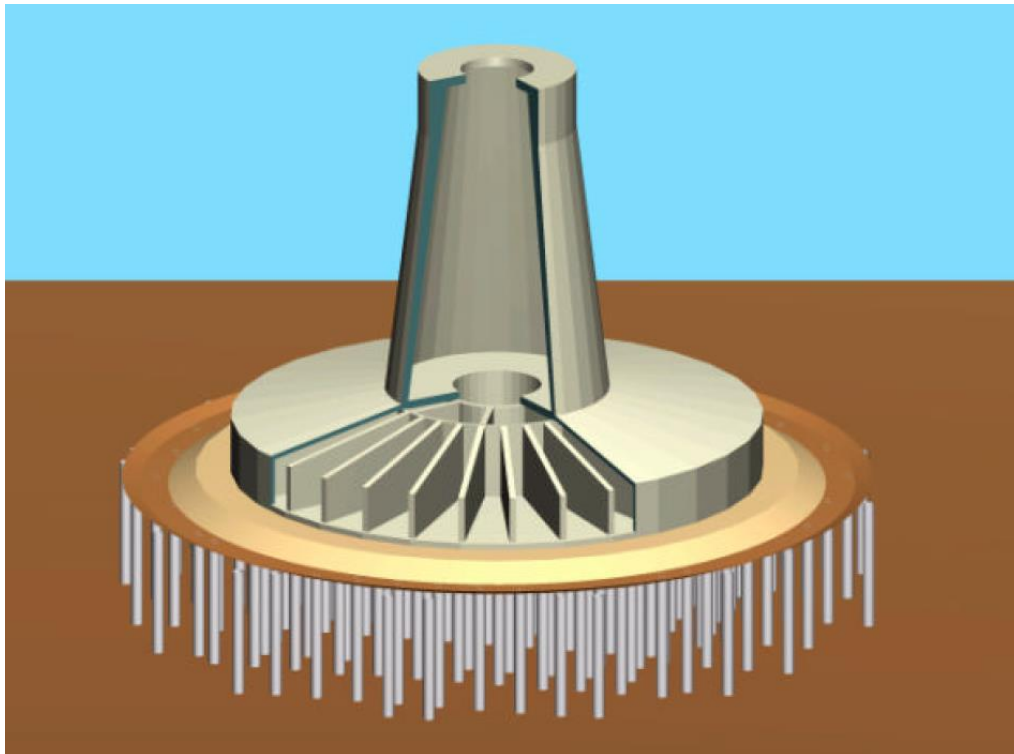
۵- آب و رسوبات آبرفتی کف دریا قادر به تحمل بار نیستند. بنابراین در اغلب سازه های دریایی به منظور پایداری از شمع استفاده می شود.



## موارد کاربرد شمع ها

### ۵- بهسازی لایه های سست خاک به کمک شمع

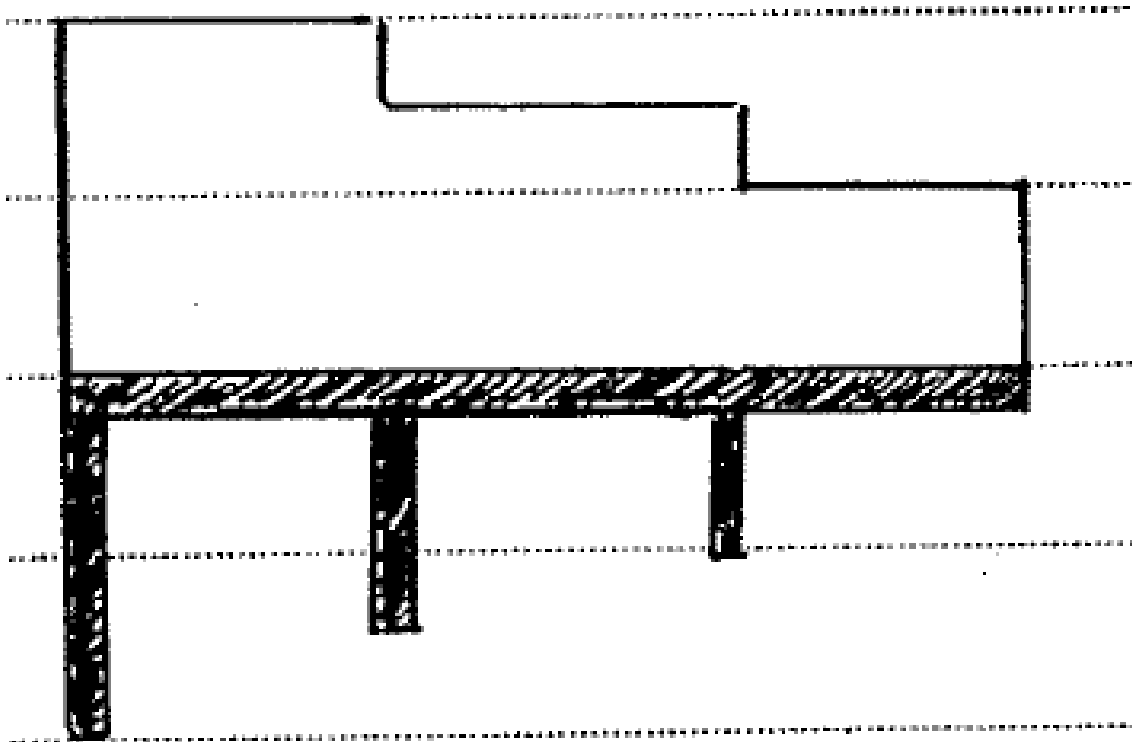
در بعضی موارد خاص، شمعها بدین منظور در لایه های دانه ای کوبیده می شوند که تراکم خوبی در لایه سطحی خاک به وجود آید. این شمعها به شمعهای تراکمی موسوم هستند.





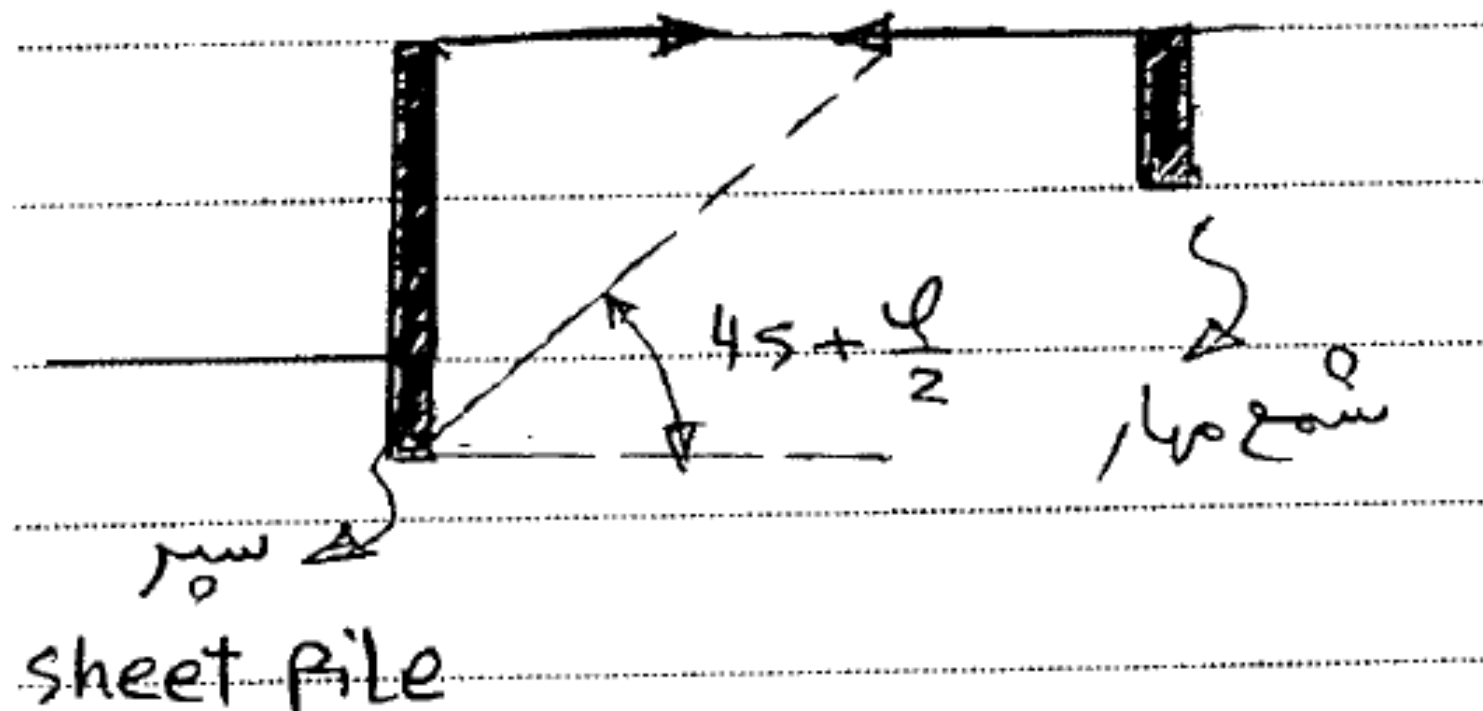
## موارد کاربرد شمع ها

۶- کاهش نشست های غیریکنواخت



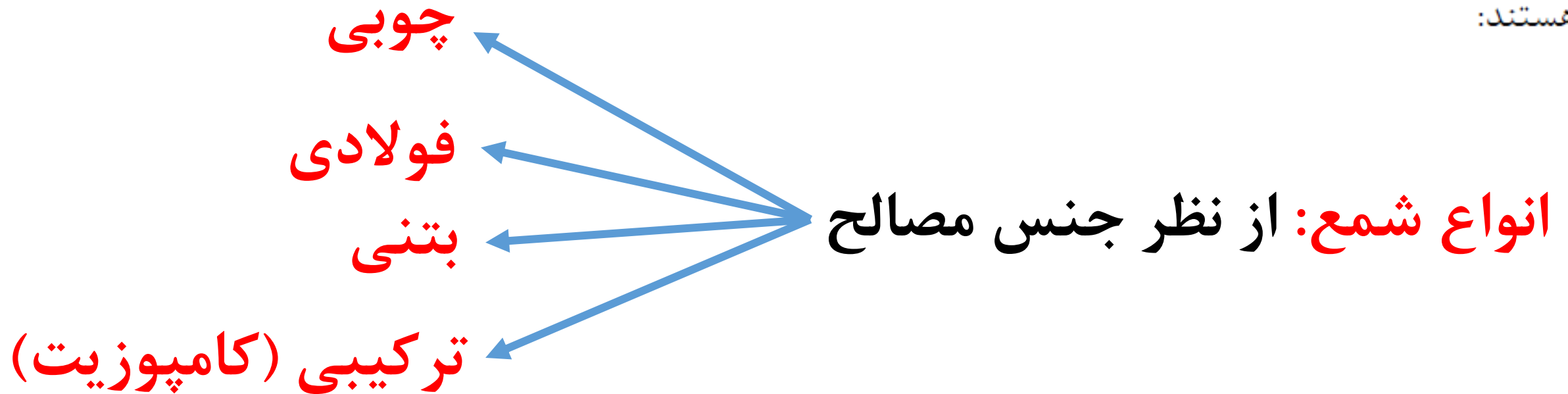
موارد کاربرد شمع ها

۷- انتقال نیروی افقی به خاک



## انواع شمع

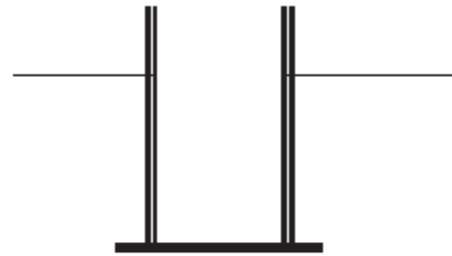
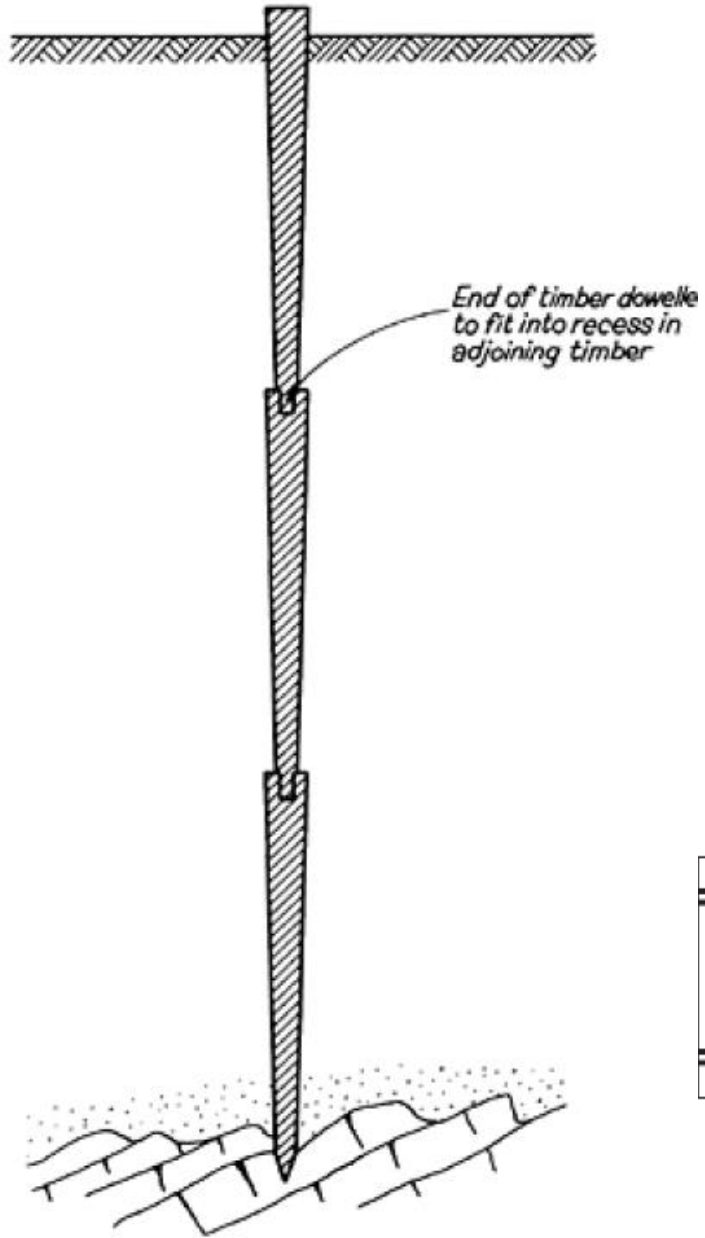
بر حسب شرایط تحت الارضی، سطح آب زیرزمینی، و نوع باری که باید حمل شود، انواع مختلفی از شمعها در کارهای ساختمانی مورد استفاده قرار می گیرد. شمعها بر حسب مصالح که از آن ساخته می شوند، دارای انواع زیر هستند:



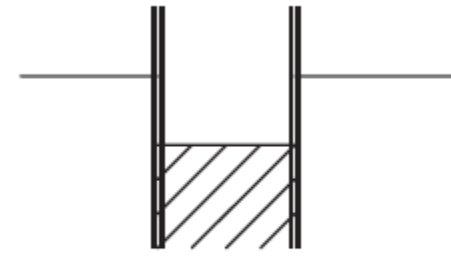
شمع ها به صورت **پیش ساخته** و یا **درجاریز** اجرا می شوند.



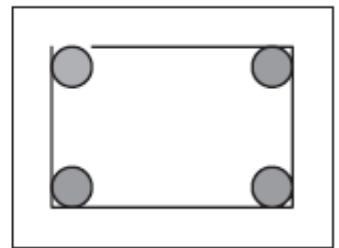
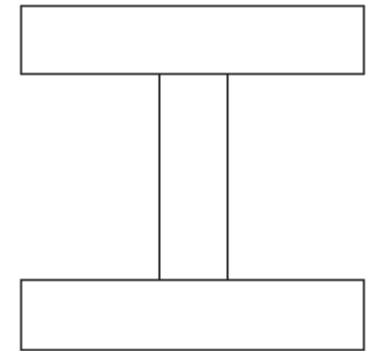
## انواع شمع: از نظر جنس مصالح



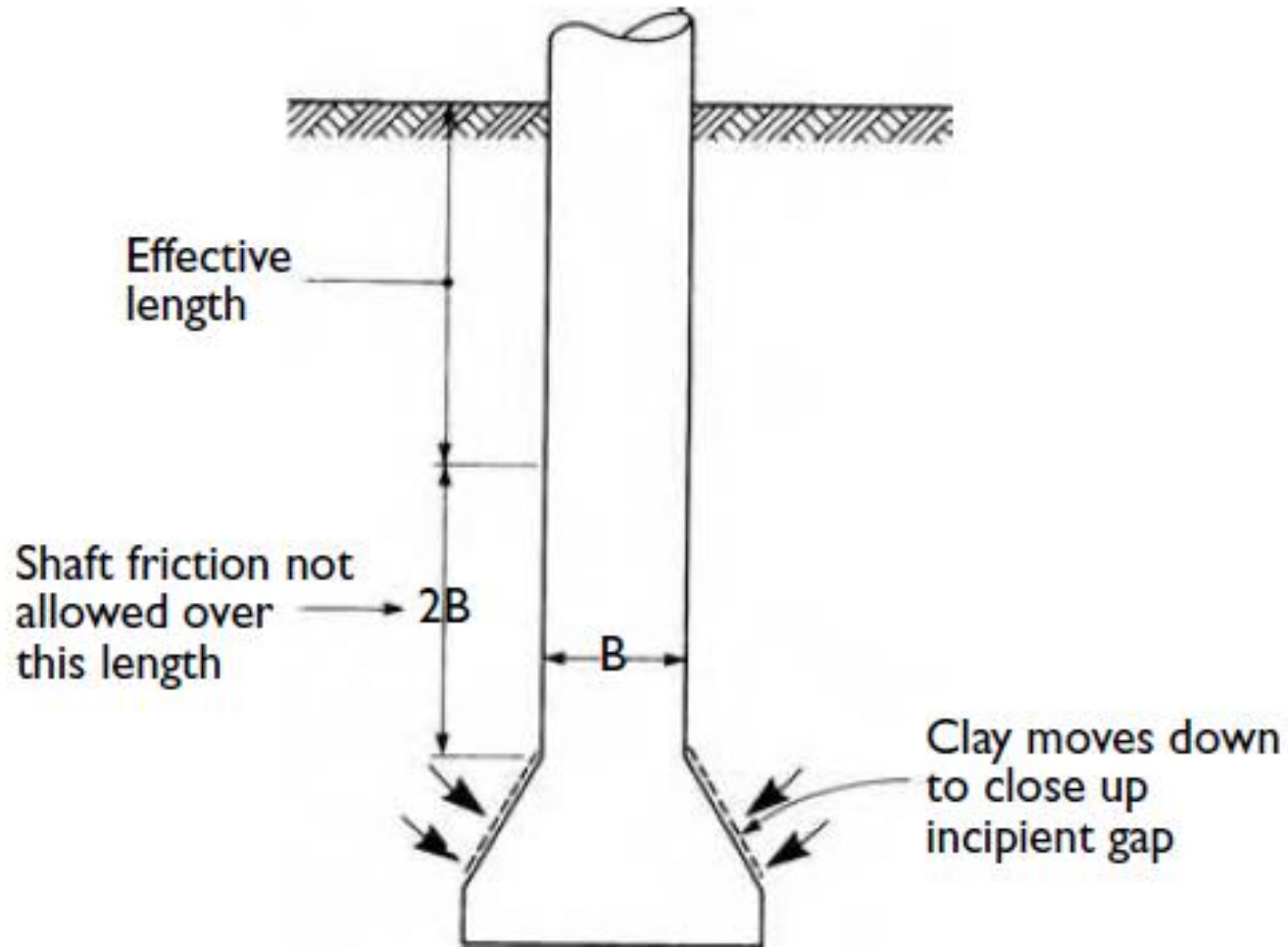
Closed-end pipe pile



Open-end pipe pile



## انواع شمع: از نظر جنس مصالح: شمع پافیلی



## انواع شمع: از نظر جنس مصالح

### شمعهای فولادی

انواع معمول شمعهای فولادی، شمعهای لوله ای و شمعهای H می باشند.

هر چند که می توان از تیرآهنهای I شکل برای شمعکوبی استفاده کرد، لیکن تیرآهنهای با نیمرخ H به علت مساوی بودن ضخامت بال و جان ترجیح داده می شوند. شمعهای لوله ای نیز در دو حالت انتهای بسته و انتهای باز به زمین کوبیده می شوند. در خیلی از حالات، شمعهای لوله ای بعد از کوبیده شدن پر می شوند.

در صورتی که طول مورد نیاز برای شمع بزرگتر از طول یک شاخه شود، شمعهای 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 استفاده می شود.



## انواع شمع: از نظر جنس مصالح



## انواع شمع: از نظر جنس مصالح

در زمینها باتلاقی، خاکهای نباتی، مناطق ساحلی و سایر خاکهای خورنده، املاح خاک و آب می توانند شمعهای فولادی را تحت حملات شیمیایی قرار داده و خوردگی ایجاد نمایند. (خاکهایی که PH آنها بزرگتر از ۷ است، خورنده نیستند). در این حالت یکی از راههای زیر لحاظ می شود:

**الف)** برای جبران کردن کاهش ضخامت به علت خوردگی، علاوه بر ضخامت محاسباتی، معمولاً یک ضخامت اضافی در نظر گرفته می شود.

**ب)** برای جلوگیری از خوردگی، در روی شمعها می توان از یک لایه پوشش اپوکسی استفاده کرد. این پوشش که در کارخانه روی شمعها زده میشود، 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.

**ج)** استفاده از حفاظت کاتودیک روش مطمئنی برای جلوگیری از خوردگی شمع است.

## انواع شمع: از نظر جنس مصالح

### شمعهای بتنی

در عمل، شمعهای بتنی به دو صورت مورد استفاده قرار می گیرند: شمعهای پیش ساخته و شمعهای درجاریز

### شمعهای پیش ساخته

شمعهای پیش ساخته را می توان با استفاده از میلگردهای معمولی ساخت. مقطع آنها به صورت مربع یا هشت ضلعی است. میلگردها به منظور مقاوم نمودن شمع در مقابل خمش وارده در هنگام حمل و نقل، بلند کردن و اعمال نیروی جانبی به شمع و همچنین افزایش مقاومت فشاری، مورد استفاده قرار می گیرند. شمعهای پیش ساخته در طول مورد نظر ساخته شده و تحت شرایط مرطوب به عمل می آیند تا به مقاومت مورد نظر برسند. پس از آن به محل کوبیدن حمل می شوند.



## انواع شمع: از نظر جنس مصالح

### شمعهای بتنی

در عمل، شمعهای بتنی به دو صورت مورد استفاده قرار می گیرند: شمعهای پیش ساخته و شمعهای درجاریز

### شمعهای پیش ساخته

شمعهای پیش ساخته را می توان با استفاده از کابل‌های پیش تنیدگی پر مقاومت، به صورت پیش تنیده در آورد. مقاومت نهایی کابل‌های پیش تنیدگی در حدود ۱۸۰۰ نیوتن بر میلیمتر مربع (مگا پاسکال) مساوی ۱۸۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) می باشد. برای ساخت شمعهای پیش تنیده، کابلها تا تنش ۹۰۰ تا ۱۳۰۰ نیوتن بر میلیمتر مربع درون قالب کشیده می شوند و سپس درون قالب با بتن پر می شود. بعد از به عمل آوردن بتن، کابل‌های پیش تنیدگی بریده می شوند که در نتیجه یک نیروی فشاری به مقطع شمع اعمال می شود.

## انواع شمع: از نظر جنس مصالح

### شمعهای بتنی در جاریز

این شمعها بدین صورت اجرا می شوند که ابتدا چاهی در زمین به وسیله دست یا ماشین حفر می شود و سپس قفسه آرماتورها درون چاه قرار داده شده و داخل آن با بتن پر می شود. شمعهای درجاریز در دو گروه اصلی جای می گیرند (الف) با غلاف، (ب) بدون غلاف. هر دو گروه می توانند دارای نوک پهن شده (پداستال یا خزینه) باشند. شمعهای درجاریز غلافدار بدین صورت اجرا می شوند که ابتدا یک لوله فولادی به زمین کوبیده شده و پس از رسیدن به عمق مورد نظر، مصالح داخل آن خالی شده و داخل لوله پر از بتن می شود. لوله را می توان با قراردادن یک سنبه در داخل آن کوبید و پس از رسیدن به عمق مورد نظر، سنبه را خارج کرد. برای اجرای شمع بدون غلاف، ابتدا غلاف در زمین کوبیده شده و سپس همزمان با بتن ریزی در داخل غلاف، غلاف بتدریج به بیرون کشیده می شود.

## انواع شمع: از نظر جنس مصالح



Rotary Bored Piling



## انواع شمع: از نظر جنس مصالح

### شمعهای چوبی

شمعهای چوبی تنه های درختهای سالم، صاف و بلند می باشند که شاخ و برگ آن زده شده و سطح آن پس از کندن پوست، به دقت تراشیده شده است. حداکثر طول اغلب شمعهای چوبی بین ۱۰ تا ۲۰ متر می باشد. چوبی که از آن به عنوان شمع استفاده می شود باید مستقیم، بدون درز و ترک، و سالم باشد.

انجمن آمریکایی مهندسان عمران (ASCE) در دستور العمل اجرایی شماره ۱۷ (۱۹۵۹)، شمعهای چوبی را به سه کلاس زیر تقسیم می کند:

**شمعهای کلاس A:** این شمعها بارهای سنگین را حمل می کنند. حداقل قطر سر چنین شمعهایی ۳۵۰ میلیمتر (۱۴ اینچ) می باشد.

## انواع شمع: از نظر جنس مصالح

**شمعهای کلاس B :** این شمعها بارهای متوسط را حمل می کنند . حداقل قطر سر این شمعها بین ۳۰۵ تا ۳۳۰ میلیمتر (۱۲ تا ۱۳ اینچ) می باشد.

**شمعهای کلاس C :** از این شمعها برای کارهای ساختمانی موقت استفاده می شود. وقتی که تمام طول شمع در داخل سفره آب زیرزمینی قرار داشته باشد، از این شمعها می توان برای حمل بارهای دائمی استفاده کرد . حداقل قطر سر این شمعها ۳۰۵ میلیمتر (۱۲ اینچ) می باشد.

در هیچ حالتی قطر نوک شمع نباید کمتر از ۱۵۰ میلیمتر (۶ اینچ) باشد.

## انواع شمع: از نظر جنس مصالح

شمعهای چوبی نمی توانند تنشهای حاصل از کوبیده شدن در لایه های سفت را تحمل کنند. بنابراین ظرفیت آنها معمولاً به ۲۲۰ تا ۲۷۰ کیلو نیوتن محدود می شود. برای این که در حین کوبیدن نوک شمع صدمه نبیند، میتوان از کفشکهای فولادی استفاده کرد. در حین کوبیدن، بالای شمع نیز ممکن است آسیب ببیند. برای جلوگیری از آسیب رسیدن به بالای شمع، می توان از سرپوشهای فولادی استفاده کرد.

از وصله شمعهای چوبی باید اجتناب کرد. به خصوص وقتی که شمع نیروی کششی یا جانبی حمل کند. اگر شمع چوبی در خاک کاملاً اشباع کوبیده شود، عمر آن تقریباً بی نهایت خواهد بود. لیکن در آب و هوای دریایی، شمعهای چوبی تحت حملات ارگانیسیمهای مختلف قرار گرفته و ظرف چند ماه صدمات جدی در آنها ظاهر می شود. شمع چوبی در بالای سطح آب زیرزمینی، تحت حملات حشرات قرار می گیرند. با انجام بعضی اصلاحات، مثلاً محافظت آنها توسط روغن کروزوت، می توان عمر آنها را افزایش داد.

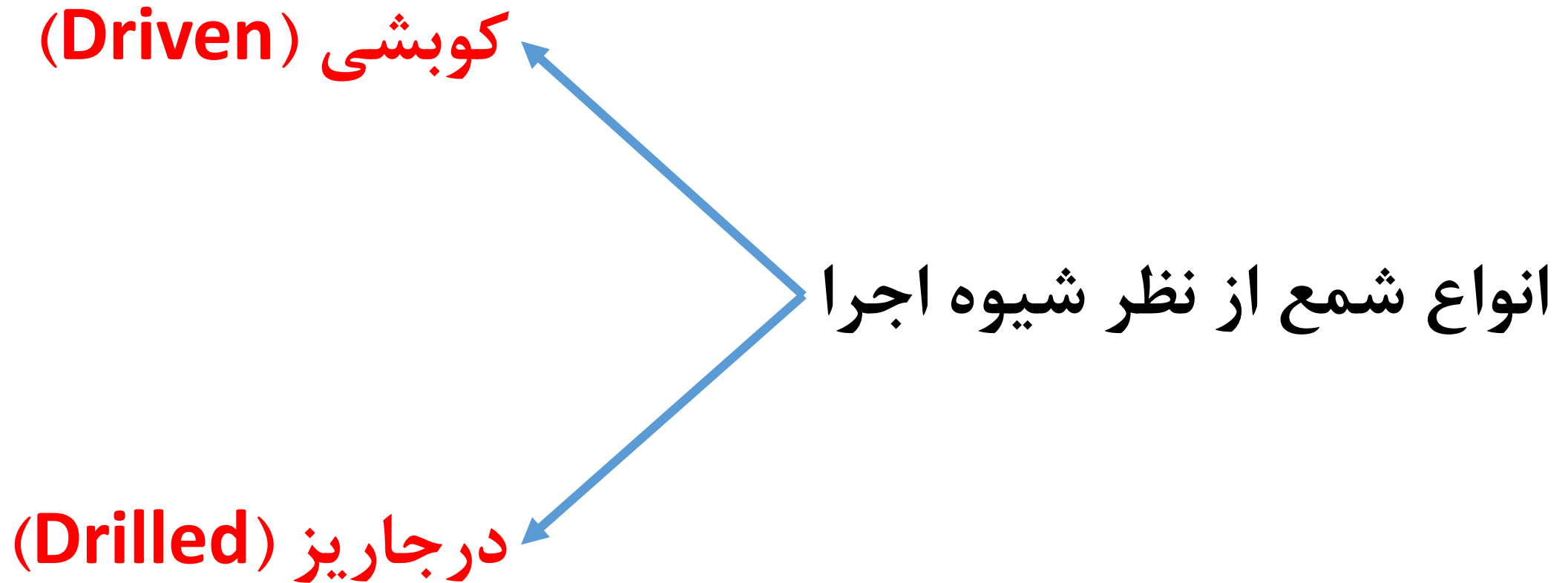
## انواع شمع: از نظر جنس مصالح

### شمعهای مرکب (مختلط)

در شمعهای مرکب، قسمت‌های فوقانی و تحتانی شمع از دو مصالح مختلف ساخته می‌شوند. به عنوان مثال، شمعهای مرکب ممکن است از فولاد و بتن و یا چوب و بتن ساخته می‌شوند. شمعهای مختلط فولاد و بتن مرکب از قسمت تحتانی فولاد و قسمت فوقانی بتن درجا می‌باشند. این نوع شمع وقتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که طول شمع لازم برای تأمین ظرفیت باربری از ظرفیت شمع بتنی در جای ساده تجاوز کند. شمعهای مختلط چوب و بتن دارای قسمت تحتانی چوبی می‌باشند که به طور دائم در سفره آب زیرزمینی قرار دارد و قسمت فوقانی آنها از بتن است. در هر صورت ایجاد وصله در محل تلاقی دو مصالح مشکل بوده و به همین علت است که شمعهای مختلط دارای کاربرد وسیعی نمی‌باشند.



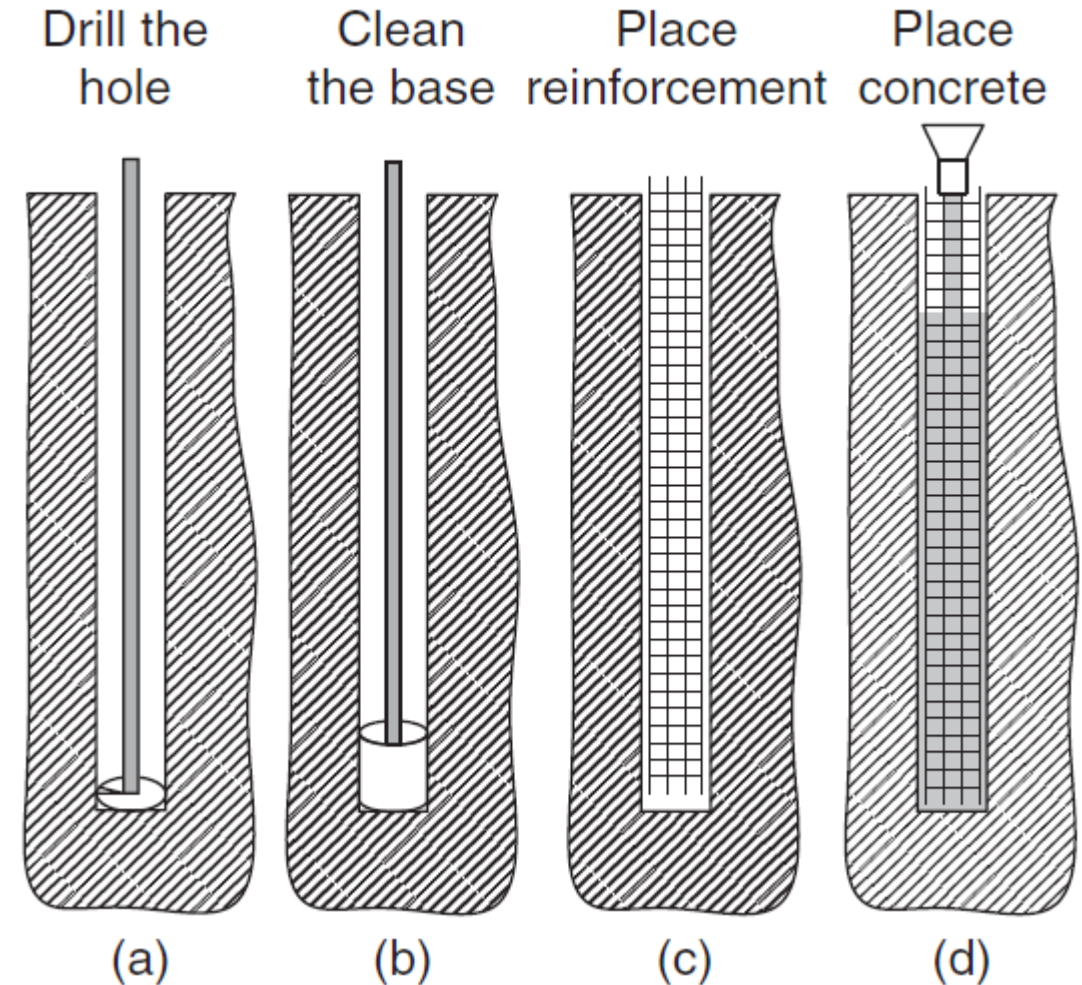
## انواع شمع: از نظر شیوه اجرا



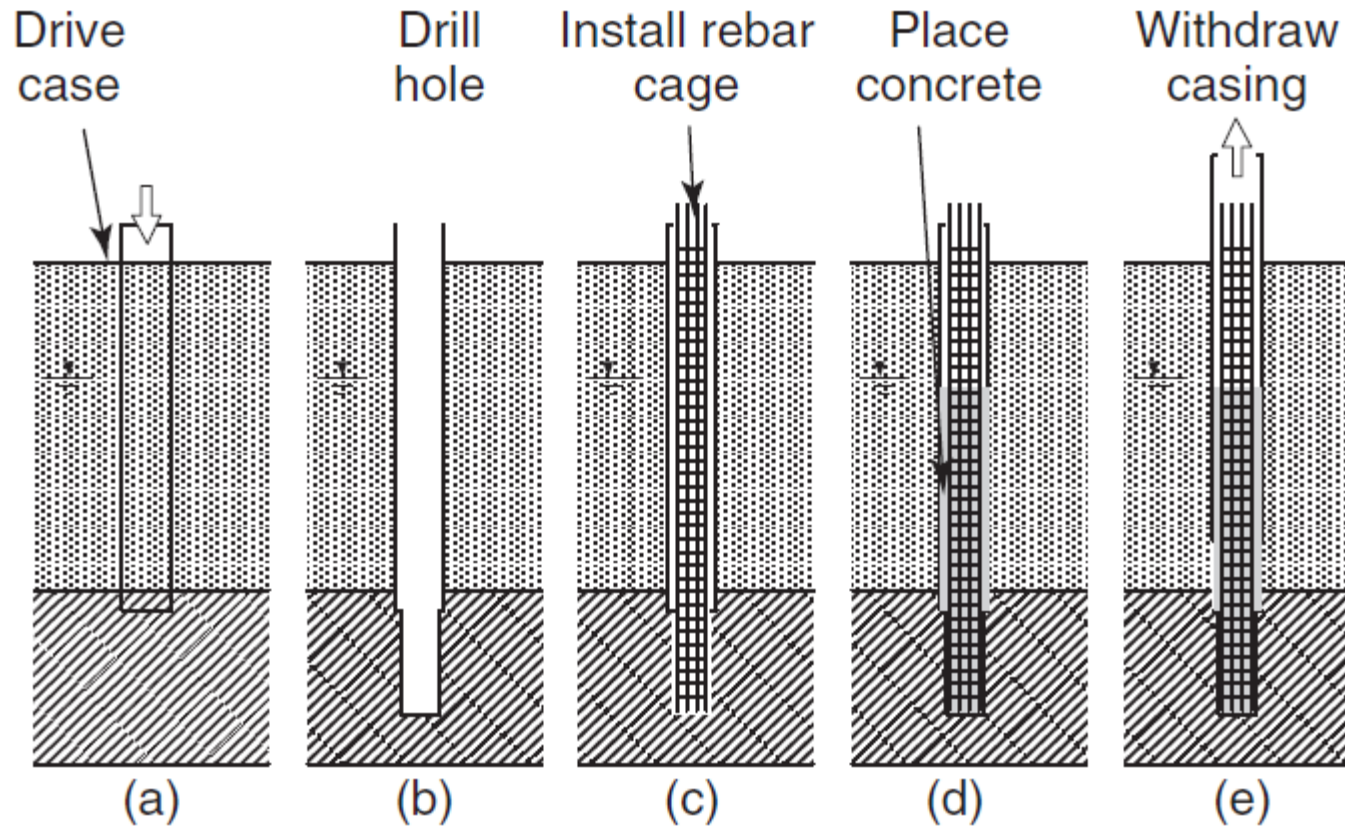
## انواع شمع: از نظر شیوه اجرا شمع درجاریز (Drilled)



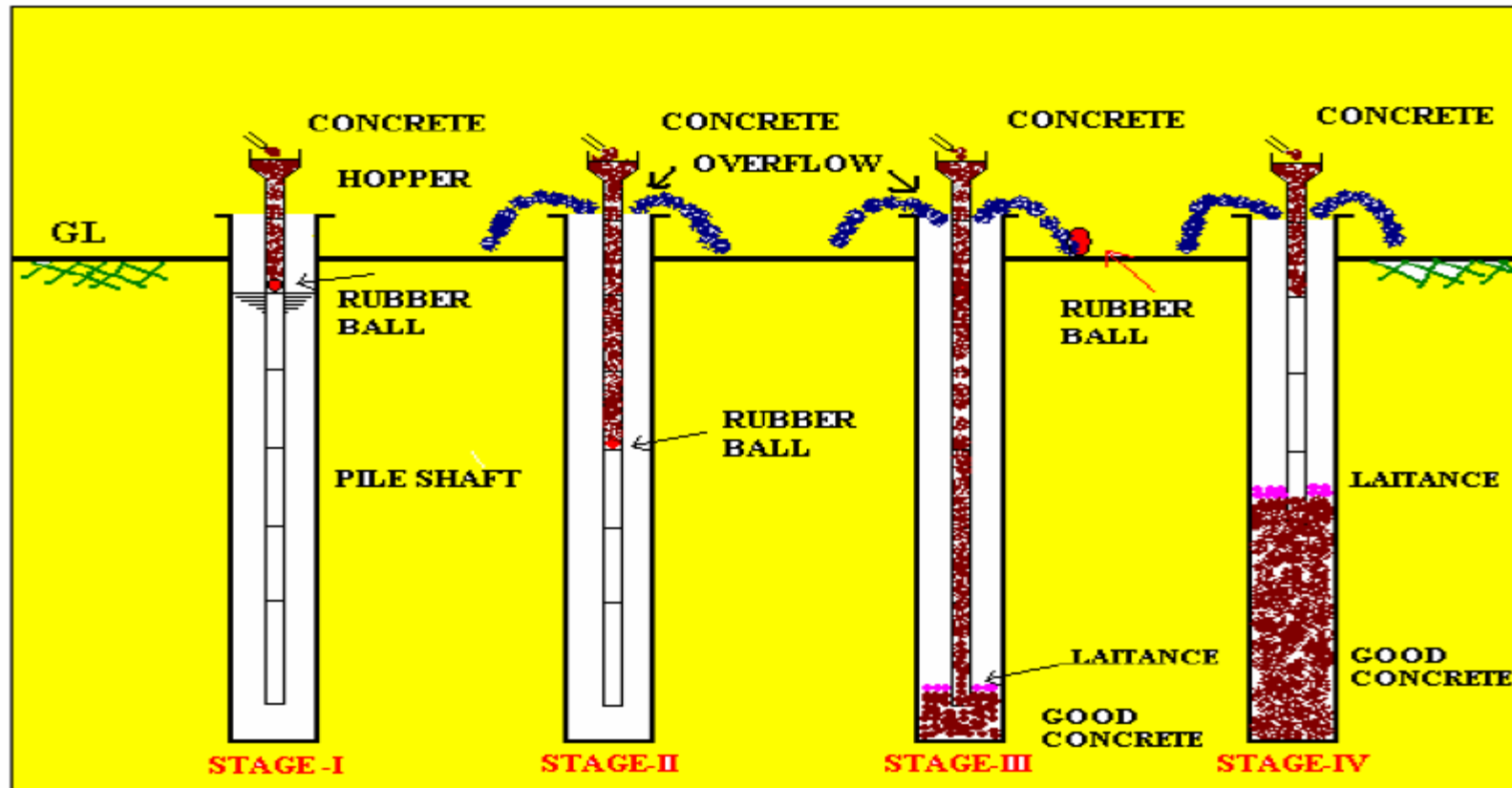
Rotary Bored Piling



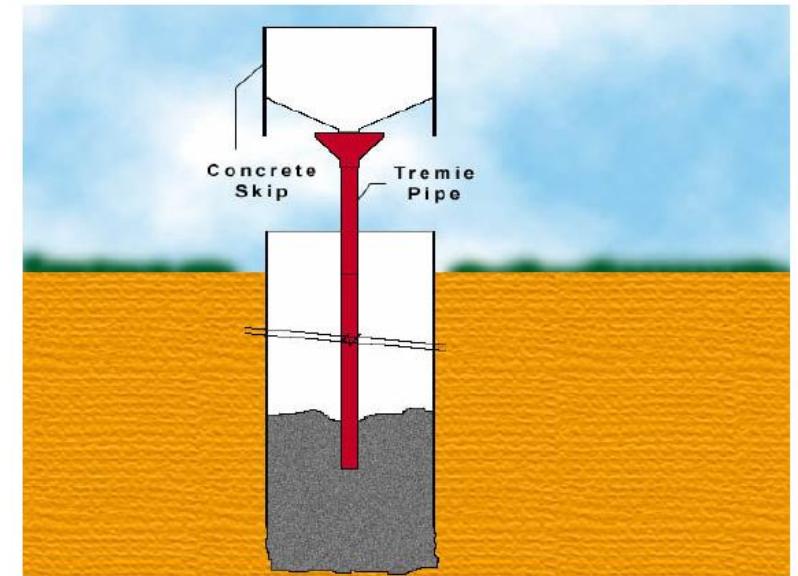
## انواع شمع: از نظر شیوا اجرا شمع درجاریز (Drilled)



## انواع شمع: از نظر شیوا اجرا شمع درجاریز (Drilled)



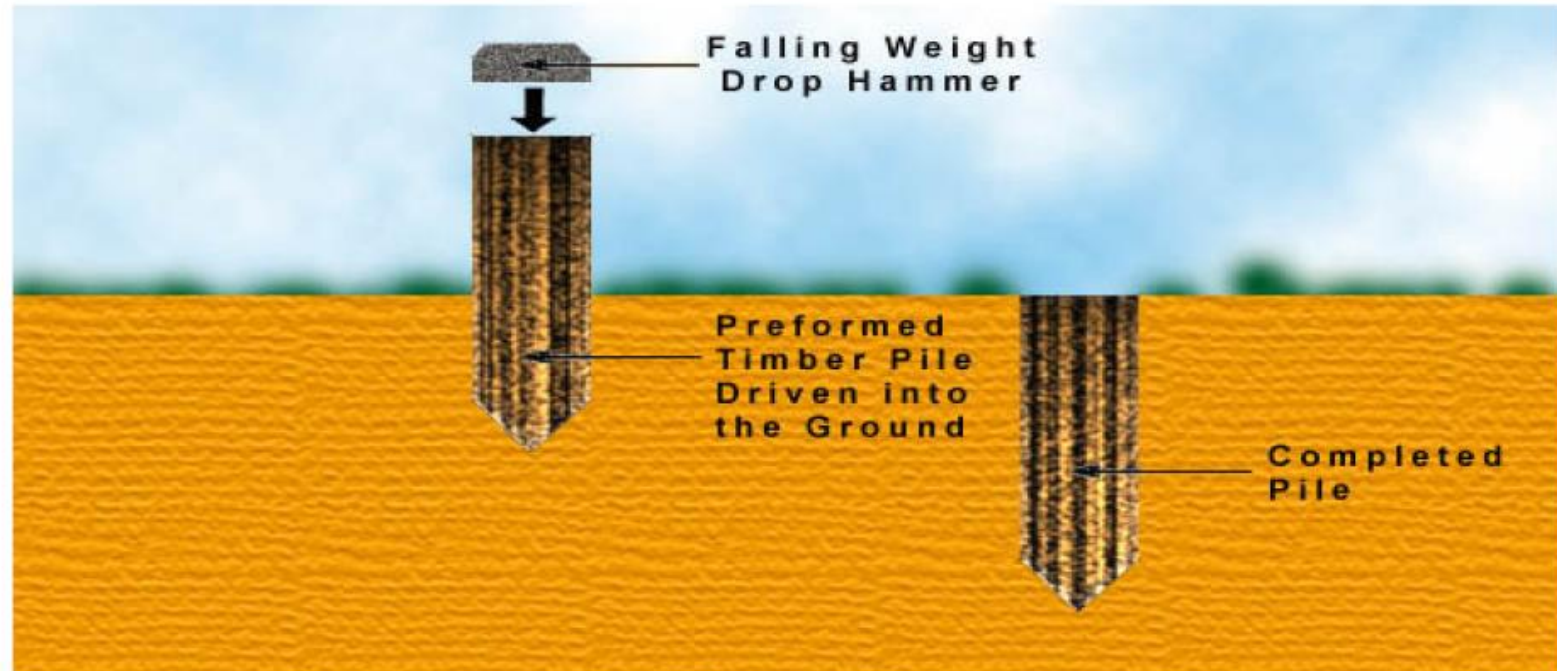
Tremie Concreting





## انواع شمع: از نظر شیوا اجرا

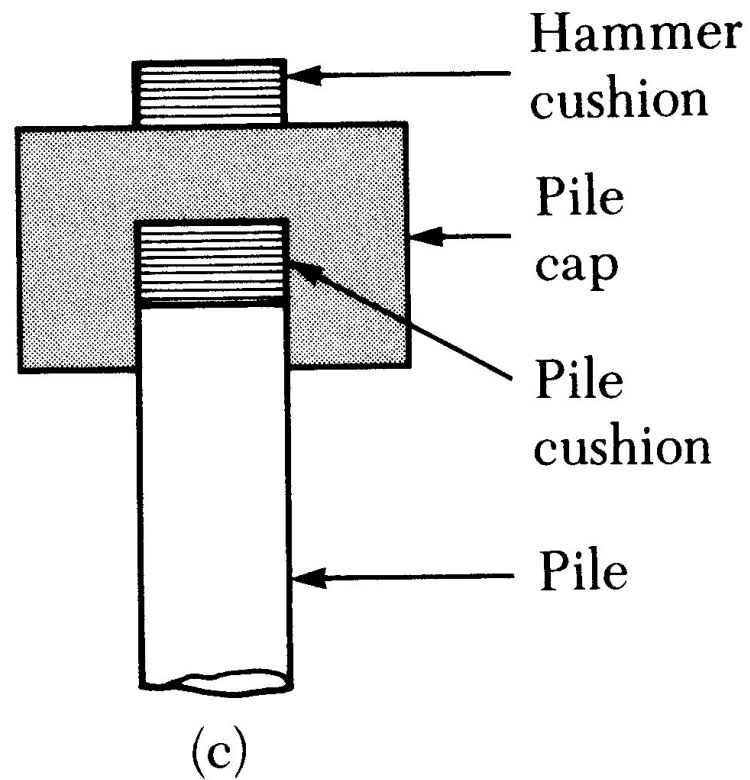
شمع کوبشی (Driven)



Driven Piles

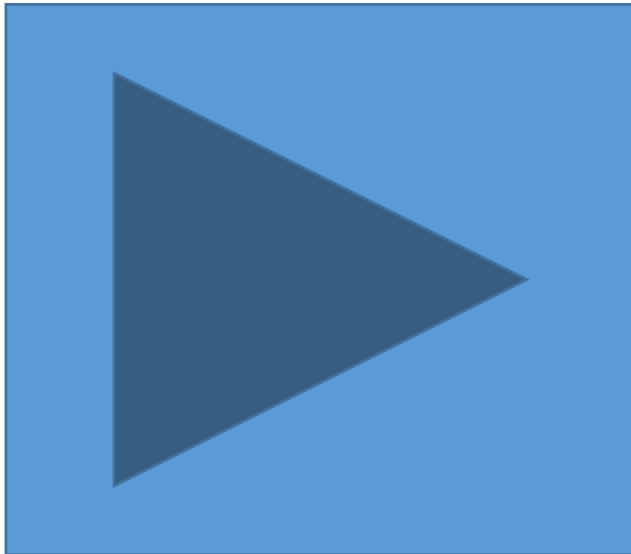
## انواع شمع: از نظر شیوا اجرا

شمع کوبشی (Driven)



## انواع شمع: از نظر شیوا اجرا

شمع کوبشی (Driven)



انواع شمع: از نظر مکانیزم باربری

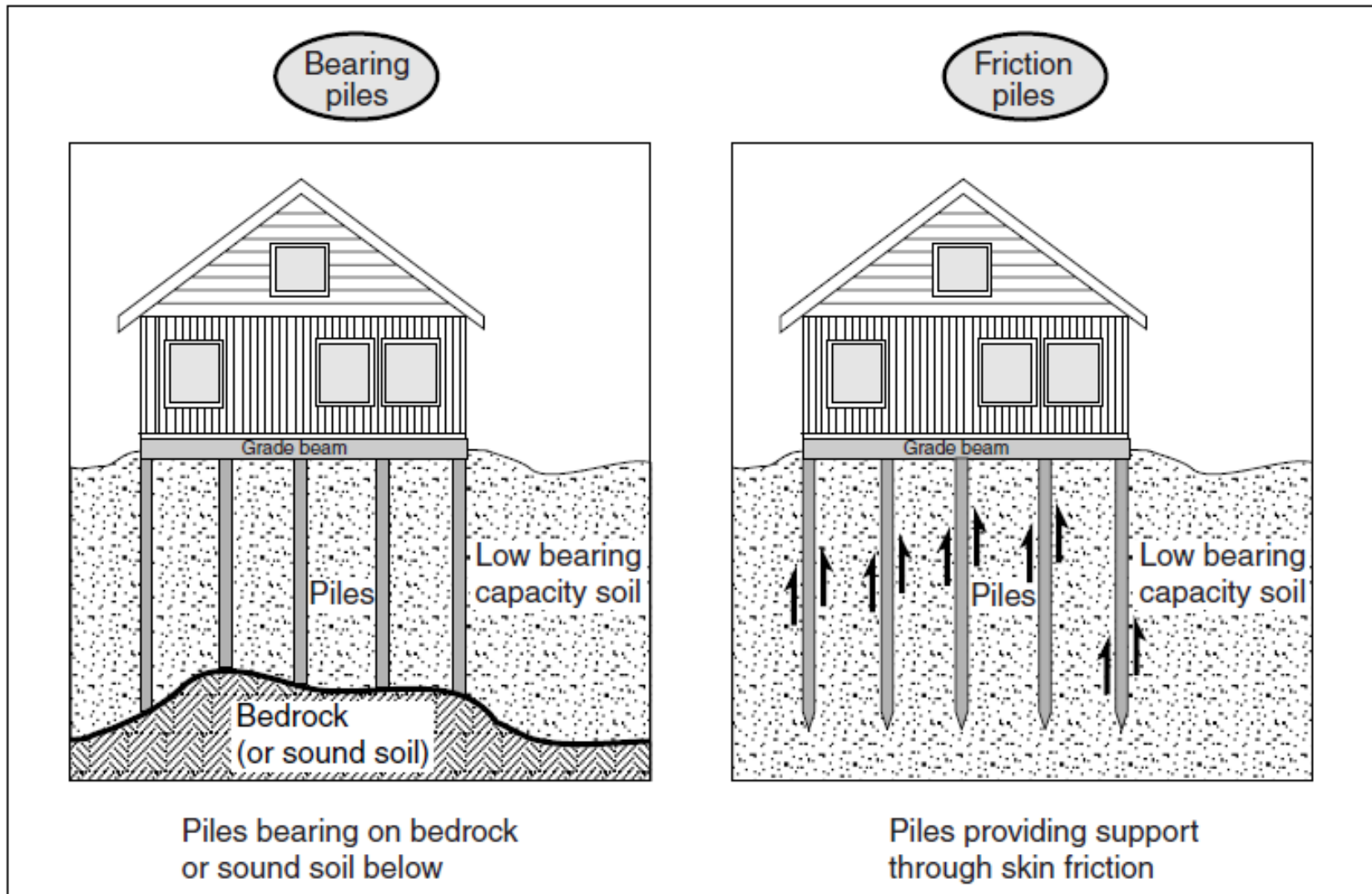
اتکایی (Bearing)

انواع شمع: از نظر مکانیزم باربری

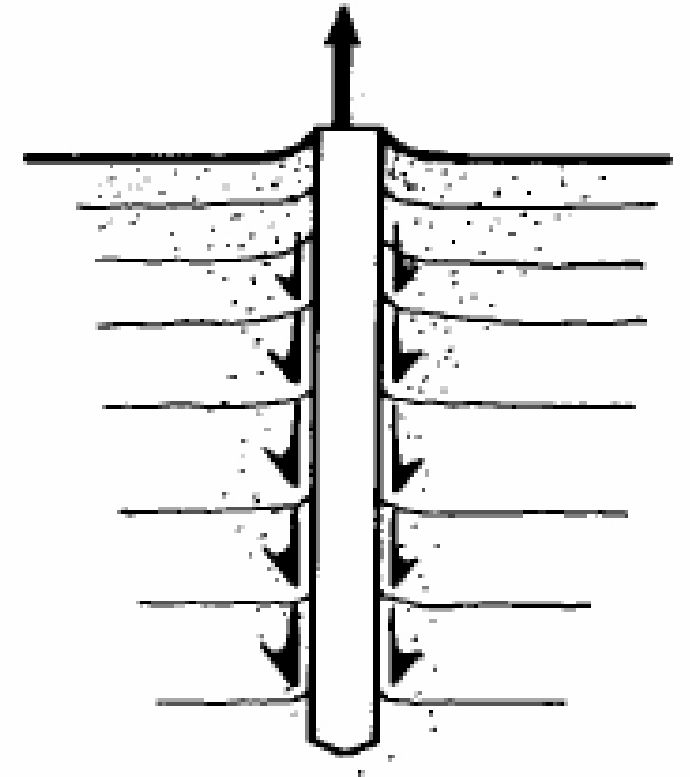
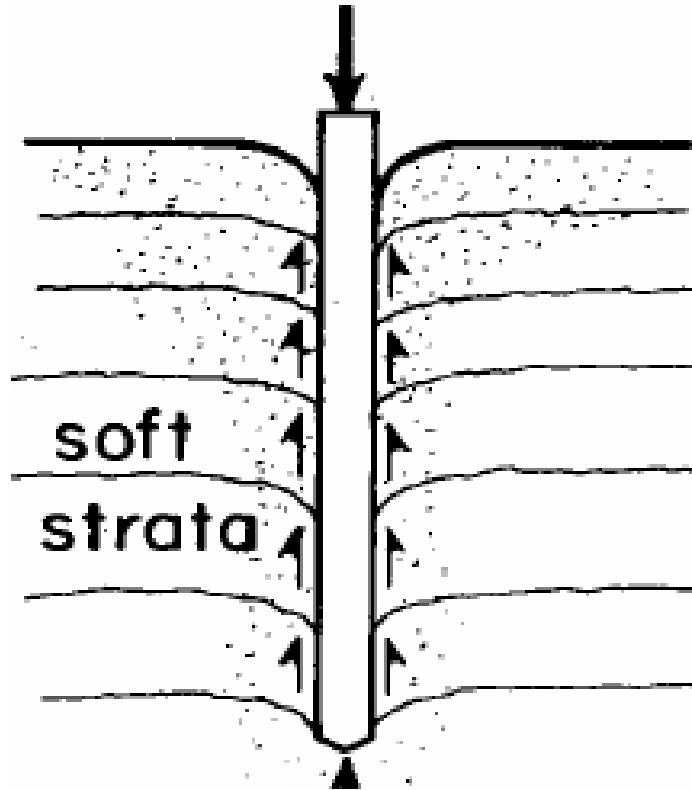
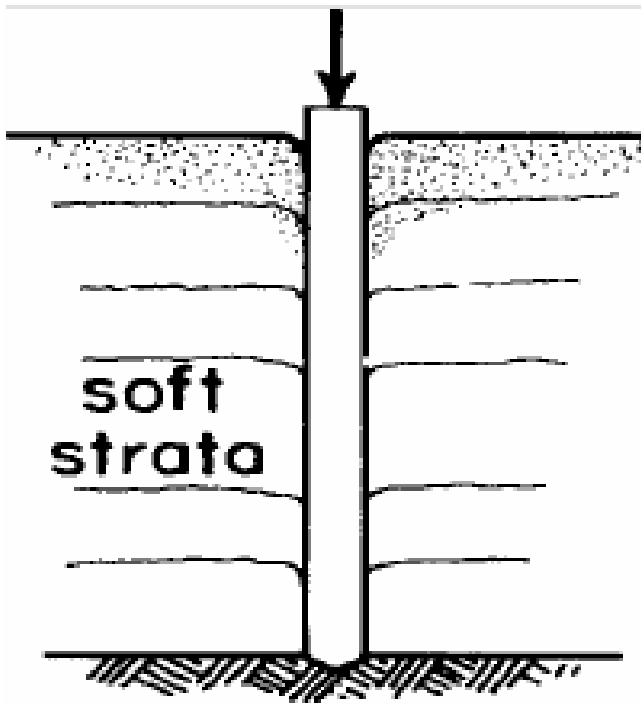
اصطکاکی (Friction)



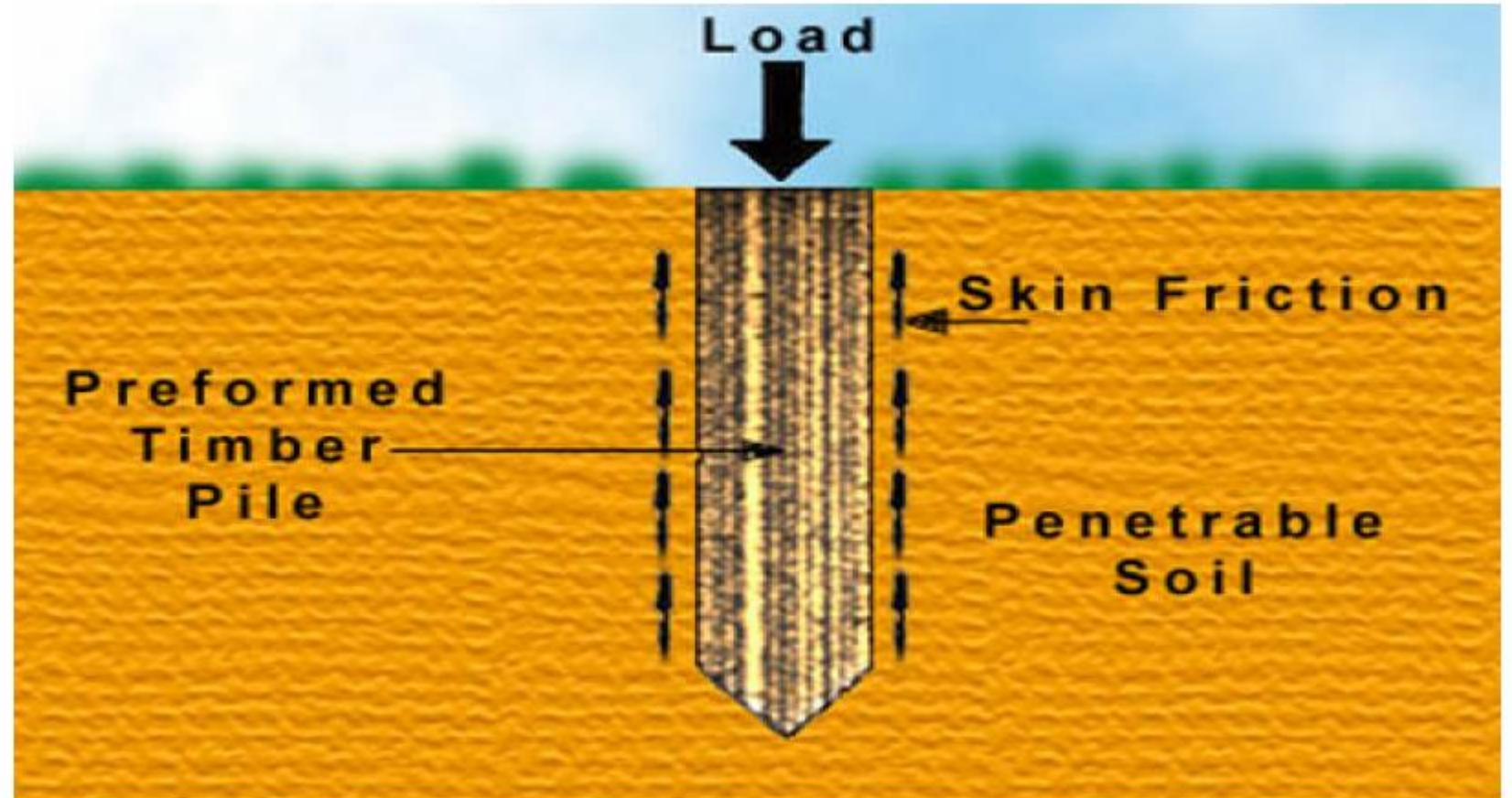
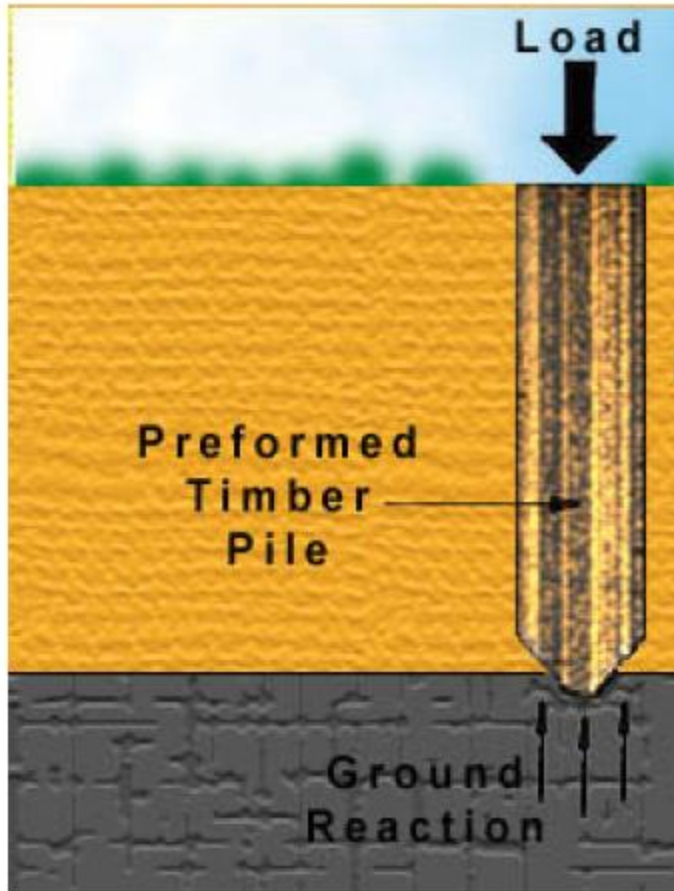
## انواع شمع: از نظر مکانیزم باربری



## انواع شمع: از نظر مکانیزم باربری



## انواع شمع: از نظر مکانیزم باربری



## انواع شمع: از نظر مکانیزم باربری

نکته: اگر شمع مقاومت جدا به شمع است به کل ظرفیت باربر حدود 80٪ باشد و شمع  
را همگی که با هم قرار می‌گیرند. (جمع هر واقع در خاک رس) و با شمع در شمع مقاومت  
نزد 80٪ کل ظرفیت باربر کل باشد شمع را آگاهی و نزدیک باربر بگویند.



## انواع شمع: از نظر مکانیزم باربری

نکته : شمعها گاهی مواقع تحت زاویه ای نسبت به امتداد قائم کوبیده میشوند. معمولترین زاویه، ۱۴ تا ۲۰ درجه هستند. به این شمعها، شمعهای مایل می گویند. شمعهای مایل در گروه شمعها، وقتی که نیروی جانبی قابل توجه باشد، مورد استفاده قرار می گیرند. (مثلا در شمعهای زیر عرشه اسکله ها)

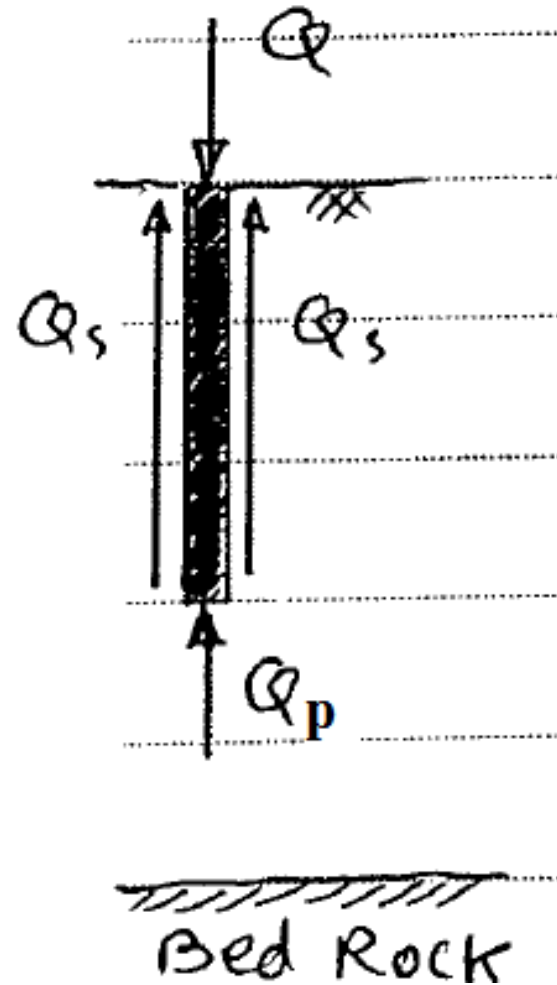
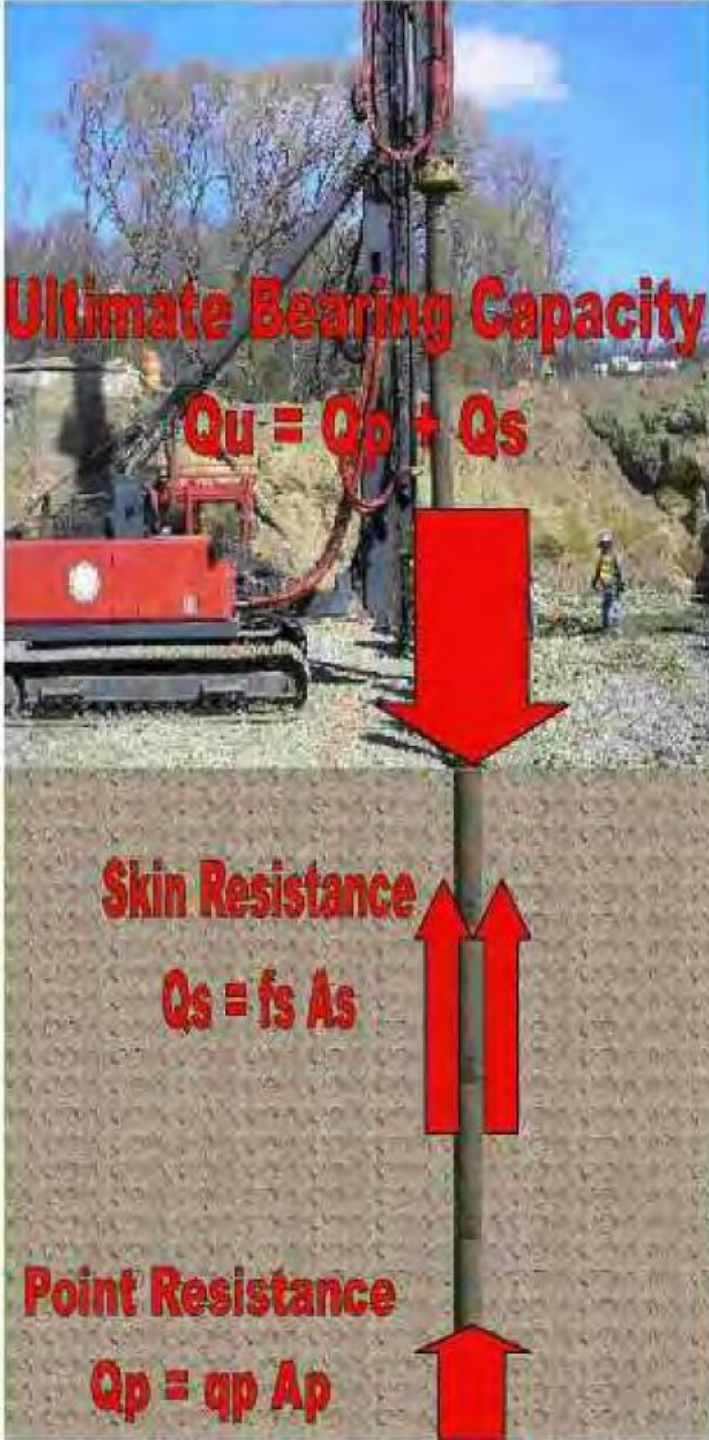


## انواع شمع: از نظر میزان جابجایی

### شمعهای با جابه جایی و بدون جابه جایی

بر حسب طبیعت قرارگیری، شمعها به دو گروه شمعهای با جا به جایی و بدون جا به جایی تقسیم می شوند. شمعهای کوبیده شده، شمعهای با جابه جایی زیاد قرار دارند. لیکن شمعهای فولادی H به علت حجم کم، باعث جابجایی کم خاک اطراف می شوند و به همین جهت به آنها شمعها با جابه جایی کوچک گفته می شود. شمعهایی که به صورت درجا با حفاری خاک اجرا می شوند، در رده شمعهای بدون جا به جایی قرار دارند. اجرای این شمعها تغییرات کمی در حالت تنش خاک اطراف شمع ایجاد می کند.

## مکانیزم باربری شمع ها



$$Q_u = Q_p + Q_s$$



## مکانیزم باربری شمع ها

### شمع اتکایی

اگر بستر سنگی و یا لایه شبیه سنگ (خیلی متراکم) در عمق منطقی قرار داشته باشد، شمع را می توان تا آن لایه ادامه داد. در این حالت ظرفیت باربری شمع کاملاً بستگی به ظرفیت باربری بستر سنگی در مقابل نوک شمع خواهد داشت. به همین علت به این شمعها، اتکایی می گویند. در چنین حالتی با توجه به معلوم بودن عمق بستر سنگی از روی گمانه های حفر شده، تعیین طول شمع کار چندان مشکلی نخواهد بود.

اگر به عوض بستر سنگی، یک لایه سخت و نسبتاً متراکم در عمق منطقی قرار داشته باشد، شمع را می توان چند متر در لایه سخت ادامه داد.



## مکانیزم باربری شمع ها شمع اتکایی

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

برای این نوع شمع ظرفیت باربری نهایی از رابطه زیر به دست می آید:  
که در رابطه فوق:

$Q_p$  = ظرفیت باربری اتکایی در نوک شمع

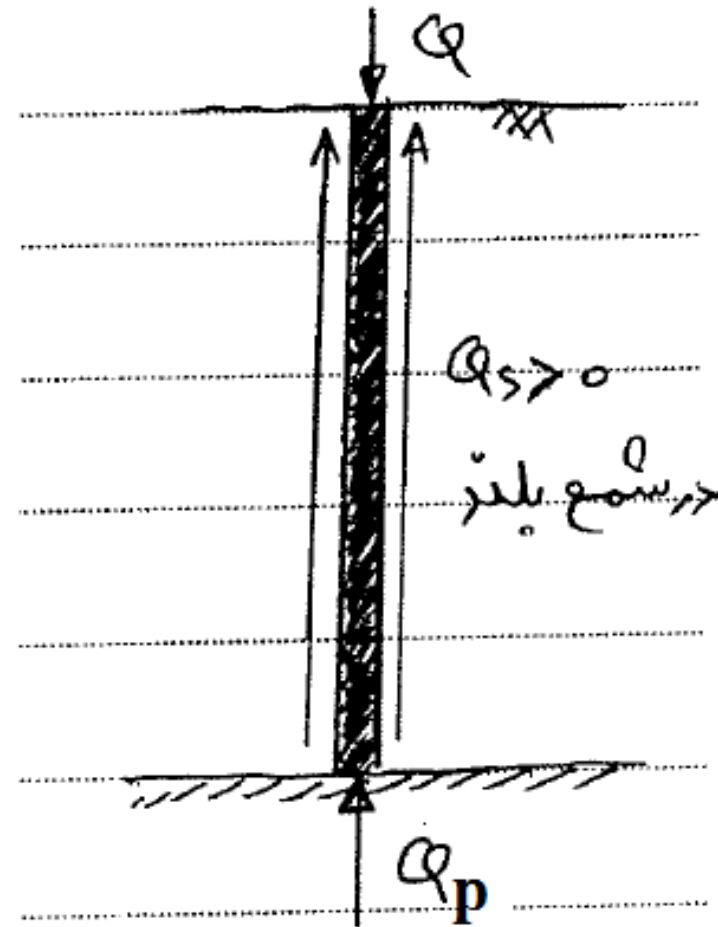
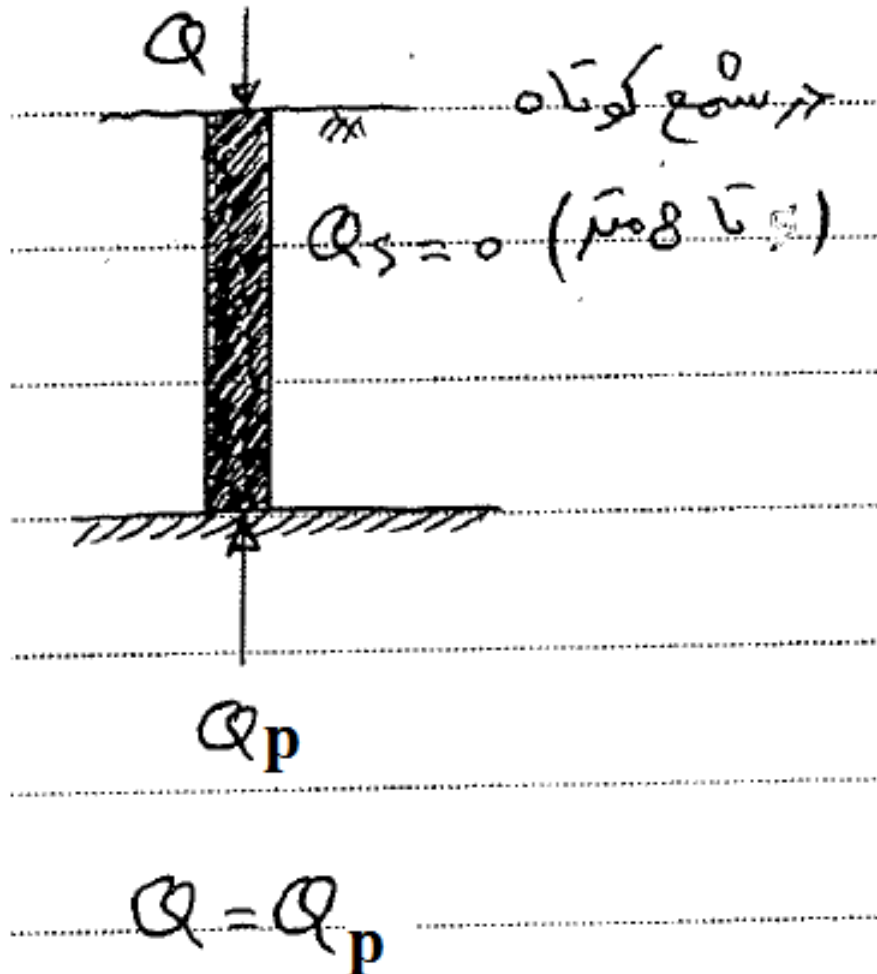
$Q_s$  = ظرفیت باری اصطکاکی جلدی

در صورتی که  $Q_s$  کوچک باشد، خواهیم داشت:

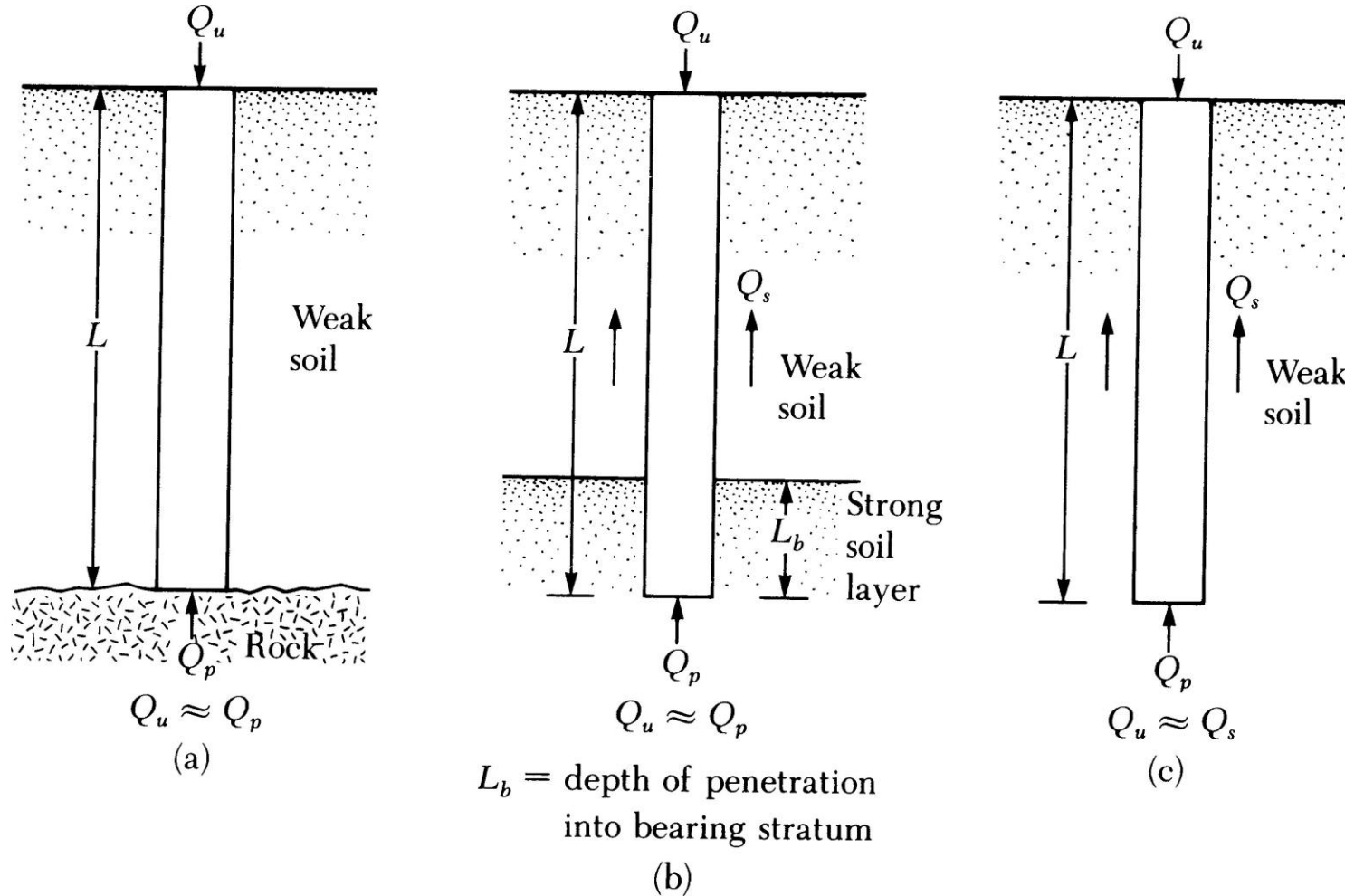
$$Q_u \approx Q_p$$

در صورتی که مشخصات خاک تحت الارضی در دست باشد، می توان تخمین مناسبی از طول شمع داشت.

## مکانیزم باربری شمع ها شمع اتکایی



# مکانیزم باربری شمع ها شمع اتکایی



**Figure 8.6** Point bearing piles [(a) and (b)]; friction piles [(c)]

## مکانیزم باربری شمع ها

### شمع اصطکاکی

در صورتی که عمق بستر سنگی یا لایه شبیه به سنگ زیاد باشد، طول لازم برای شمع اتکایی غیر اقتصادی خواهد شد. در چنین شرایطی شمع به عمق مناسبی در لایه نرم فوقانی بدون اینکه به لایه سخت برسد، کوبیده می شود. ظرفیت باربری نهایی این شمع را نیز می توان از رابطه  $Q_u = Q_p + Q_s$  به دست آورد. لیکن از آنجایی که مقدار ظرفیت اتکایی  $Q_p$  نسبتاً کوچک است، ظرفیت باربری نهایی شمع محدود به ظرفیت باربری اصطکاکی خواهد شد.

$$Q_u \approx Q_s$$



## مکانیزم باربری شمع ها

انتخاب نام اصطکاکی برای این شمعها، از آنجا ناشی می شود که اکثر مقاومت آنها به وسیله اصطکاک جدار تأمین می شود. البته این اسم بعضی مواقع می تواند گمراه کننده باشد، زیرا مقاومت شمعهایی که در لایه رسی کوبیده می شوند، بستگی به چسبندگی بین جدار شمع و رس دارد.

طول لازم برای شمع اصطکاکی بستگی به مقاومت برشی خاک، بار وارده، و اندازه شمع دارد. برای تعیین طول لازم شمع، احتیاج به درک خوبی از اندرکنش خاک - شمع، قضاوت مهندسی و تجربه است. در بخشهای بعدی روشهای تئوریک برای محاسبه ظرفیت باربری شمعها ارائه خواهد شد.