

بسمه تعالی

کارگاه آموزشی

سیستم فونداسیون برای ساختمان‌های بلند

Foundation System for Tall Buildings

توسط: دکتر ابوالفضل اسلامی

بهار ۱۴۰۱ - بابلسر

---

## تقدیم به محضر:

❖ ملت شریف ایران و مردم آبادان

❖ جامعه مهندسين عمران

❖ نیروهای امداد و نجات

# Outline

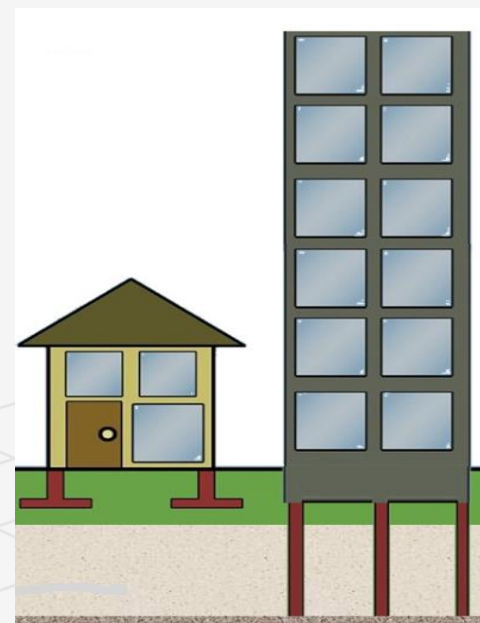
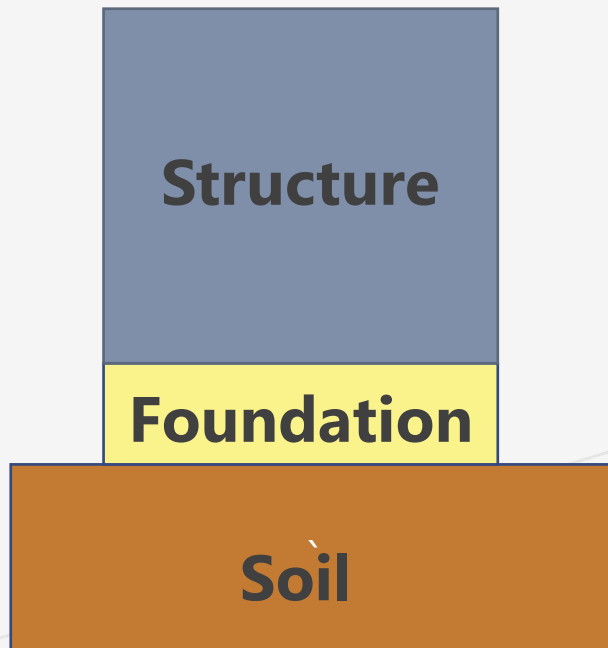
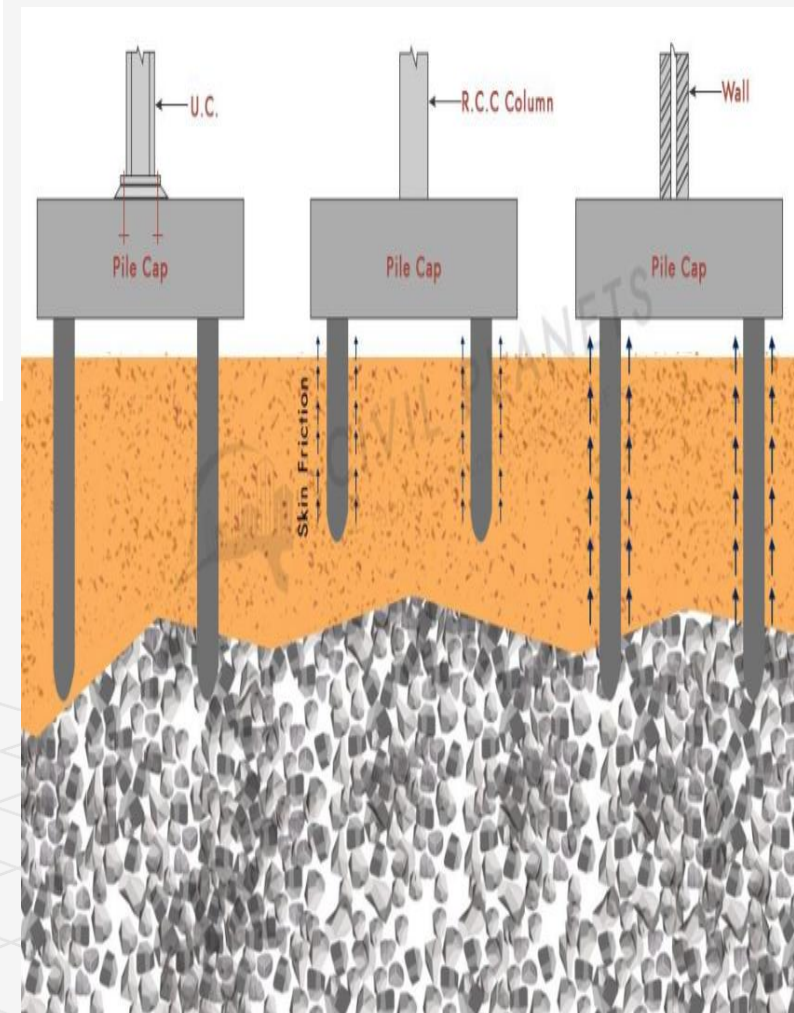
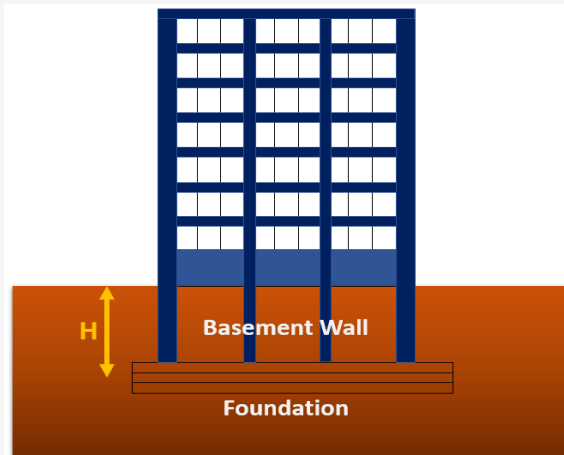
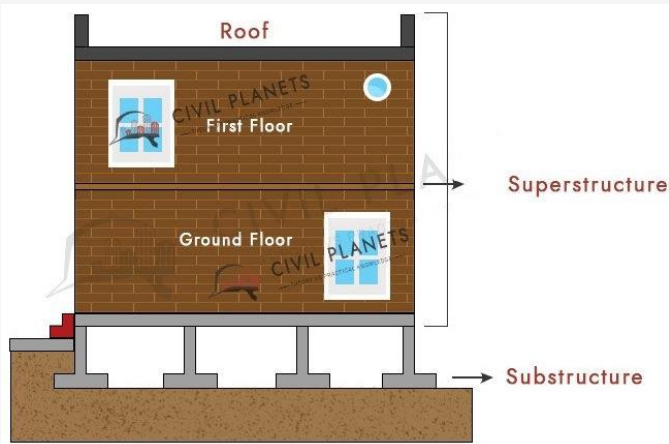
# عناوین

1	Introduction	۱	مقدمه
2	High-rise Structures (Tall Buildings)*	۲	سازه‌های مرتفع ( ساختمان‌های بلند )*
3	Major Requirements	۳	ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه
4	Foundation System Selection	۴	انتخاب سیستم فونداسیون
5	Foundation Damages	۵	آسیب‌ها و معضلات
6	Case Studies	۶	موارد عملی

# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

دنیای  
ژئوتکنیک





# 1. Introduction

## ۱. مقدمه



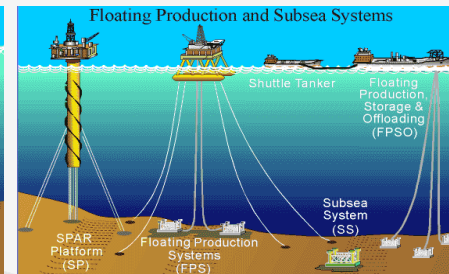
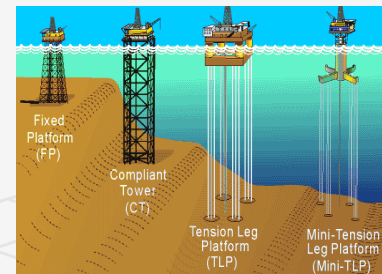
دنیای  
ژئوتکنیک

Eslami, 2020

# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

سازه ها و ابنیه





# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

مهندسی پی

• پروژه‌های عمرانی

Superstructure

❖ روسازه

Substructure

❖ زیرسازه

- زیرسازه در تماس با خاک و مشارکت در روند انتقال بار سازه به زمین
- انتقال بار از روسازه به زمین توسط عنصری به نام پی یا فونداسیون

**ترزاقی:**

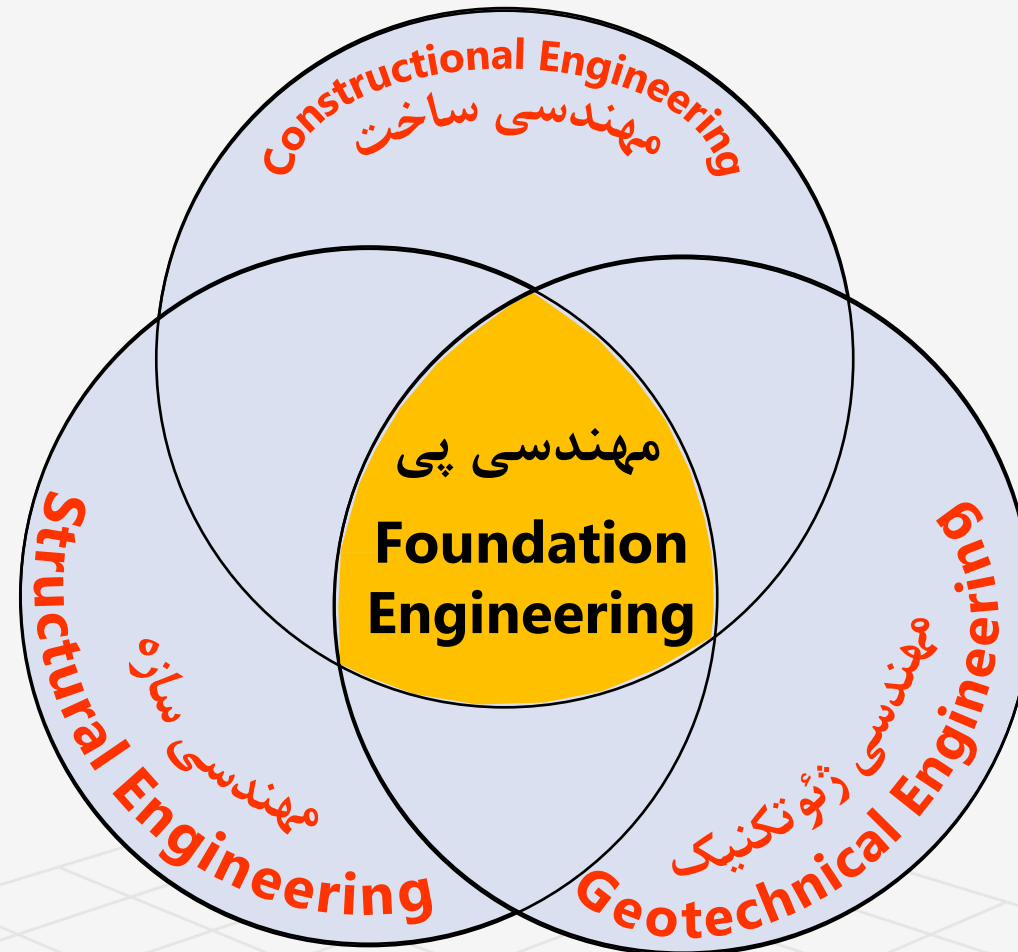
«طراحی هر آنچه که مربوط به زمین می‌شود را نباید صرفاً در دفتر کار انجام داد.»

Knowledge Based, Construction Technology, Optimization

# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

مهندسی پی



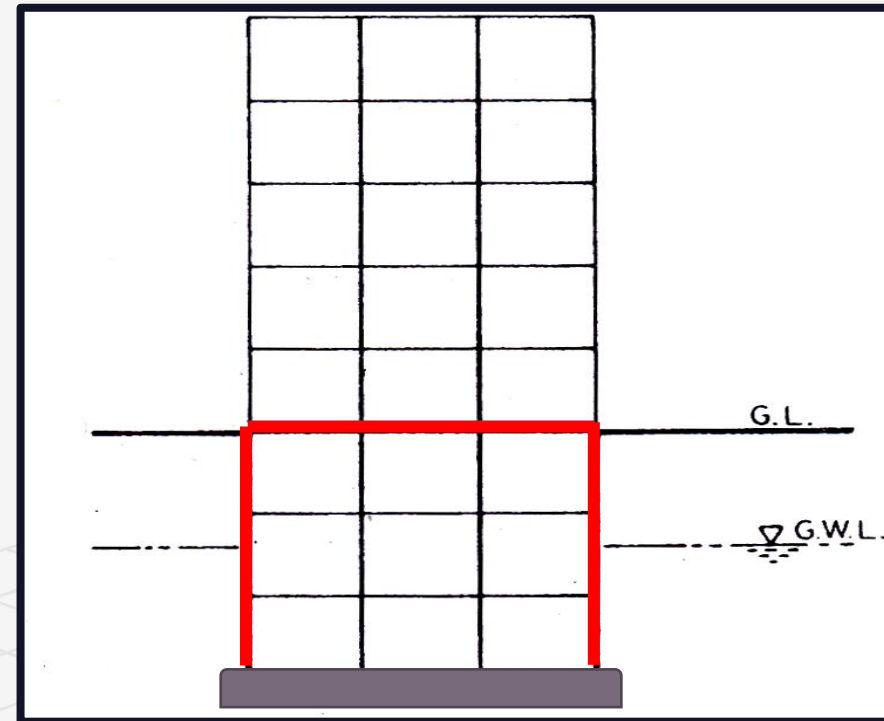
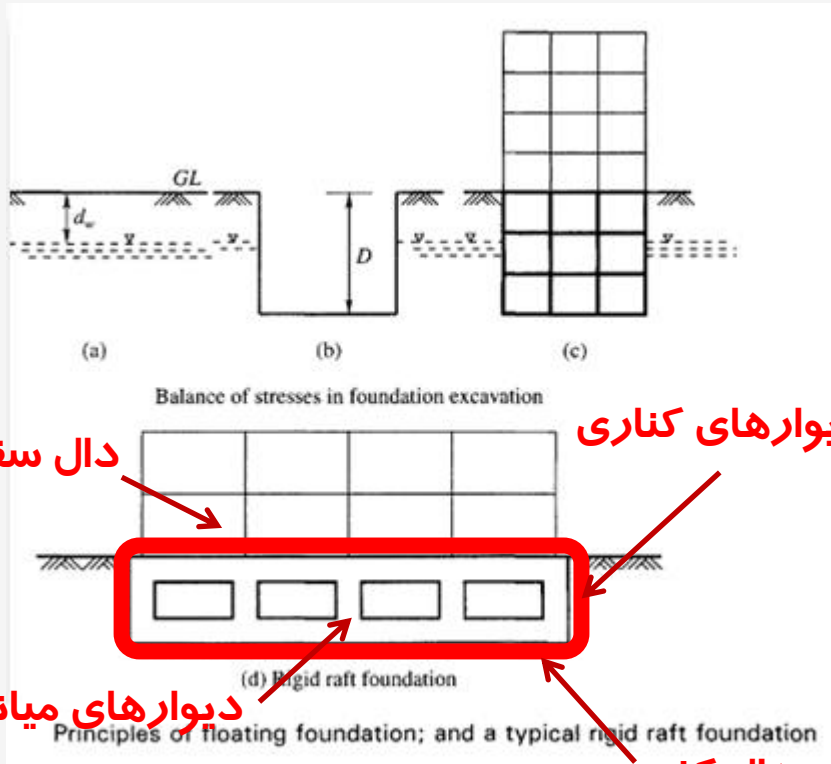
Multidisciplinary: Structural, Geotechnical and Constructional



# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

اجزای اصلی یک پروژه ساختمانی



سیستم فونداسیون

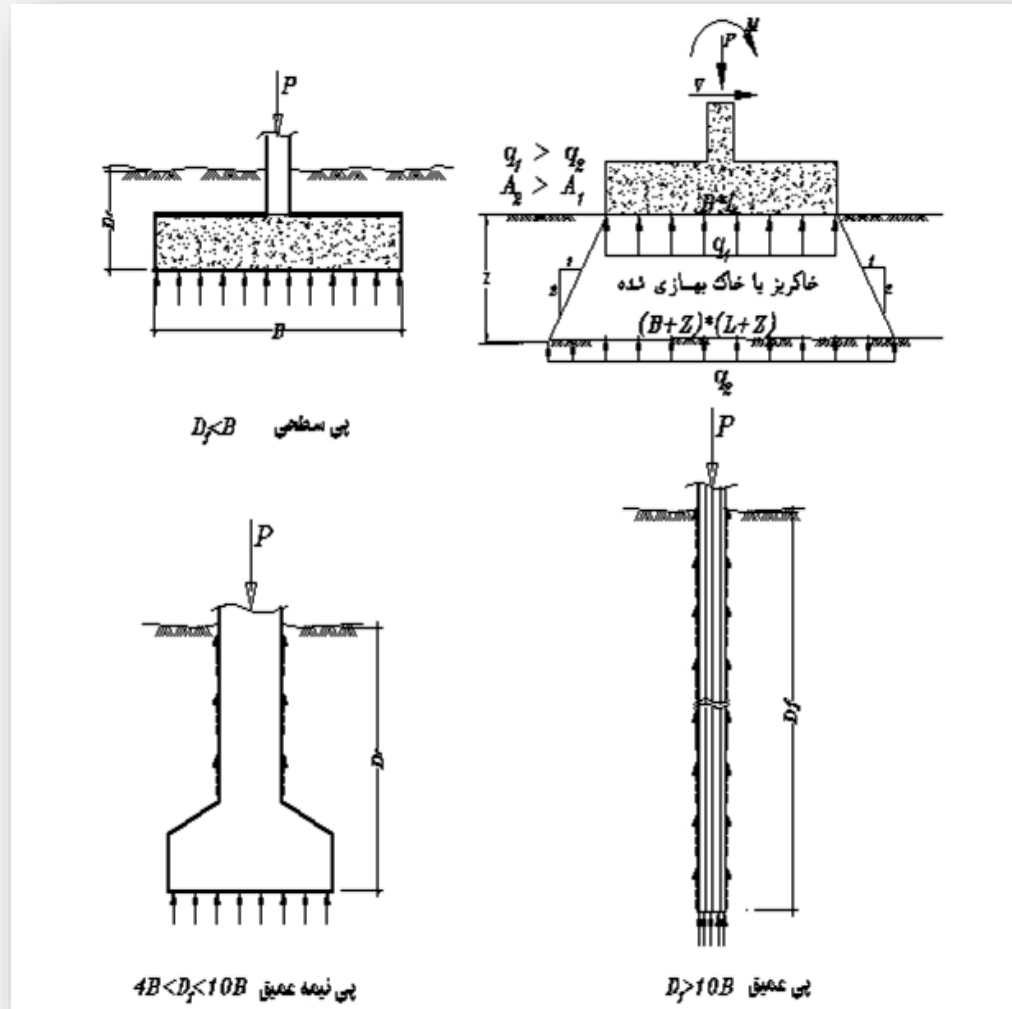
Foundation System or Footing?

پی رادیه

# 1. Introduction

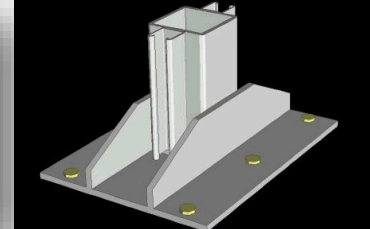
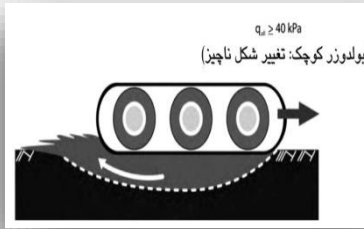
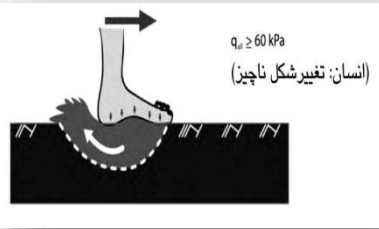
## ۱. مقدمه

سیستم های پی سازی  
بر مبنای اجرا

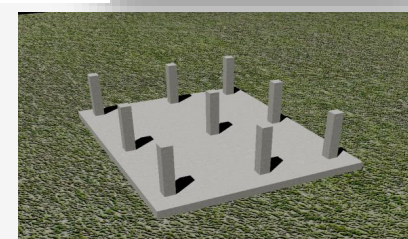
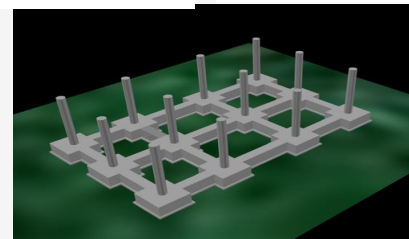
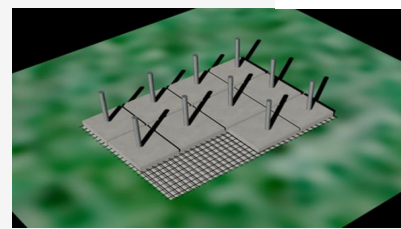
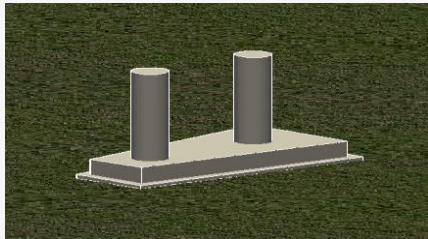
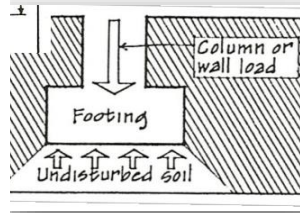
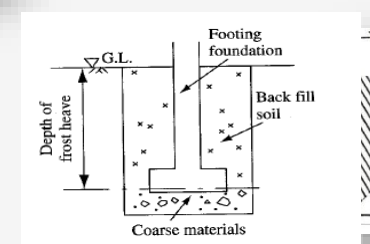
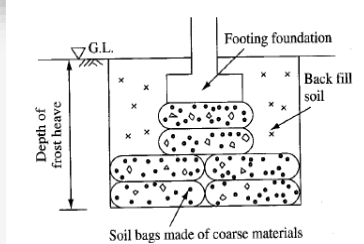
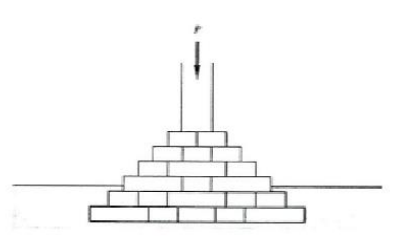
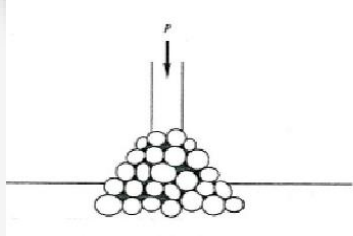


# 1. Introduction

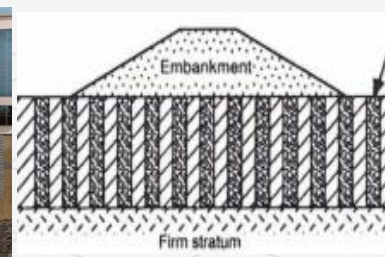
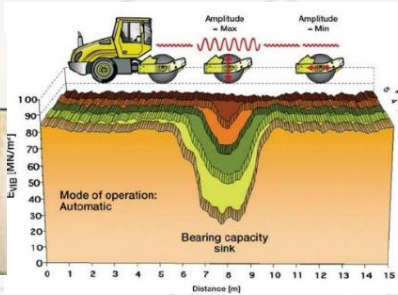
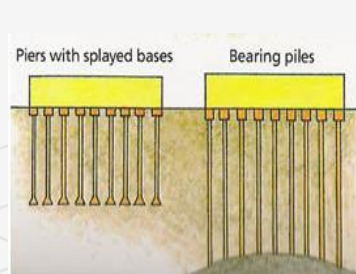
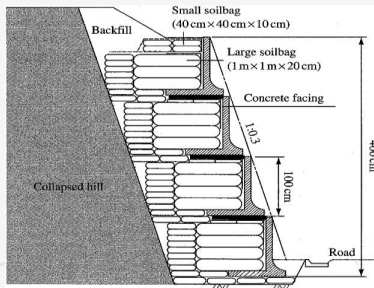
## ۱. مقدمه



**پی های متداول**



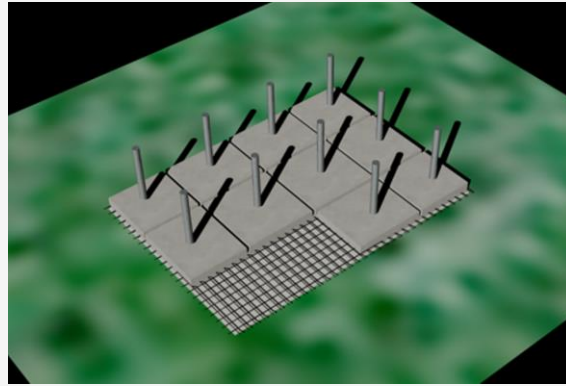
**پی عنصر انتقالی بین سازه و زمین**



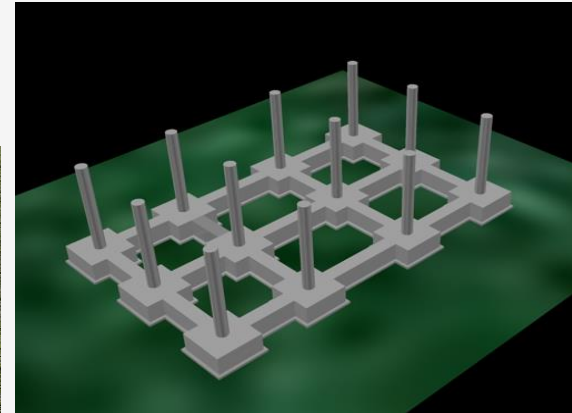
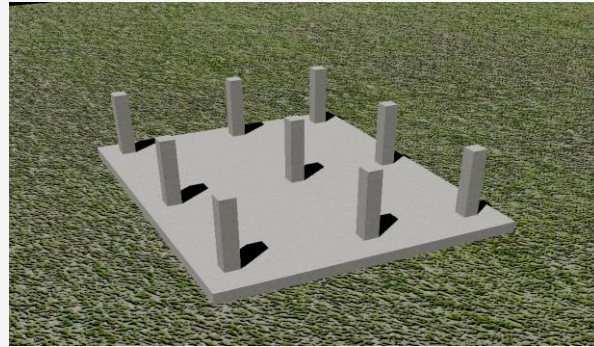


# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

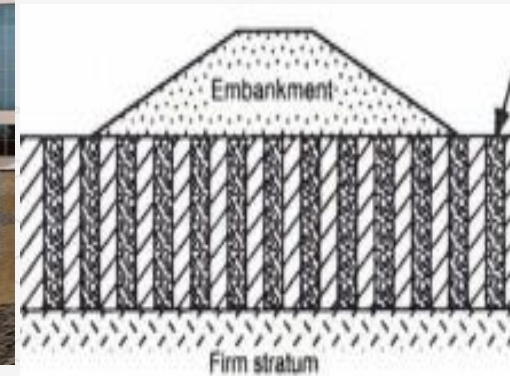
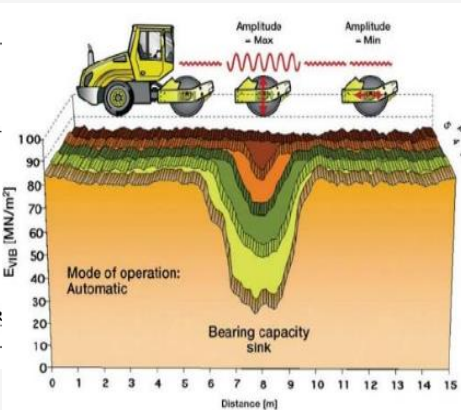
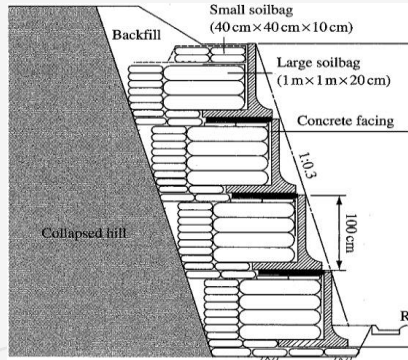


پی سطحی  
 $D/B < 1$



انواع  
فونداسیون ها:  
سطحی، سطحی  
+ بهسازی

سطحی + بهسازی

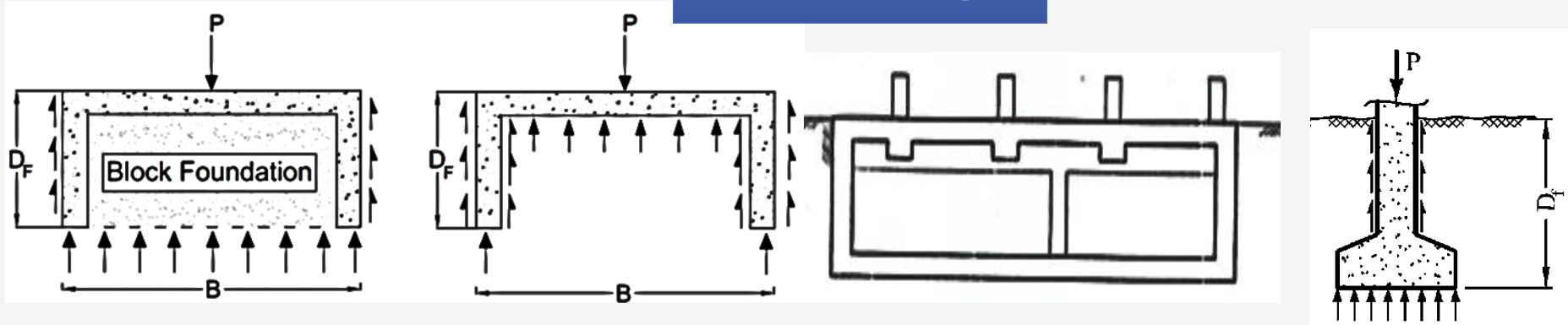




# 1. Introduction

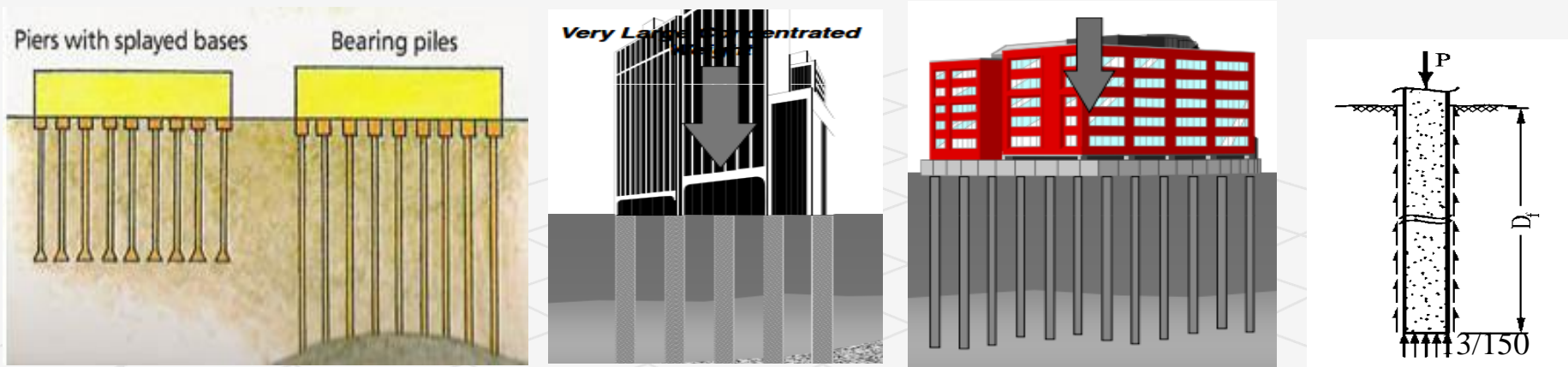
## ۱. مقدمه

پی نیمه عمیق



انواع فونداسیون ها: نیمه عمیق، عمیق

پی عمیق  $D/B > 10$

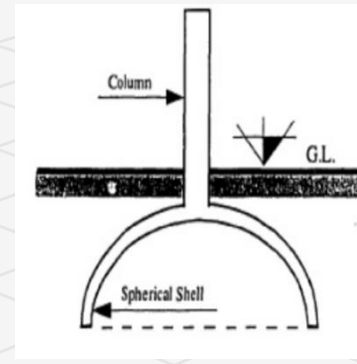
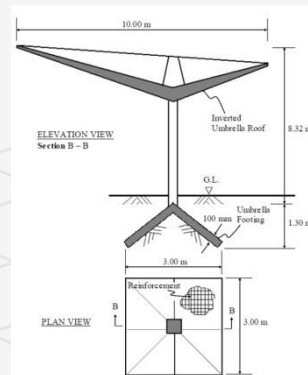
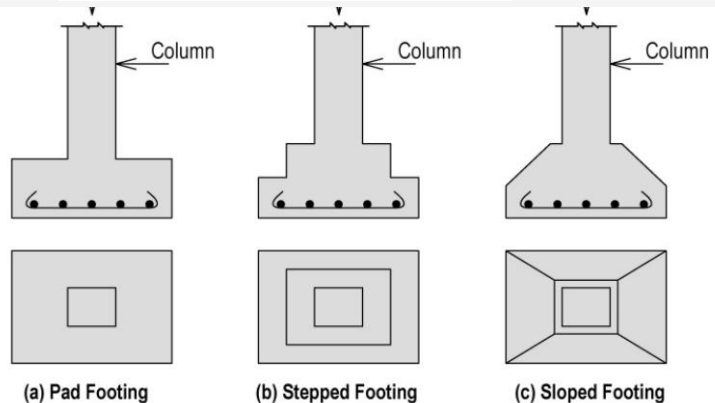
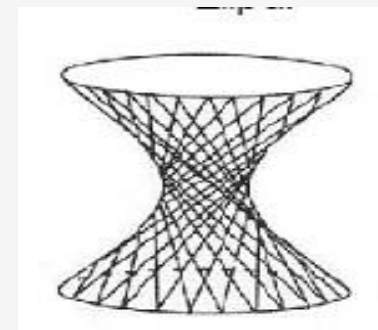
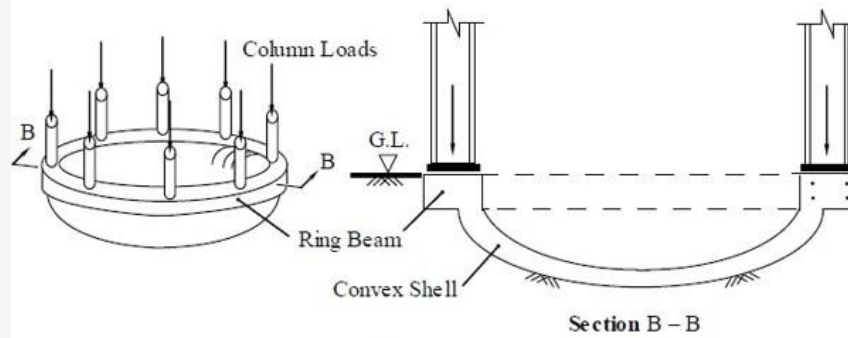
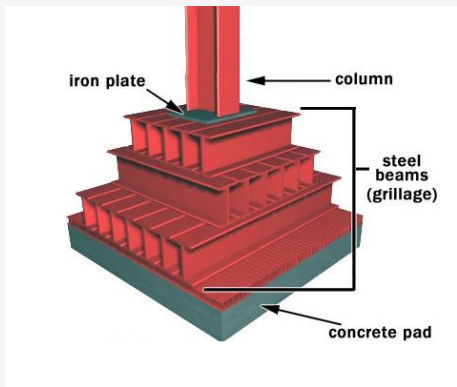


# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

**فونداسیون های غیر متعارف**

- Pad Foundation
- Grillage Foundation
- Root Foundation
- Shell Foundation
- Spherical Dome
- Ring Foundation
- Hyperbolic Foundation
- Stepped Foundation
- Attached Single Foundation
- Cantilever (Strap) Foundation
- Conical Foundation
- Isolated Foundation
- Sloped Foundation
- Jacking Foundation
- Drilled Displacement Pile



# 1. Introduction

## ۱. مقدمه



• قبل از ساخت روسازه (سازه‌های متداول)

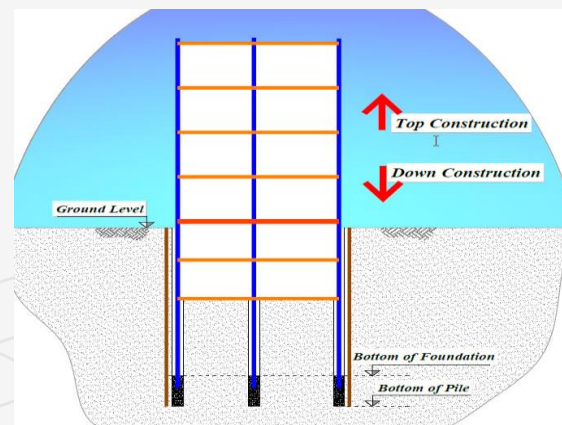
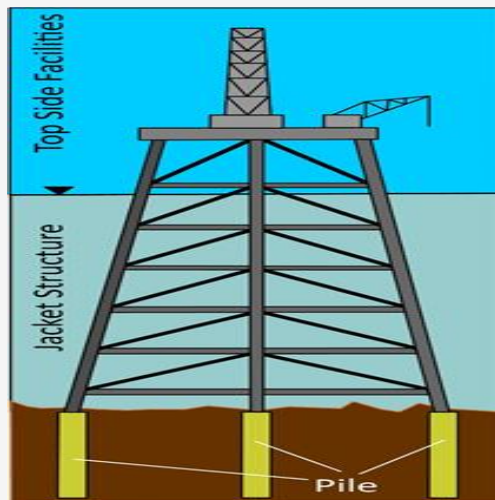
• پس از ساخت روسازه (ساخت سکوها در دریا)

• ساخت همزمان پی و روسازه (Top-Down Construction)

• نیاز حداقل به ساخت پی (اجرای سازه روی سنگ)

• تکمیل و ترمیم پی‌های موجود بر اساس ارتقا و تغییرات روسازه

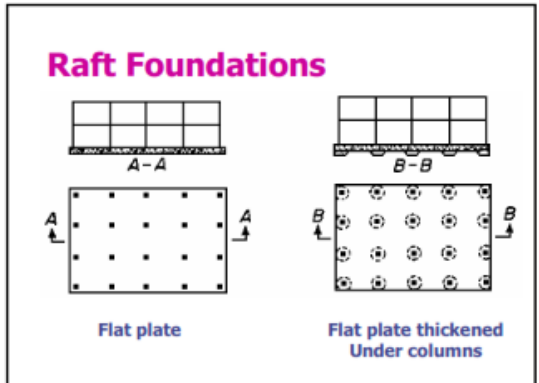
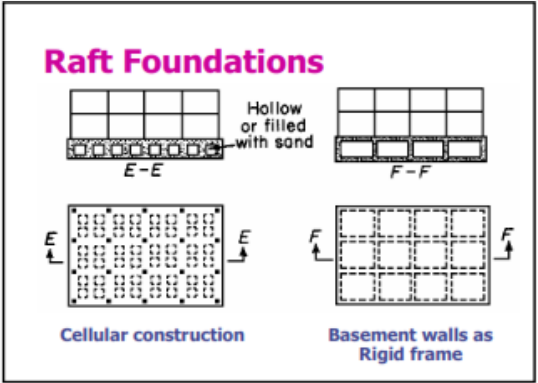
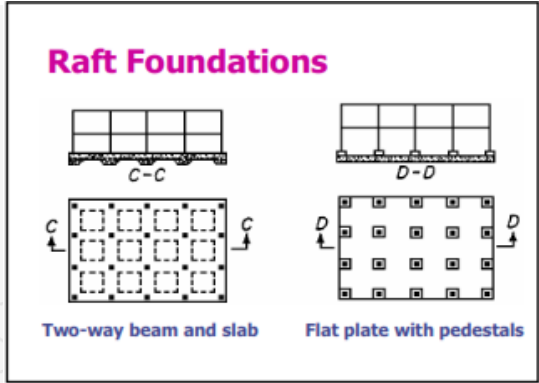
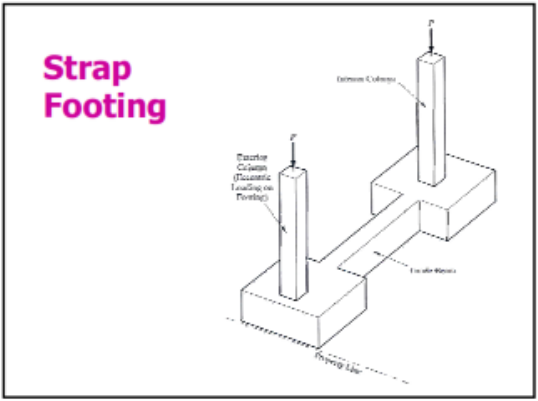
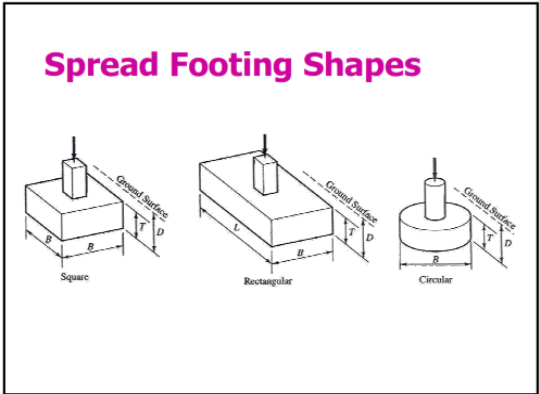
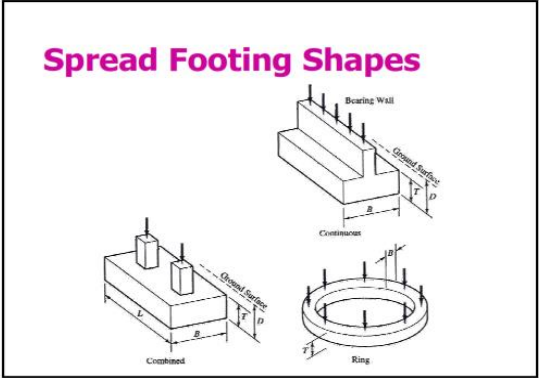
**زمان بندی  
اجرای پی‌ها**



# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

### پی های سطحی



- پی های منفرد
- پی های مرکب
- پی های پیوسته و نواری
- پی های شبکه ای
- پی های گسترده



## 1. Introduction

## ۱. مقدمه

**معضلات  
فونداسیون‌های  
سطحی و عمیق**

- ضعف ظرفیت باربری برای تحمل سازه‌های سنگین و بلند
- معضل نشست‌های کلی و غیریکنواخت
- ناپایداری در برابر بارهای جانبی، لنگرها و نیروهای برگشت
- ارائه حداقل اندرکنش با خاک بستر (عدم بسیج اصطکاک جداری و پدیده محصورشدگی)

## پی سطحی

- هزینه‌های نسبتاً بالای ساخت و اجرا
- مشکلات اجرایی و طولانی بودن زمان اجرا به ویژه برای شمع‌های درجا
- تحمیل نیروهای کشانه، اصطکاک منفی و ایجاد فاصله بین سازه و بستر
- ضریب اطمینان بالا و غیربهبوده در طراحی و بهره‌برداری

## پی عمیق

راه حل میانه: بهسازی، پی‌های نیمه‌عمیق

# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

### بهسازی خاک مکمل پی‌سازی

- بهسازی خاک، تکنیک‌ها و روش‌های مختلف جهت تغییر خصوصیات خاک، که منجر به افزایش مقاومت، کاهش تغییرات حجمی و تامین رفتار خاصی از خاک منجر

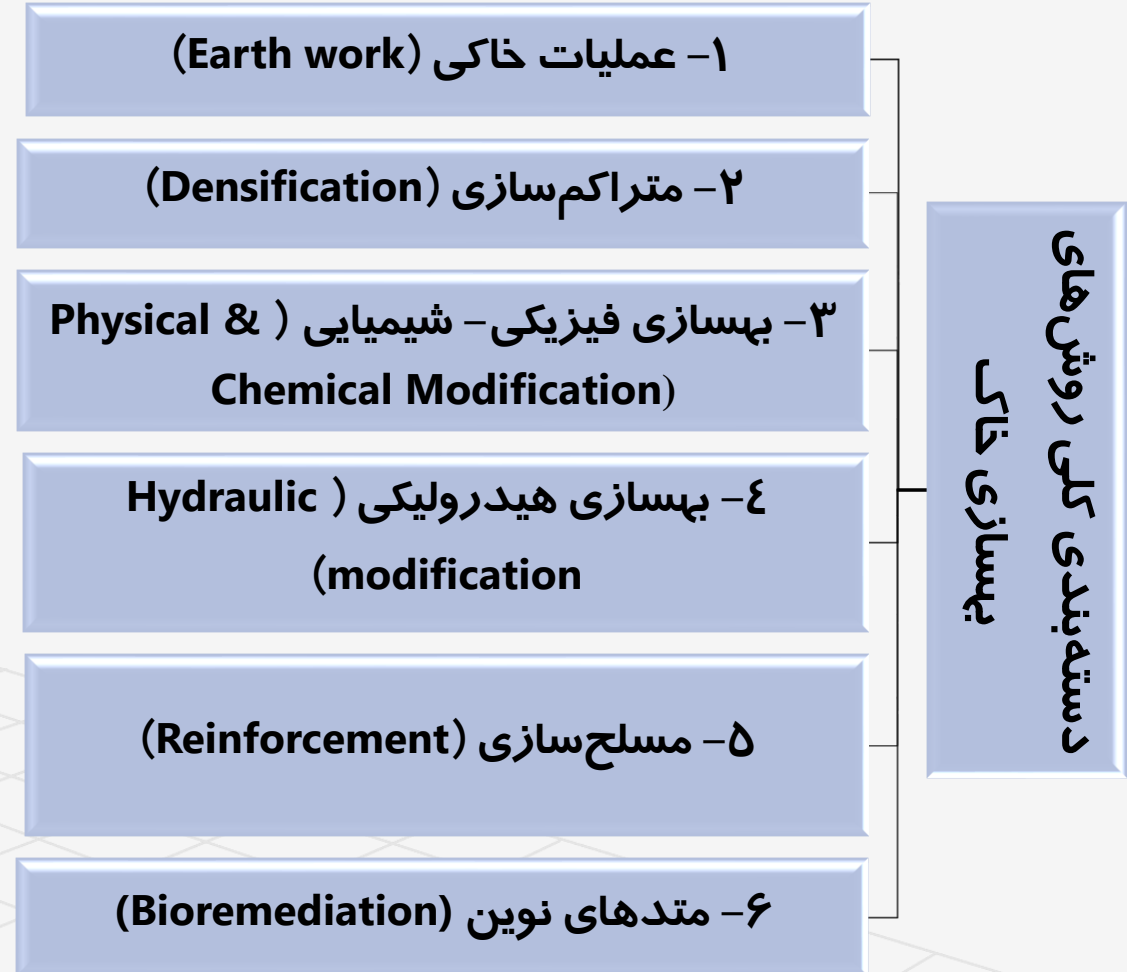
- اهداف بهسازی:
  - Increase strength
  - Decrease the potential of erosion
  - Decrease distortion under stress
  - Decrease compressibility
  - Control shrinking, swelling, and permeability
  - Decrease water pressures
  - Redirect seepage
  - Prevent the detrimental physical or chemical changes
  - Mitigate susceptibility to liquefaction

# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

General Soil Treatment Methods							
1	Sheet piling	11	Sump pumping	21	Surcharge fills	31	Soil nailing
2	Slurry trenches	12	Wellpoint systems	22	Pre-wetting	32	Cement-clay grouts
3	Diaphragm walls	13	Bored shallow wells	23	Hydrocompaction	33	Silicate grouts
4	Bored pile walls and secant piles	14	Deep-bored filtrate wells	24	Vibrocompaction	34	Resin grouts
5	Thin, grouted membranes	15	Jet eductor systems	25	Dynamic compaction	35	Compaction grouting
6	Freezing	16	Vacuum dewatering	26	Compaction piles	36	Jet grouting
7	Filter drains	17	Dynamic static or Rollers	27	Particulate grouting	37	Cement & lime stabilization
8	Drainage galleries	18	Electrical stabilization	28	Blasting	38	Mix-in-place piles
9	Sand and band drains	19	Preloading	29	Mechanical compaction	39	Heating
10	Lime columns	20	Vibro replacement stone columns	30	Reinforced earth	40	Remove and replace

### روش‌های بهسازی خاک

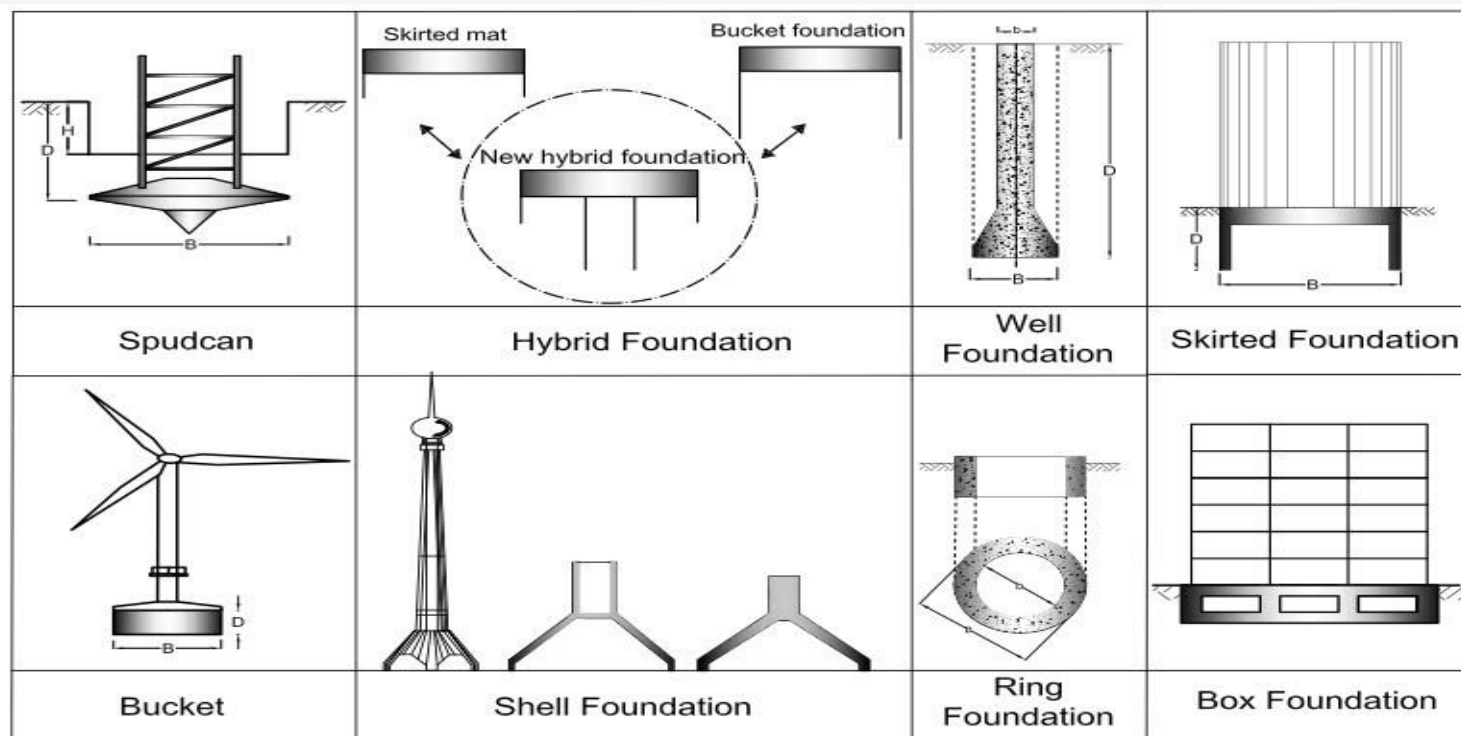


# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

انواع پی‌های  
نیمه عمیق

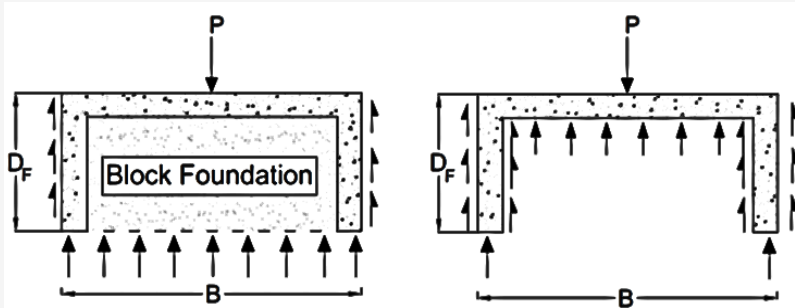
- Bucket Foundation or Suction Caisson
- Spudcan
- Hybrid Foundation
- Floating and Box Foundation
- Well Foundation
- Ring Foundation
- Shell Foundation
- Skirted Foundation





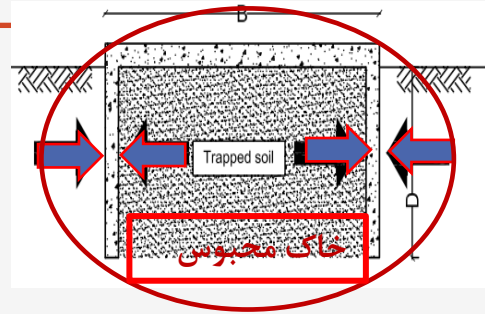
# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

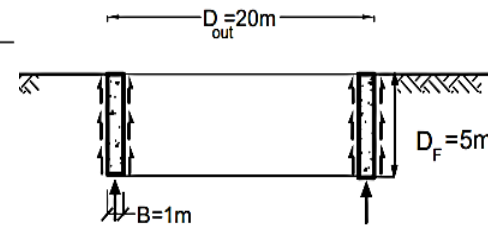


پی دامنه دار

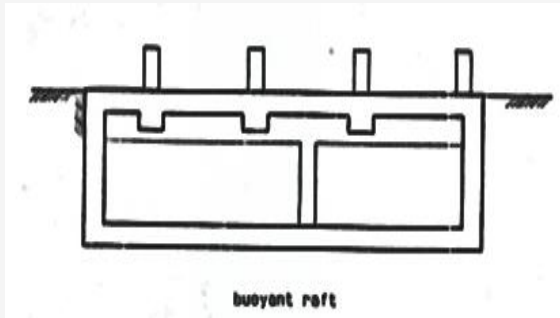
$$0.5 < D/B < 2$$



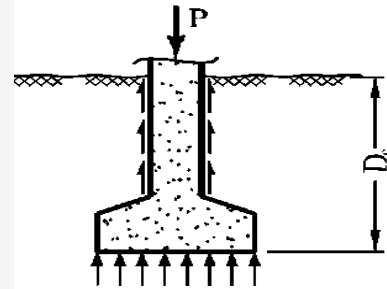
پی بلوکی



پی پوسته ای



پی شناور



پی چاهی  $3 < D/B < 6$

مقایسه عملکردی و هندسی پی های مختلف: پی های ترکیبی و نیمه عمیق

افزایش پایداری

محسورشده گی و بهبود باربری کاهش نشست

$0.5 < D/B < 4$  پی نیمه عمیق باربری کف و جدار

# 1. Introduction

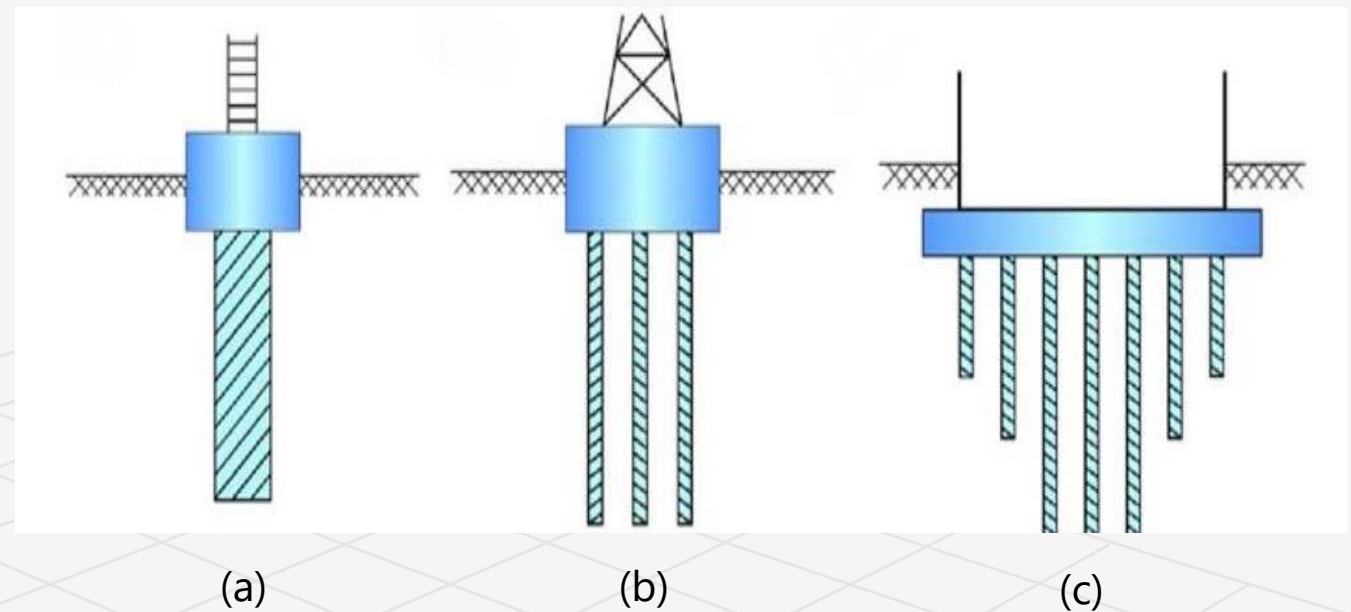
## ۱. مقدمه

### Deep foundations applications:

- Low bearing capacity or high compressibility of upper layers
- Differential settlement due to soil variability or non-uniform structural loads
- For Mitigating liquefaction risk
- High potential of scouring or undermining (especially in bridges)

پی‌های عمیق

Different applications of piles: a) single shaft or caisson, b) pile group, c) piled raft foundation (PRF)



# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

شمع‌های H شکل



شمع‌های لوله‌ای ته‌باز



**پی‌های عمیق**

شمع‌های لوله‌ای ته‌بسته



شمع‌های لوله‌ای ته‌بسته با غلاف نوک تیز انتهایی

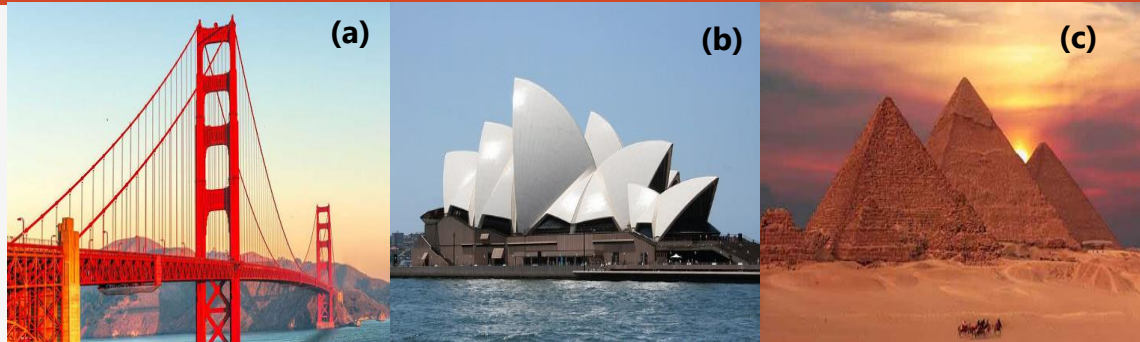


نمونه‌هایی از انواع پی‌های عمیق

# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

Eslami et al., 2022a



Examples of three primary type of structures based on the form a) the cables of the Golden gate bridge, (one-dimensional), b) the shell roof of the opera house of Sydney, (two-dimensional), c) ancient pyramids of Cairo (three-dimensional)

طبقه بندی پی ها  
بر اساس هندسه

۱- پی های خطی: انواع شمع های تک

1. Linear Foundations: Single Piles

۲- پی های صفحه ای : انواع پی های سطحی و پوسته ای

2. Planar Foundations: Shallow & Shell Foundations

۳- پی های حجمی: گروه شمع، رادیه مرکب و ...

3. Volumetric (Massive) Foundations: PRF & so on

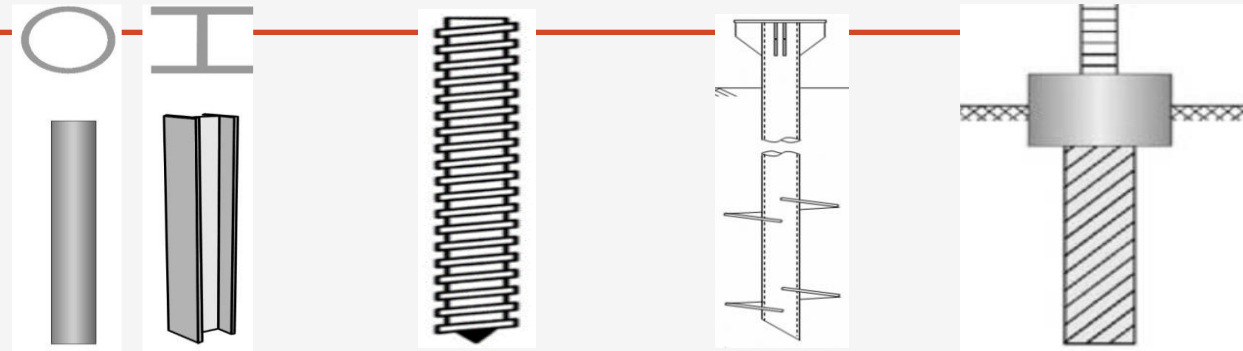
دسته بندی کلی پی ها بر  
اساس هندسه



# 1. Introduction

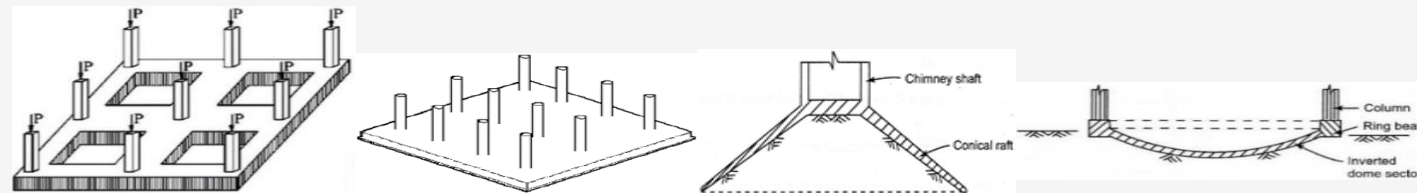
## ۱. مقدمه

Eslami et al., 2022a

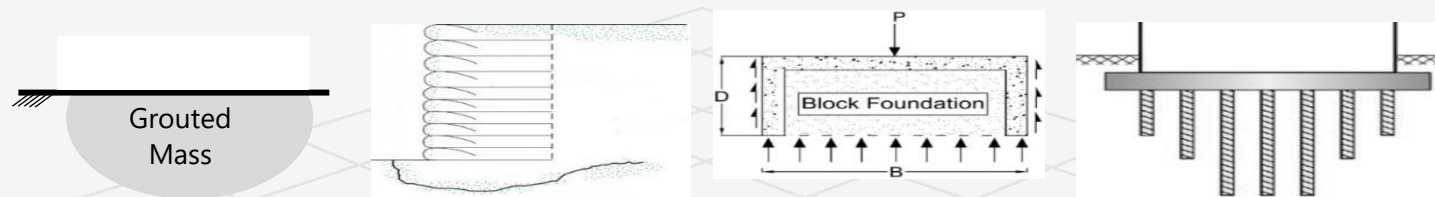


طبقه بندی پی ها  
بر اساس هندسه

(a)



(b)



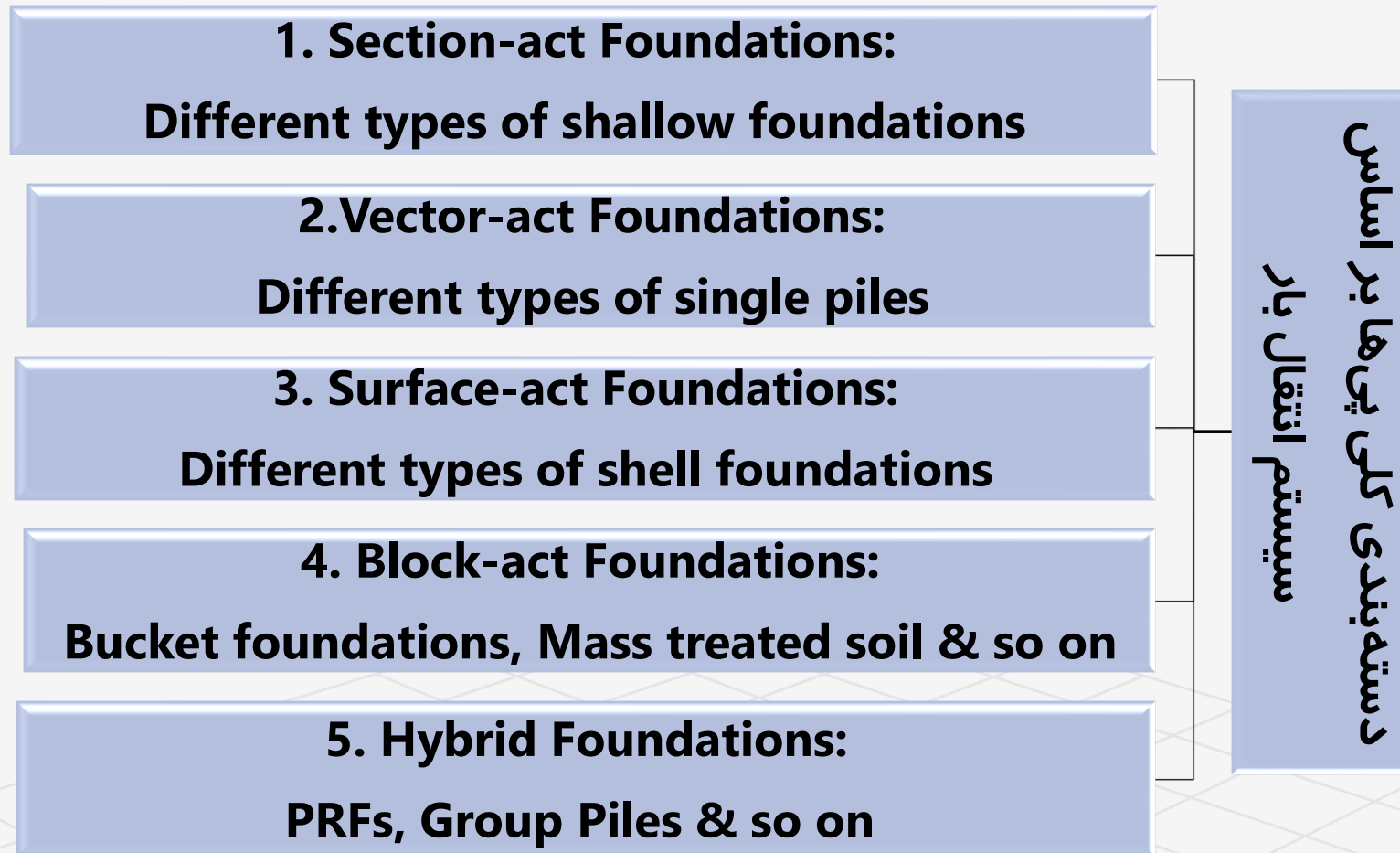
(c)

Examples of different foundations based on form: a) linear foundations, b) planar foundation, c) volumetric or massive foundation

# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

Eslami et al., 2022b

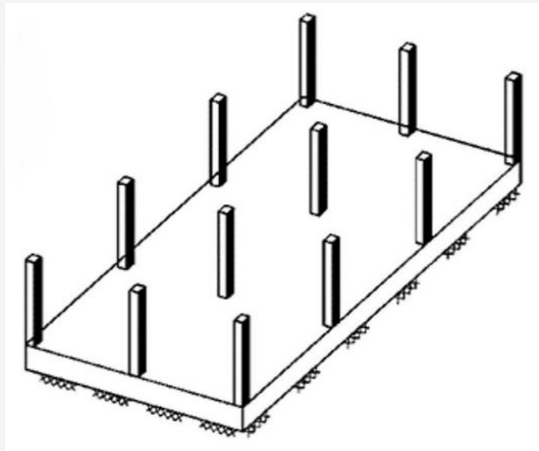


طبقه‌بندی پی‌ها  
بر اساس سیستم  
انتقال بار

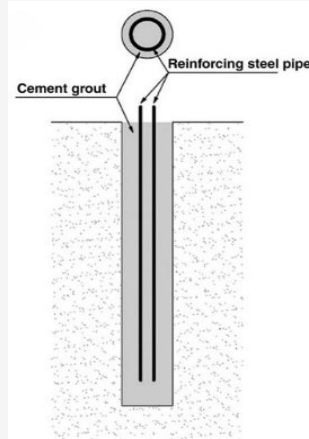
# 1. Introduction

## ۱. مقدمه

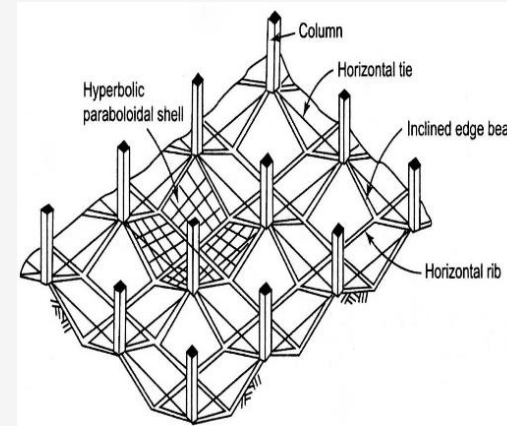
Eslami et al., 2022b



Section-act Foundation

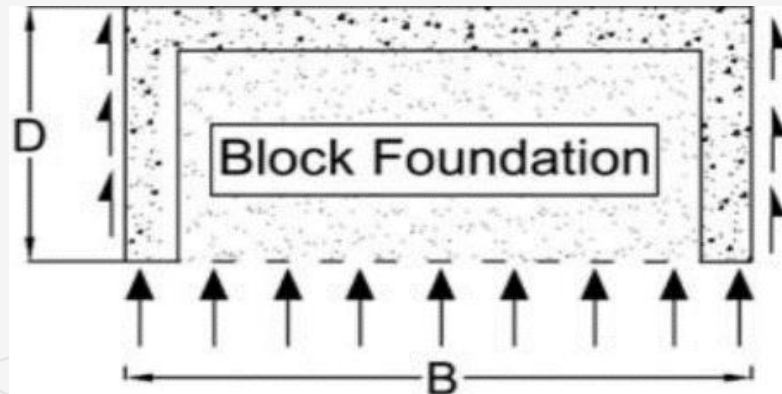


Vector-act Foundation

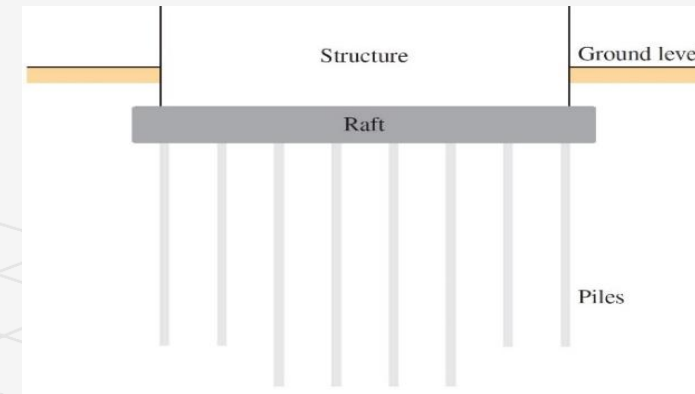


Surface-act Foundation

طبقه بندی پی ها  
بر اساس سیستم  
انتقال بار



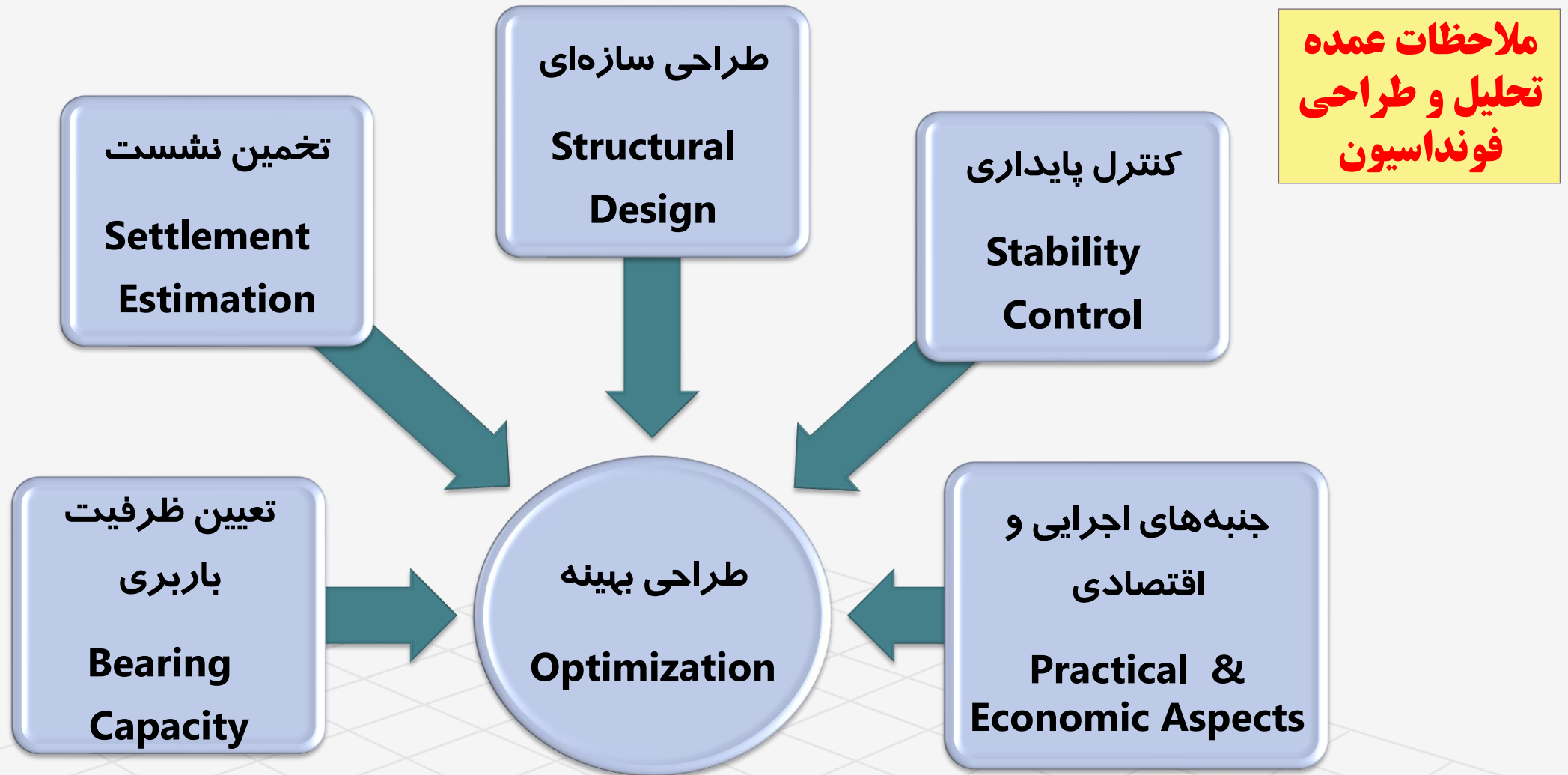
Block-act Foundation



Hybrid Foundation

### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه





### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

Following issues are realized in efficient foundation engineering practice including **technical**, **practical** and **economical** aspects; mainly focusing on **performance-based design**:

ملاحظات عمده  
تحلیل و طراحی  
فونداسیون

1. Bearing Capacity
2. Serviceability (Settlement and Torsion)
3. Structural Design
4. Stability Control
5. Full or Model Scale Testing
6. Constructional Aspects
7. Durability
8. Economic Requirements

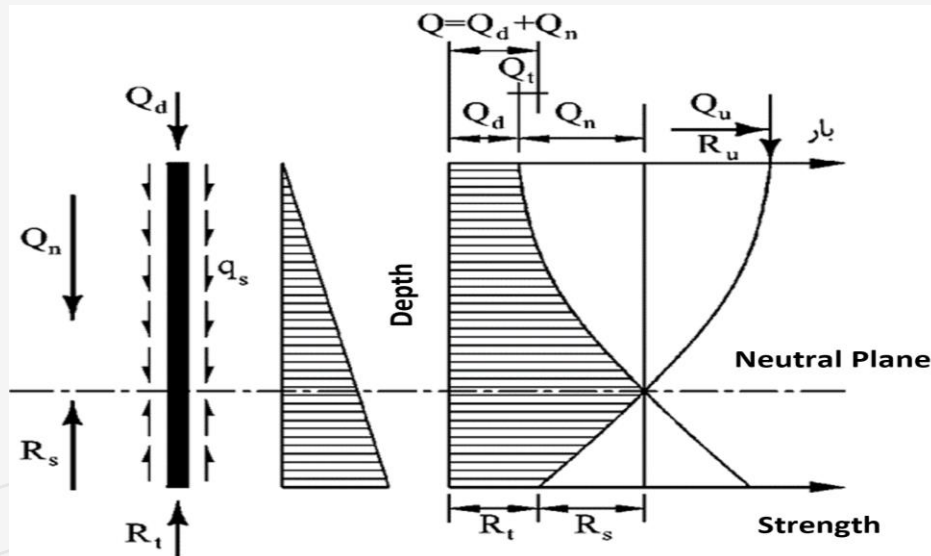
### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

#### *Fellenius (2015):*

The analysis and design of foundations are an iterative process since the amount of imposed loads, corresponding settlement, and foundation geometry are interactive, affected by **geotechnical capacity, structural capacity and settlement requirements**.

ملاحظات عمده  
تحلیل و طراحی  
فونداسیون



Basics of Unified Design (Fellenius, 1989)

## 3. Major Requirements

## ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

عوامل موثر  
در طراحی  
ژئوتکنیکی

### • شرایط خاک: پارامترهای مقاومتی و سختی

- نوع خاک
- شرایط تراکم

### • هندسه پی: عمق استقرار

- طول
- عرض
- ضخامت

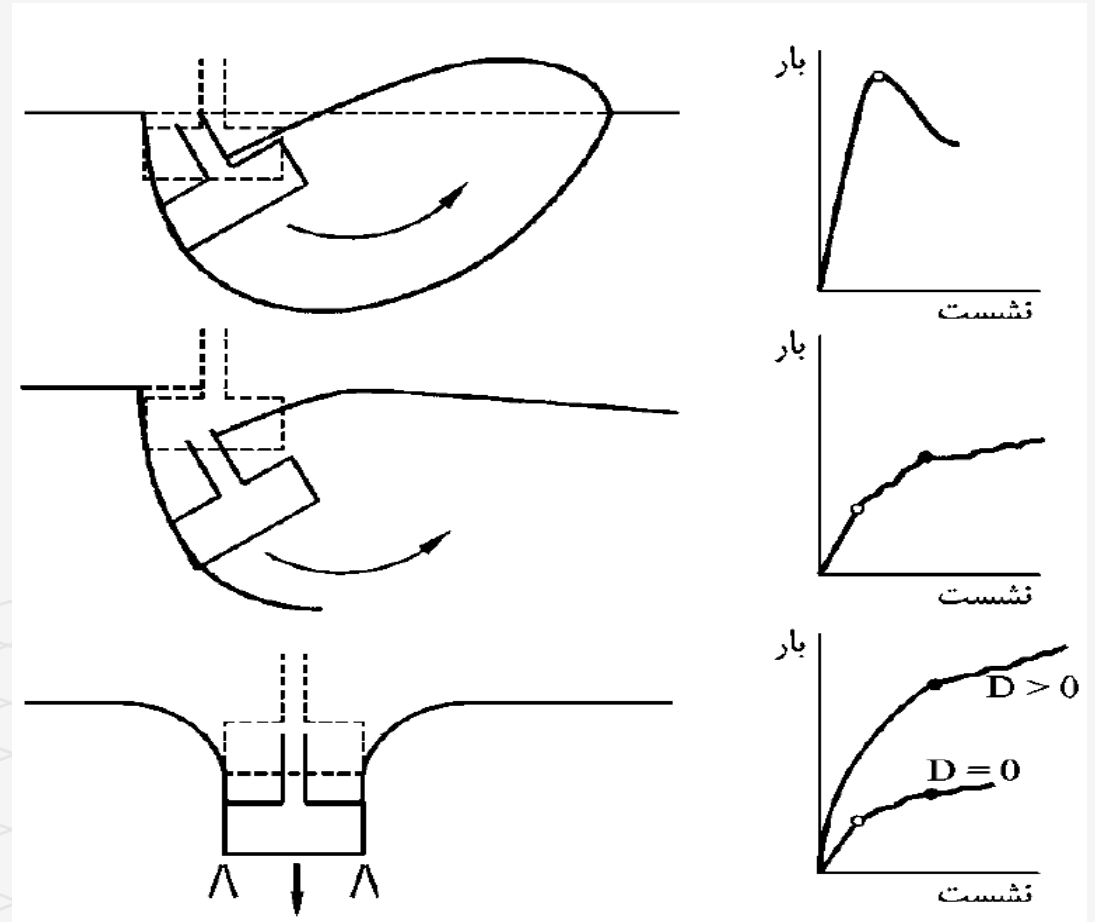
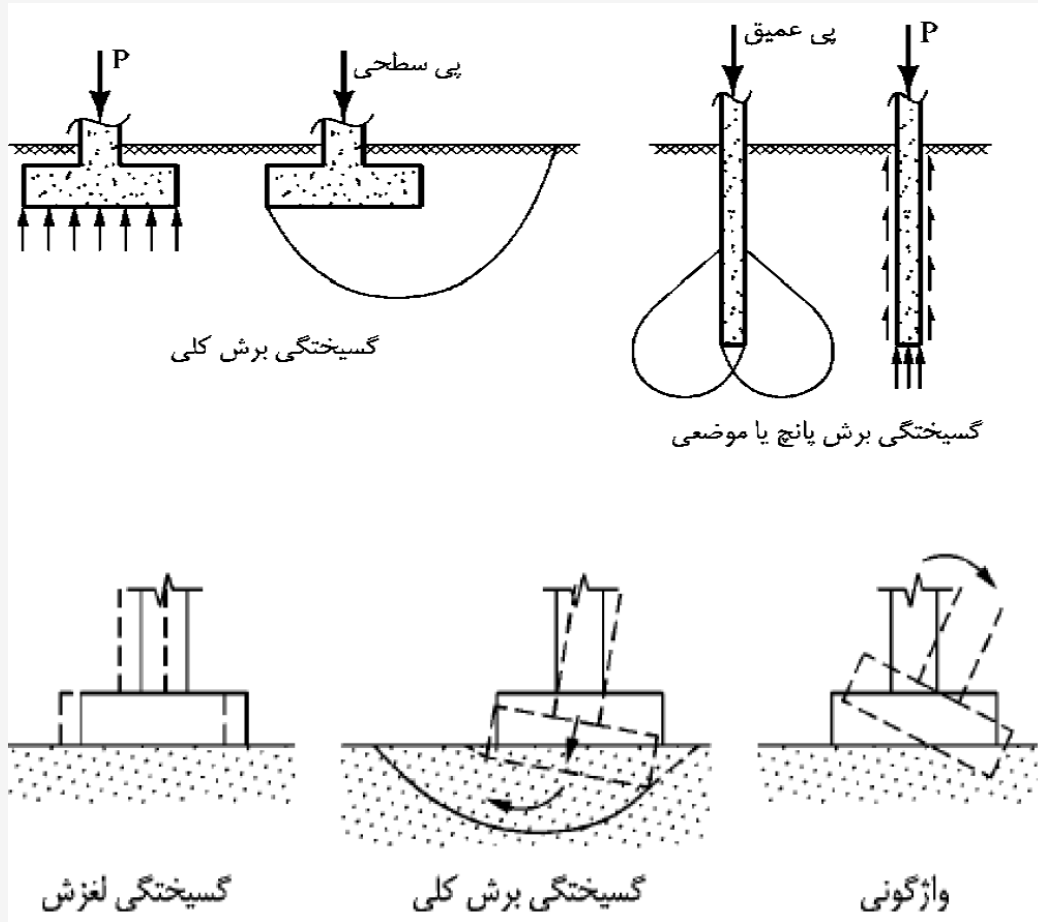
### • شرایط محیطی: محصورشدگی

- آب زیرزمینی
- بارگذاری
- هندسه زمین

### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

#### مکانیزم‌های گسیختگی





### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

Terzaghi (1943)

رابطه پایه ظرفیت باربری پی‌های سطحی

$$q_{ult} = CN_c + \bar{q}N_q + 0.5\gamma BN_\gamma$$

$C$  = cohesion parameter

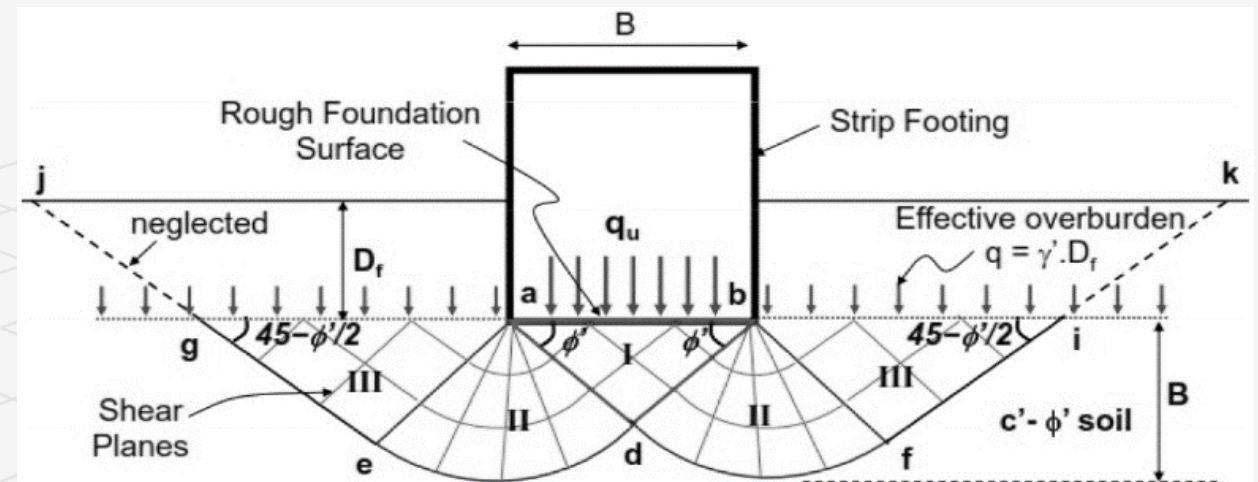
$\bar{q}$  = surcharge around the foundation equals to  $\gamma D_f$

$\gamma$  = average effective unit weight of the soil below and around the foundation

$B$  = foundation width

$D_f$  = embedment depth of the foundation

$N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$  = non-dimensional factors



## 3. Major Requirements

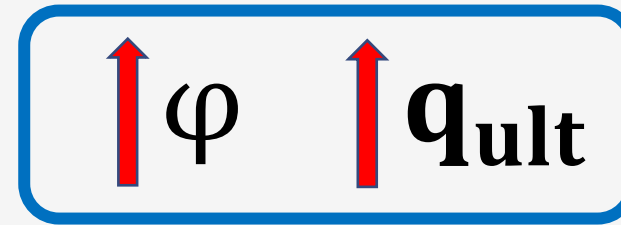
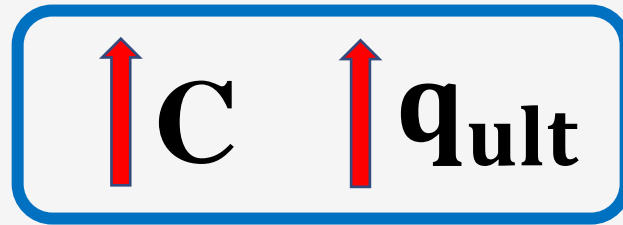
## ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

- پارامترهای مقاومت برشی خاک اطراف و زیر پی

چسبندگی (C)

زاویه اصطکاک داخلی ( $\varphi$ )

فاکتورهای  
مهم در ظرفیت  
باربری



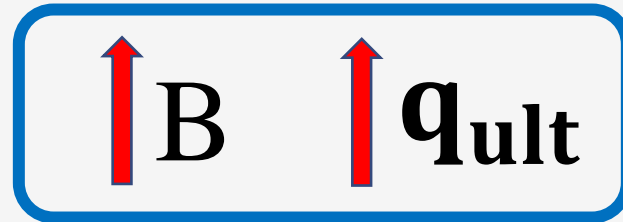
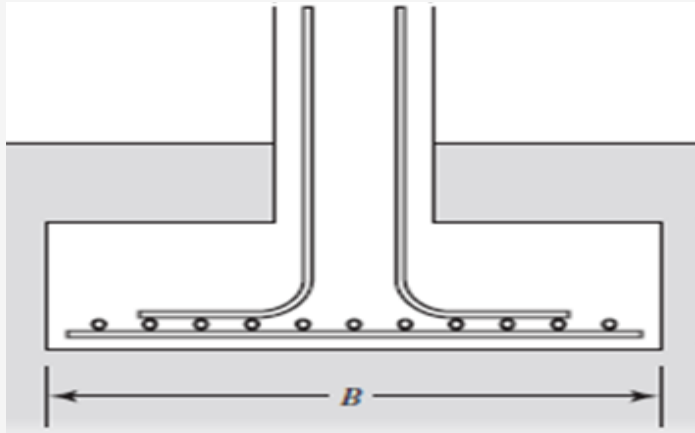
- سطح آب زیرزمینی

کاهش وزن مخصوص موثر لایه‌های خاک به علت بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و اثر مستقیم بر کاهش ظرفیت باربری

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w$$

### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه



- هندسه پی  
بعد پی (B)

فاکتورهای مهم  
در ظرفیت  
باربری

- بارگذاری :

وجود بارهای ترکیبی شامل نیروی محوری و لنگر  
بارهای مایل



### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه



**فاکتورهای مهم  
در ظرفیت  
باربری**

#### • وقوع آب‌شستگی

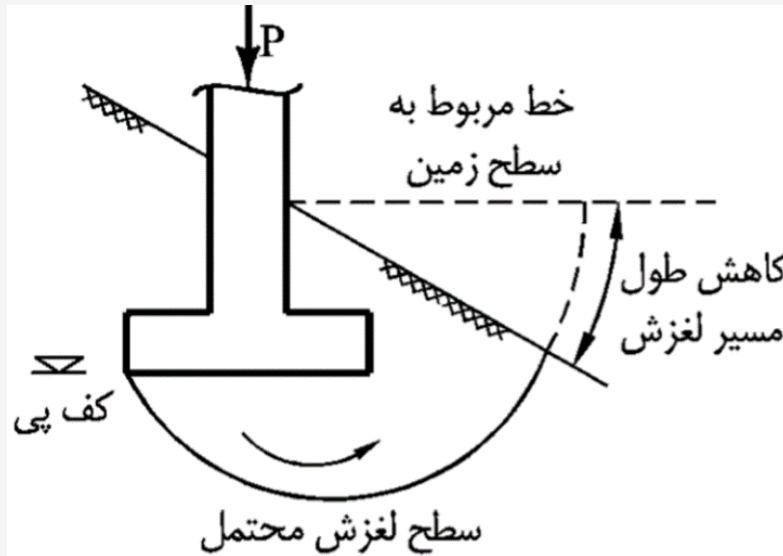
از بین رفتن عمق مدفون پی در اثر وقوع آب‌شستگی و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری

شسته شدن خاک زیر پی و از دست دادن اصطکاک کف و در نتیجه کاهش پایداری پی در برابر لغزش



### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه



• وضعیت شیب زمین

شیب‌دار بودن زمین  
گودبرداری

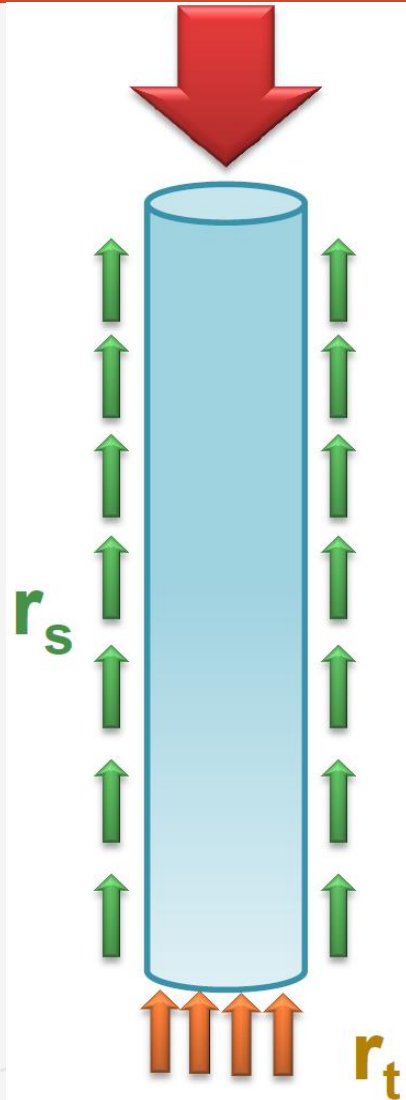
فاکتورهای  
مهم در ظرفیت  
باربری

کاهش طول مسیر لغزش  $\downarrow$   $q_{ult}$

### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

#### ظرفیت باربری پی عمیق



- مشخصات خاک
- عمق استقرار
- مشخصات شمع

$$R_t = r_t \cdot A_t$$

$$R_s = r_s \cdot A_s \cdot D_f$$

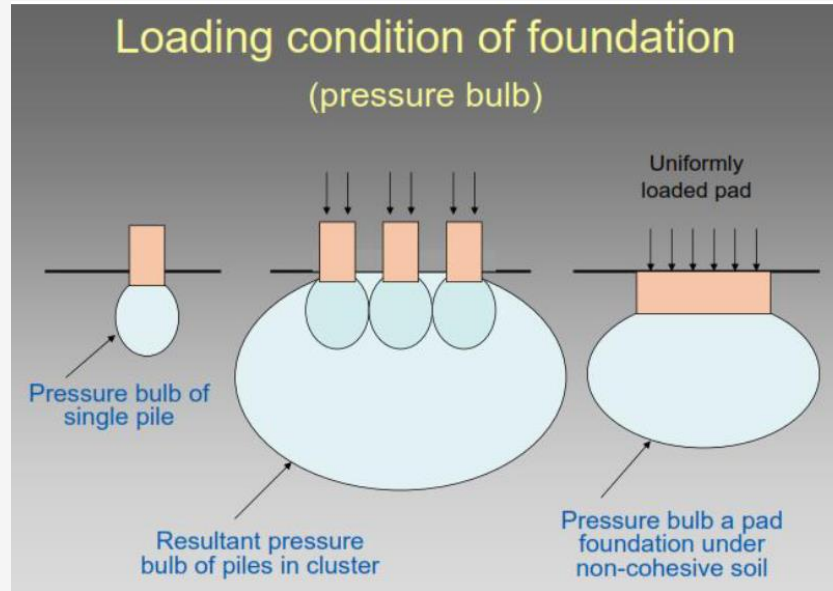
$$R_u = R_t + R_s$$

$$P_a = \frac{R_u}{FS}$$

- $r_t$  مقاومت واحد (تنش) در کف
- $r_s$  مقاومت واحد (تنش) در جدار شمع
- $R_t$  توان باربری نهایی کف
- $R_s$  توان باربری نهایی جداری
- $A_t$  سطح مقطع کف شمع
- $A_s$  سطح جانبی شمع در طول ۱ متر
- $D_f$  عمق استقرار شمع در زمین
- $R_u$  مقاومت نهایی و یا توان باربری شمع
- $P_a$  بار مجاز محوری قابل تحمل توسط شمع

### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه



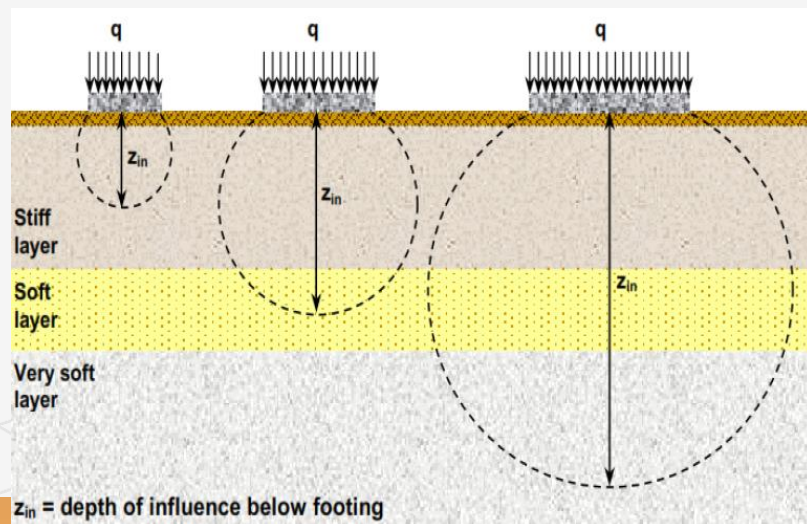
نشست پی‌های  
سطحی

• همجواری سازی

• نشست‌های القایی

• گودبرداری در مجاورت پروژه

• بارهای سیکنی و دینامیکی



### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

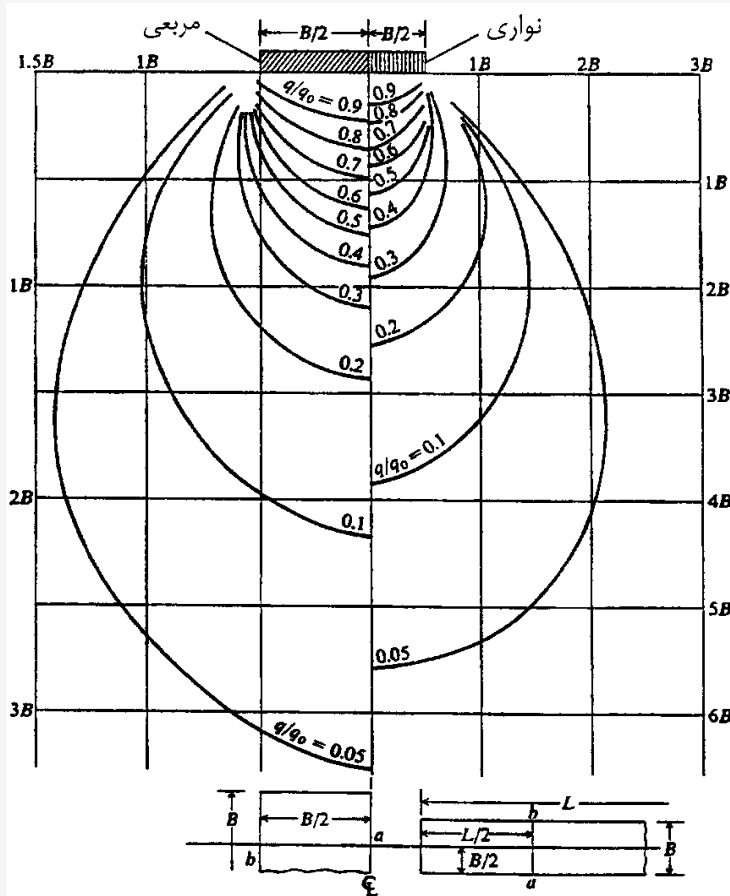
**فاکتورهای مهم در  
تعیین و ارزیابی نشست**

- بارگذاری
- تنش‌های القایی
- باربرداری
- بار دینامیکی
- آب زیرزمینی
- شرایط اندرکنشی با سازه‌های مجاور
- فرونشست منطقه
- مشخصات و سختی خاک
- تحکیم لایه‌ها
- مشخصات پی



### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه



نقاط هم‌تنش در عمق و در زیر پی‌های  
مربعی و نواری بر اساس روابط بوسینسک

- عرض پی (B) ↑
- پارامتر سختی و مشخصات تراکم‌پذیری (E) ↓
- شدت بار (q) ↑

$$S = K \frac{qB}{E_s}$$

q : تنش خالص وارد بر خاک زیر پی

B : بعد پی

K : ضریب شکل و صلیبیت پی (0.1 - 0.4)

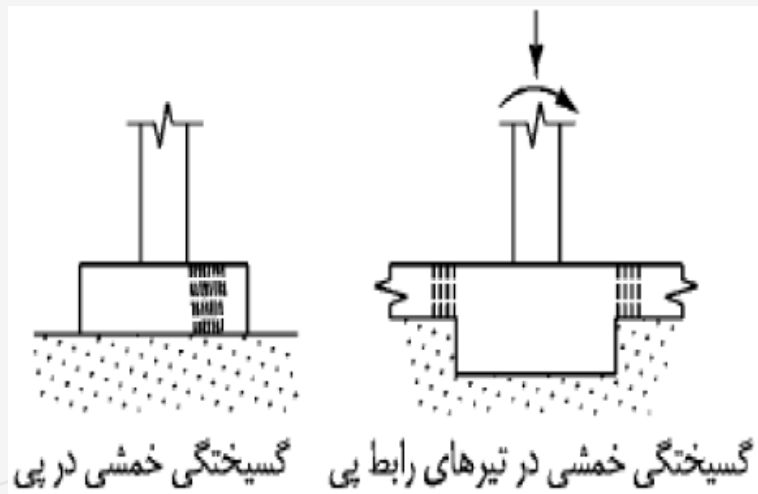
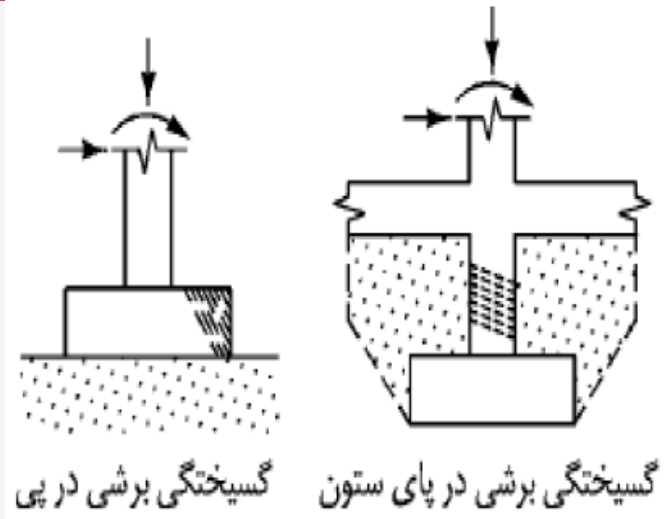
$E_s$  : مدول خاک

S : مقدار نشست

**پارامترهای  
موثر در  
نشست آبی و  
تحکیمی**

### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه



#### طراحی سازه‌ای

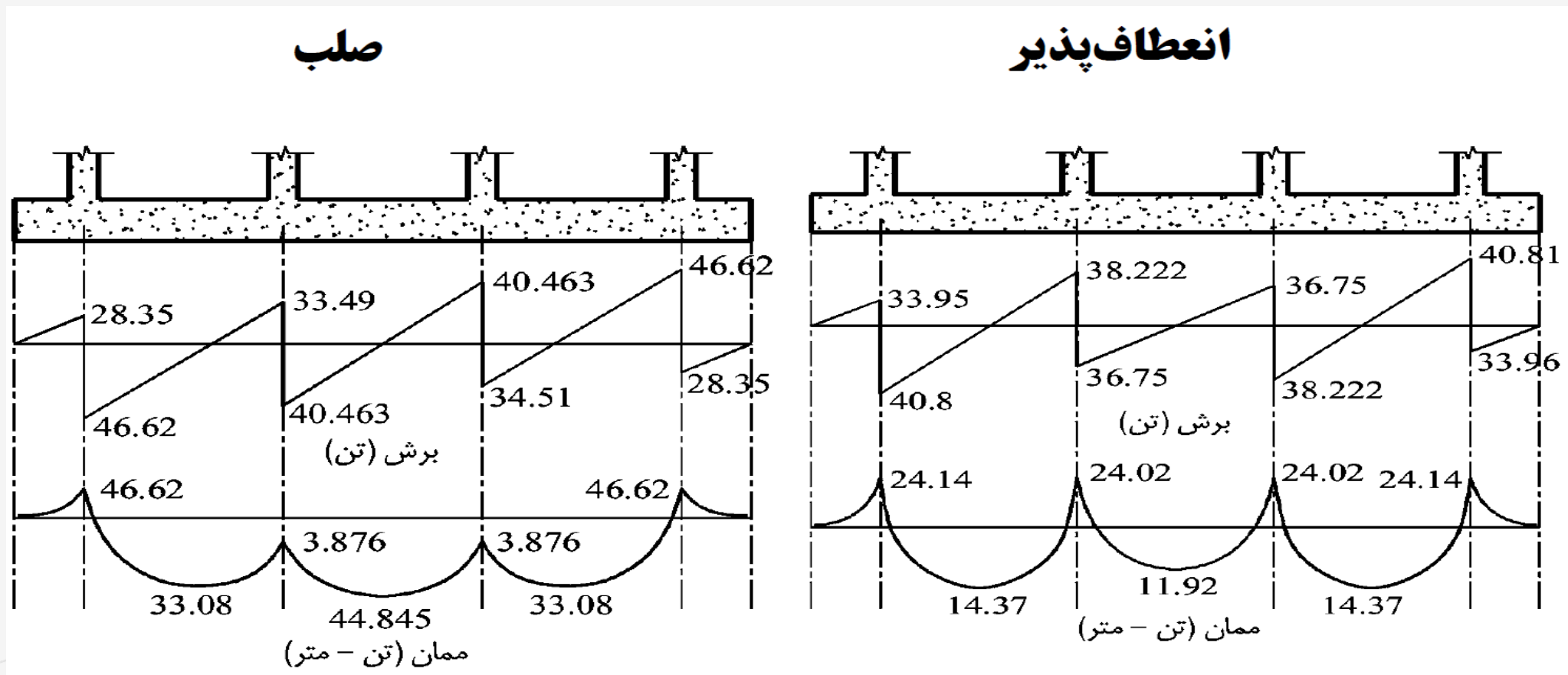
- تعیین نیروهای داخلی
- خرابی‌های خمشی، برشی و لهیدگی
- عوامل موثر بر صلبیت و انعطاف‌پذیری

- مدول عکس‌العمل بستر
- مدول الاستیسیته خاک
- ضخامت پی
- مدول الاستیسیته بتن
- اختلاف بار ستون‌ها
- اثر روسازه
- ممان اینرسی پی

### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

**آنالیز پی نواری با فرض  
حالت‌های صلب و انعطاف‌پذیر**

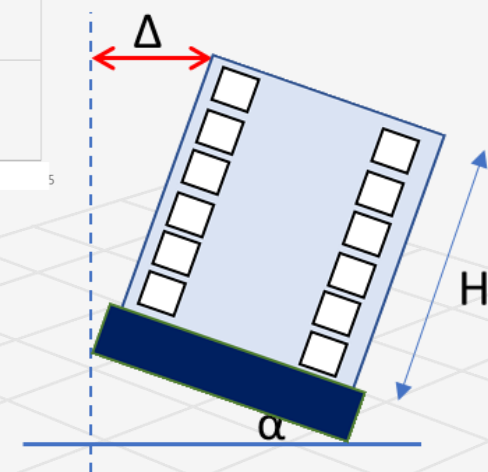
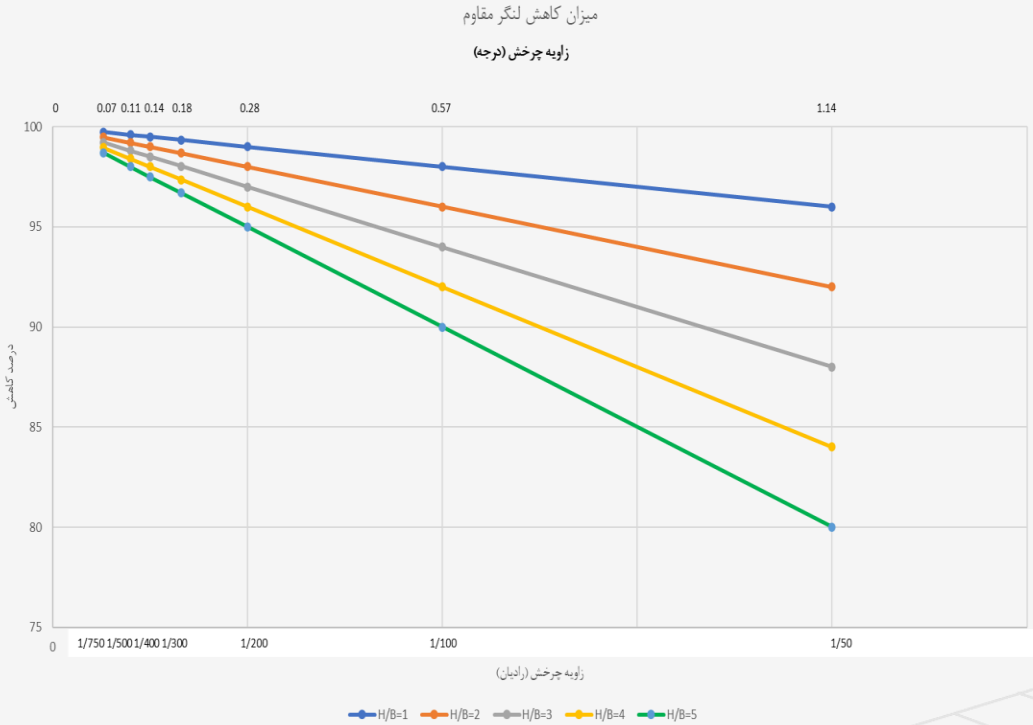
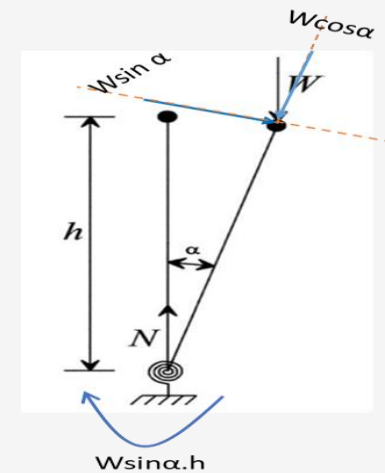


### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

**فاکتورهای مهم در ارزیابی پایداری**

- بار جانبی
- ارتفاع سازه
- ترکیب بار جانبی، برکنش و لنگر
- عمق استقرار پی
- ارتباط پی با سازه
- ملاحظات زمین لغزش
- شرایط غیرمنتظره



درصد کاهش لنگر مقاوم در اثر چرخش پی

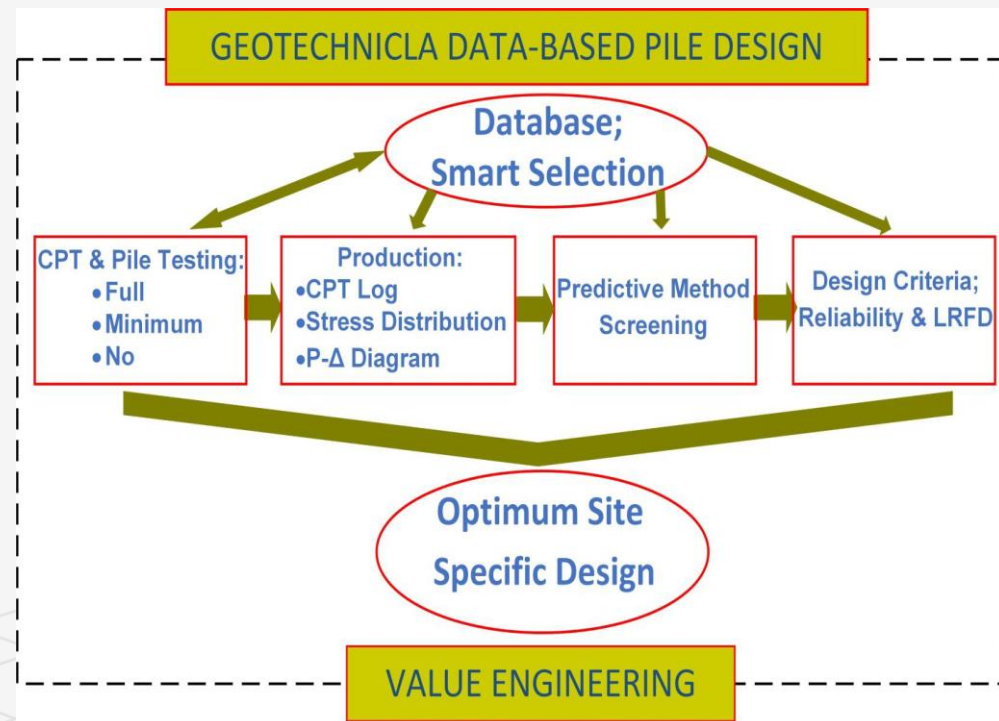
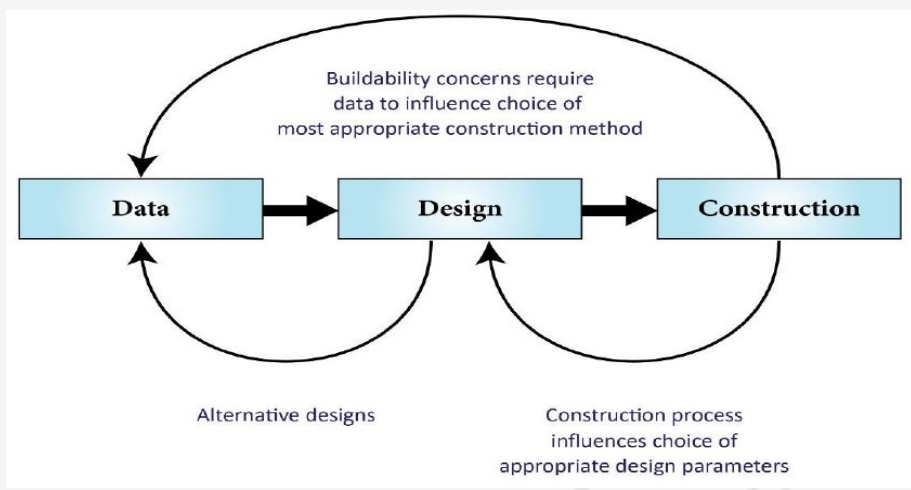
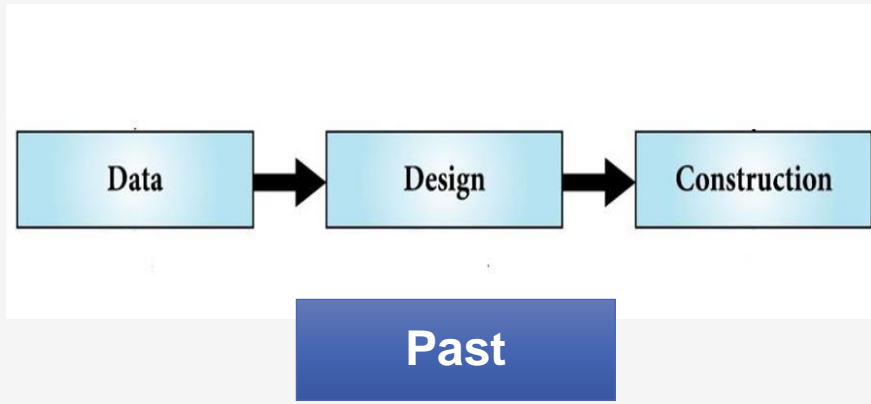
جابه‌جایی افقی سازه

مدل‌سازی چرخش برج پیزا با آونگ معکوس

### 3. Major Requirements

### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

روند طراحی،  
اجرا و عملکرد



Present: Design and Construction Cycle of Geotechnical Engineering (Burland, 2012)

Prospect: Database Smart Selection (Eslami & Heidarie, 2019)



### 3. Major Requirements

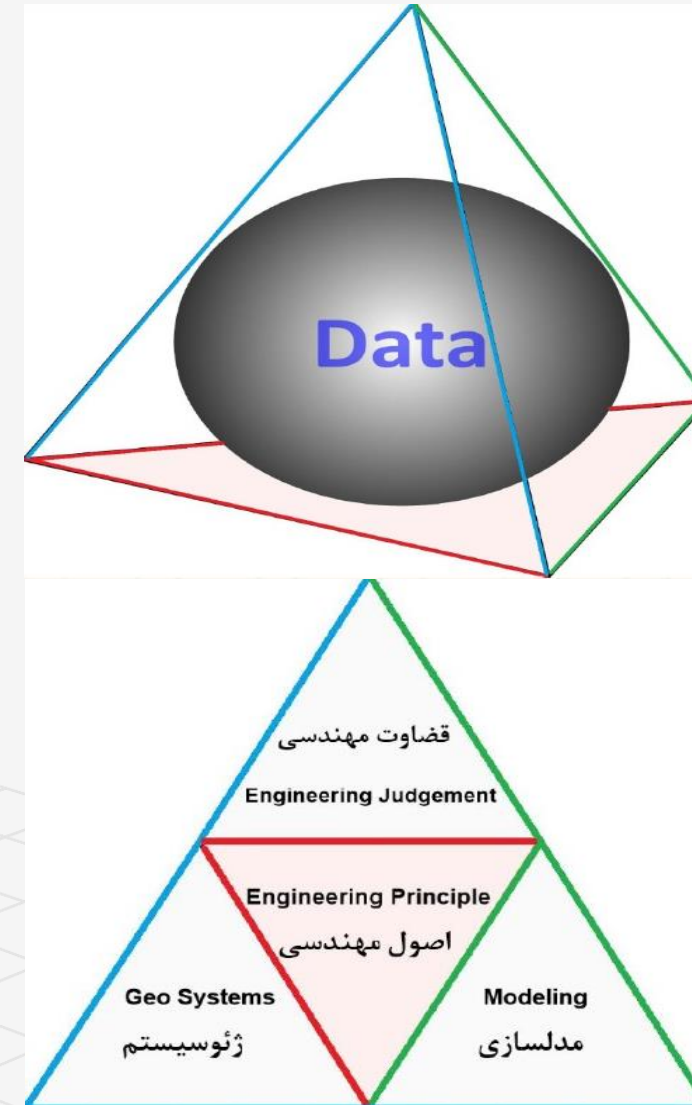
### ۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

Salgado (2008):

Foundation engineering tools are:

- Soil & Rock Mechanics: The Underlying Sciences
- Codes & Standards
- Experience & Empiricism
- Publications: Where to Go for Help
- Conferences & Short Courses
- Computers

Geotechnical Engineering Pyramid (Eslami, 2019)



هرم مهندسی  
ژئوتکنیک

## 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون

**عوامل موثر در انتخاب سیستم فونداسیون**

**عوامل موثر در انتخاب سیستم فونداسیون**



## 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون

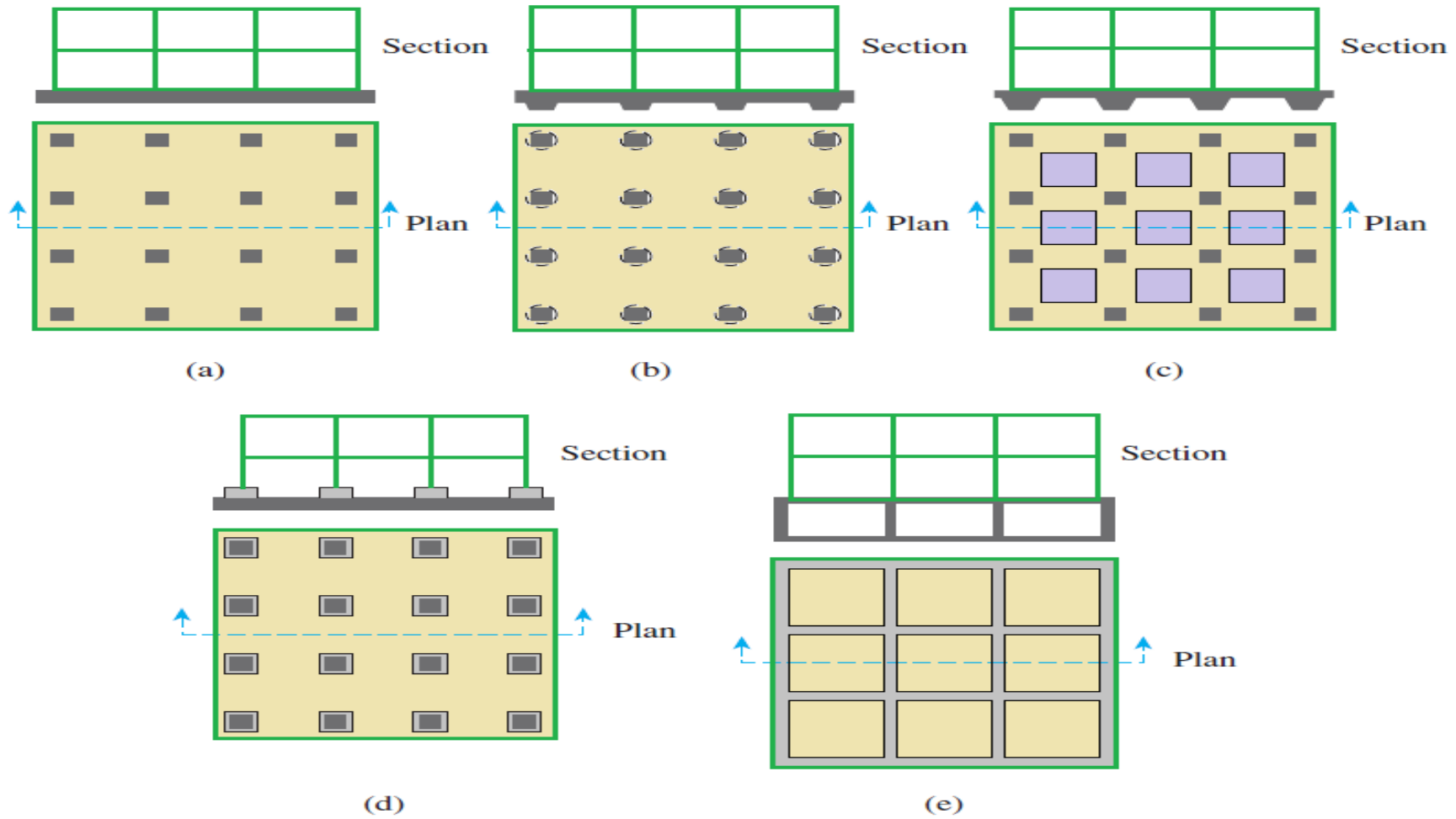
### انواع فونداسیون برای ساختمان‌های بلند

### انواع پی برای ساختمان‌های بلند

بهسازی انبوهی	پی‌های گسترده ( Mat Foundations )
بهسازی ستونی	پی‌های لبه دار ( Skirted Foundations )
گروه شمع ( Pile Group )	پی‌های پوسته ای ( Shell Foundations )
Piled Raft Foundation	پی‌های شناور ( Floating Foundations )
سیستم‌های هیبریدی ( تلفیقی )	Barrette Foundations
Other Functions	Top Down Constructions

## 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون

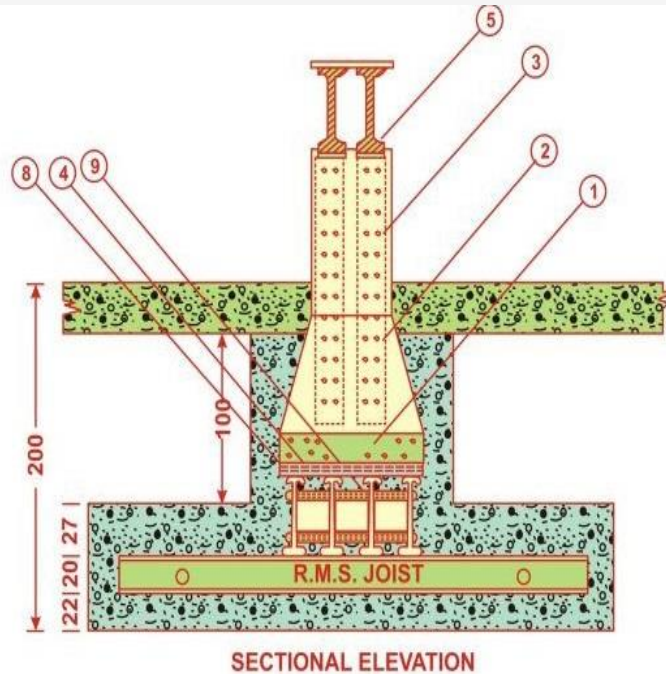
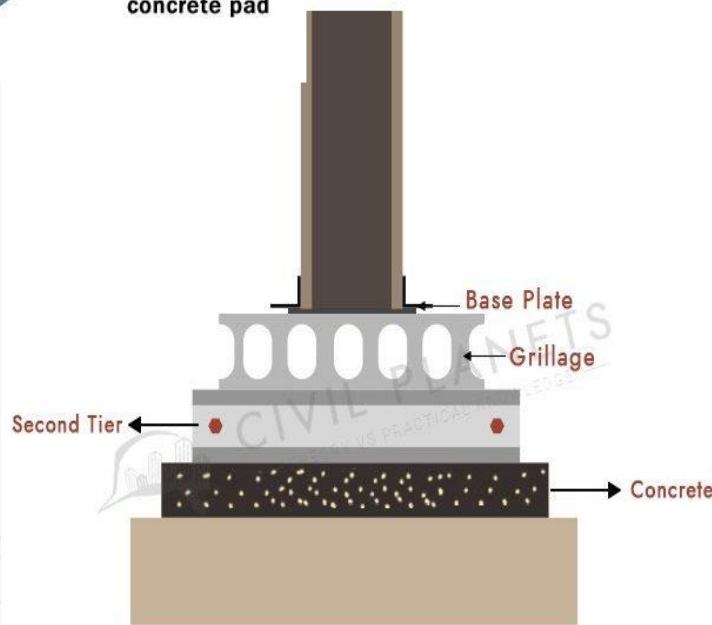
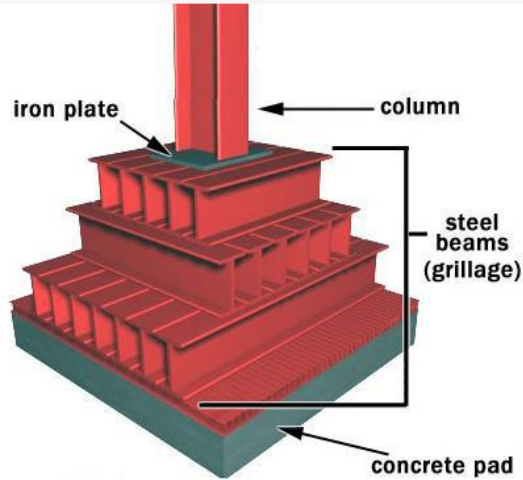


پی‌های گسترده  
(Mat Foundation)

Types of mats, a) Flat plate, b) Flat plate thickened under columns, c) Beams and slab, d) Flat plates with pedestals, e) Slab with basement walls as a part of the mat

## 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون



• بار روسازه سنگین،

• زمین بستر سخت،

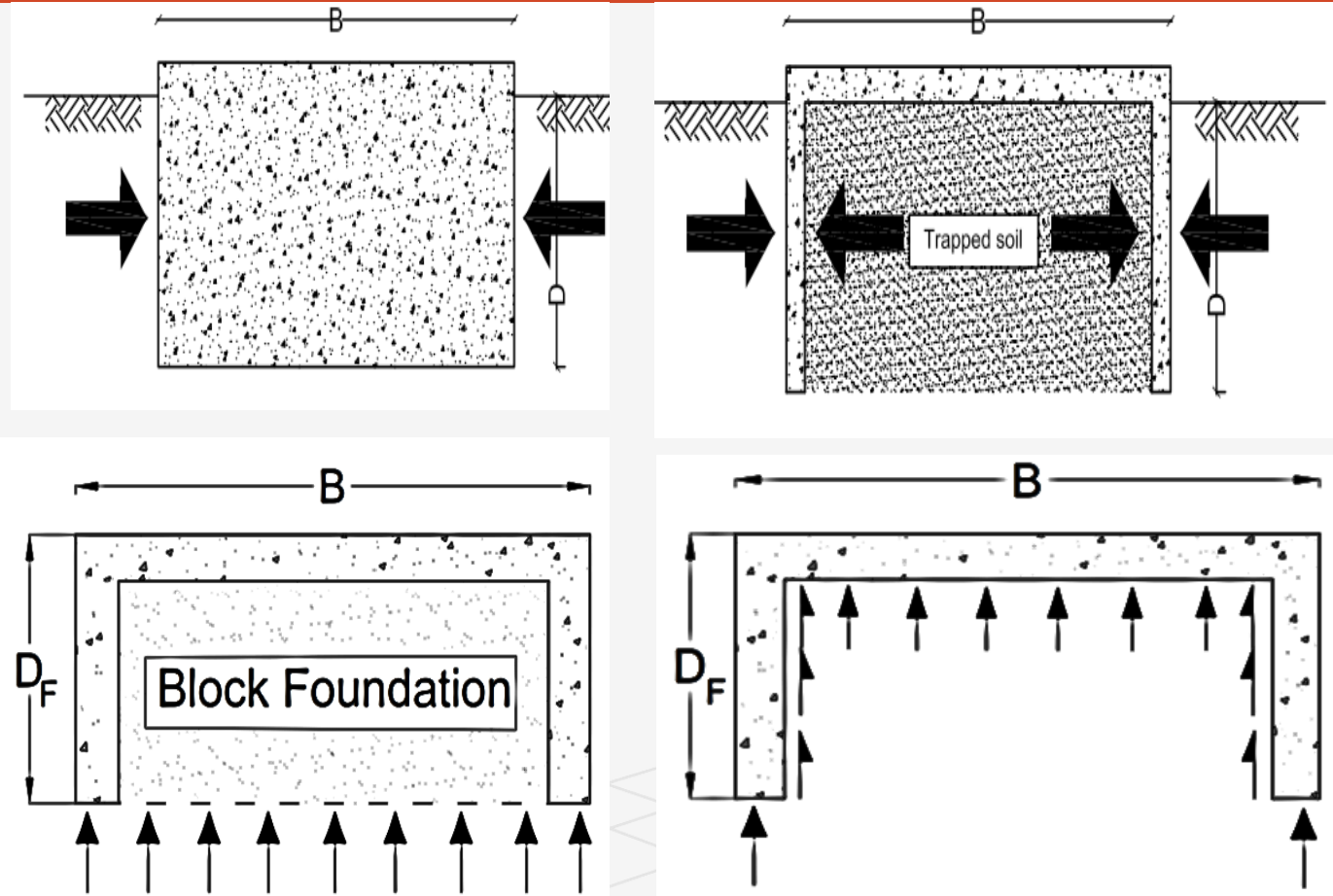
• عدم پاسخگویی بتن مسلح.

**پی های فولادی  
(Grillage Foundation)**



## 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون

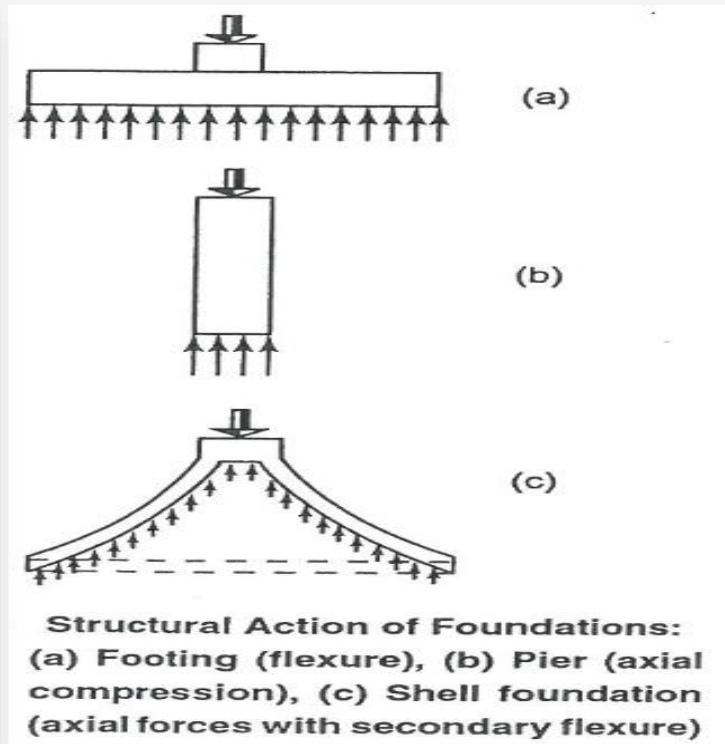
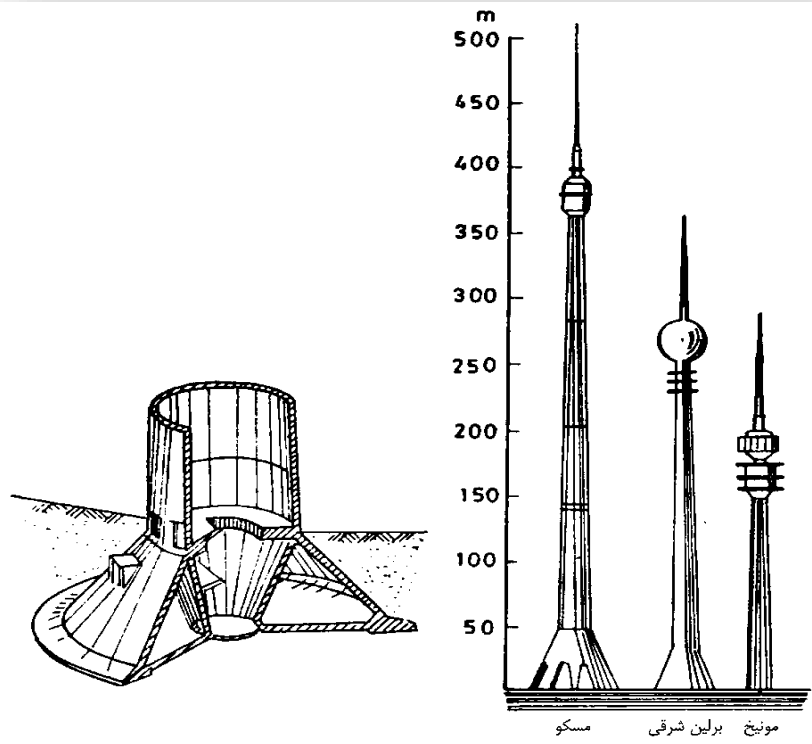


**پی های لبه دار  
(Skirted Foundation)**

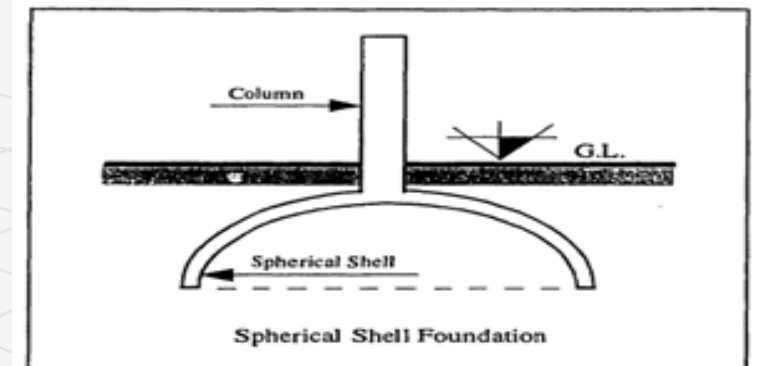
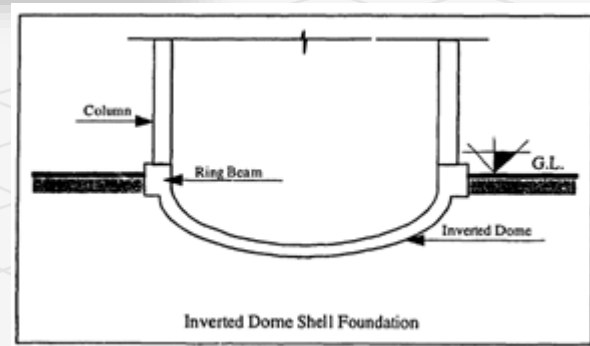
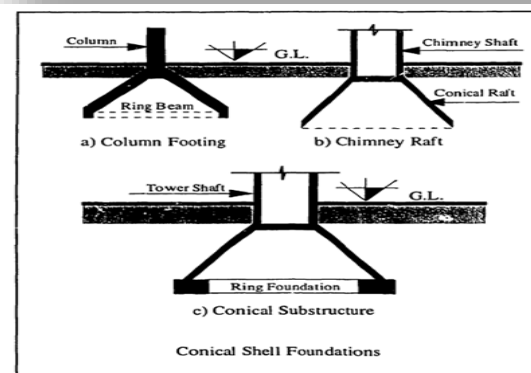
**محصوریت توأمان خاک و پی و تشکیل فونداسیون بلوکی  
(Double Confinement)**

# 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون



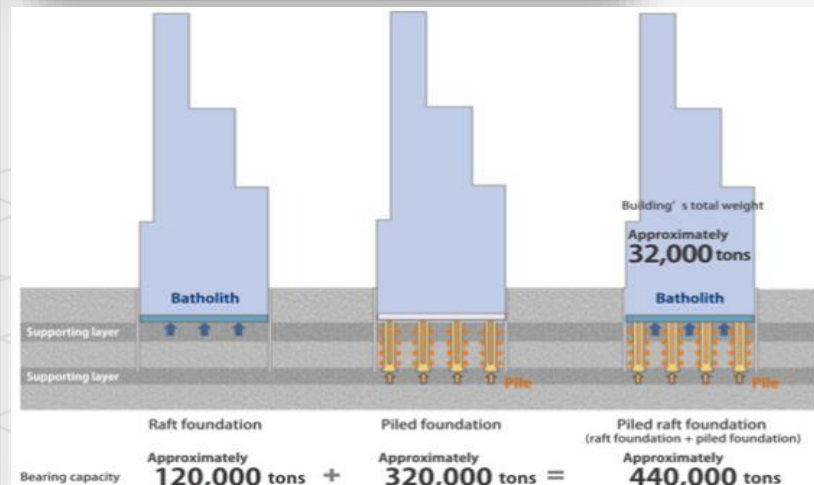
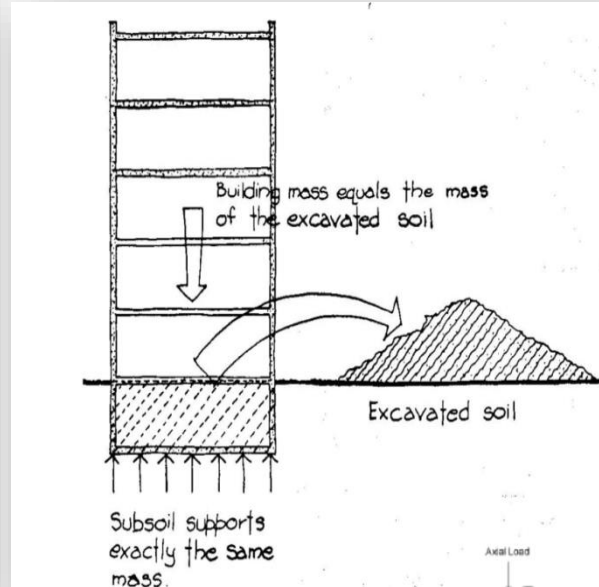
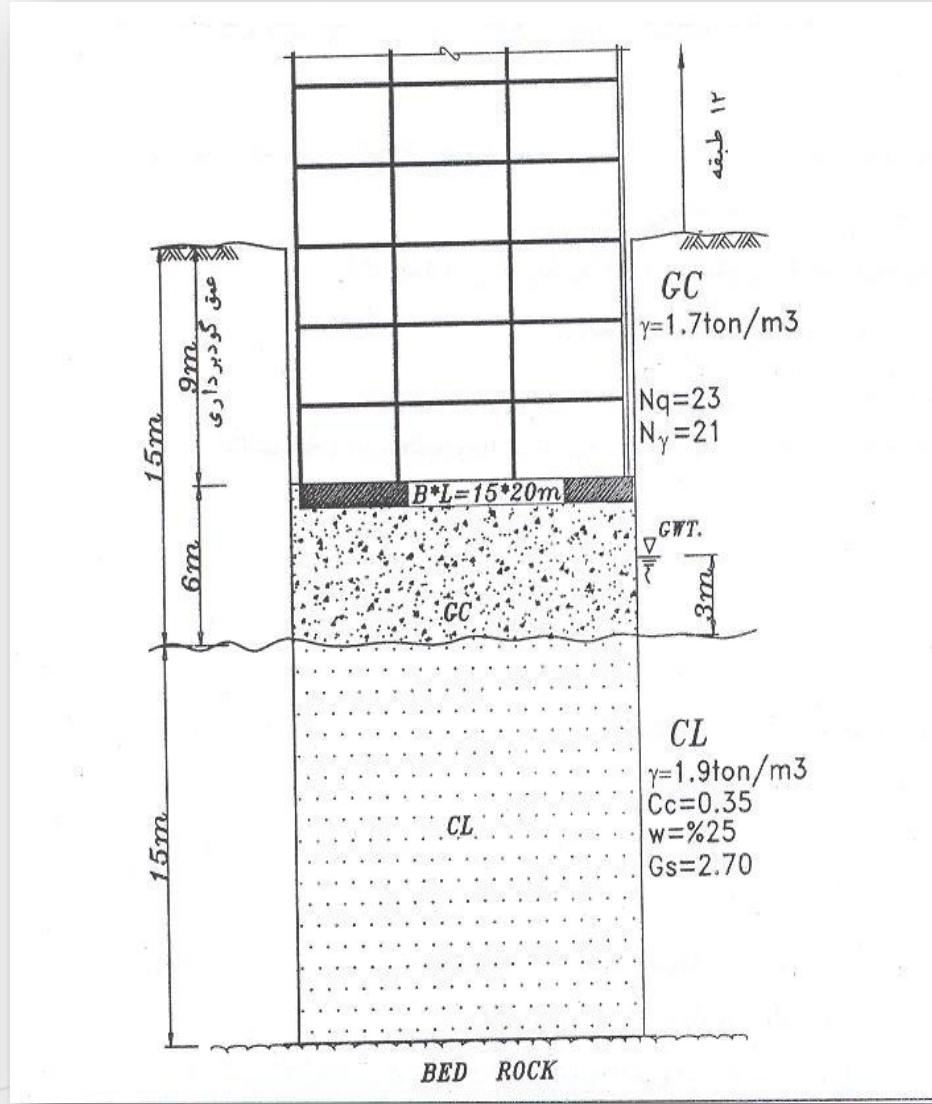
**پی های پوسته ای (Shell Foundation)**



# 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون

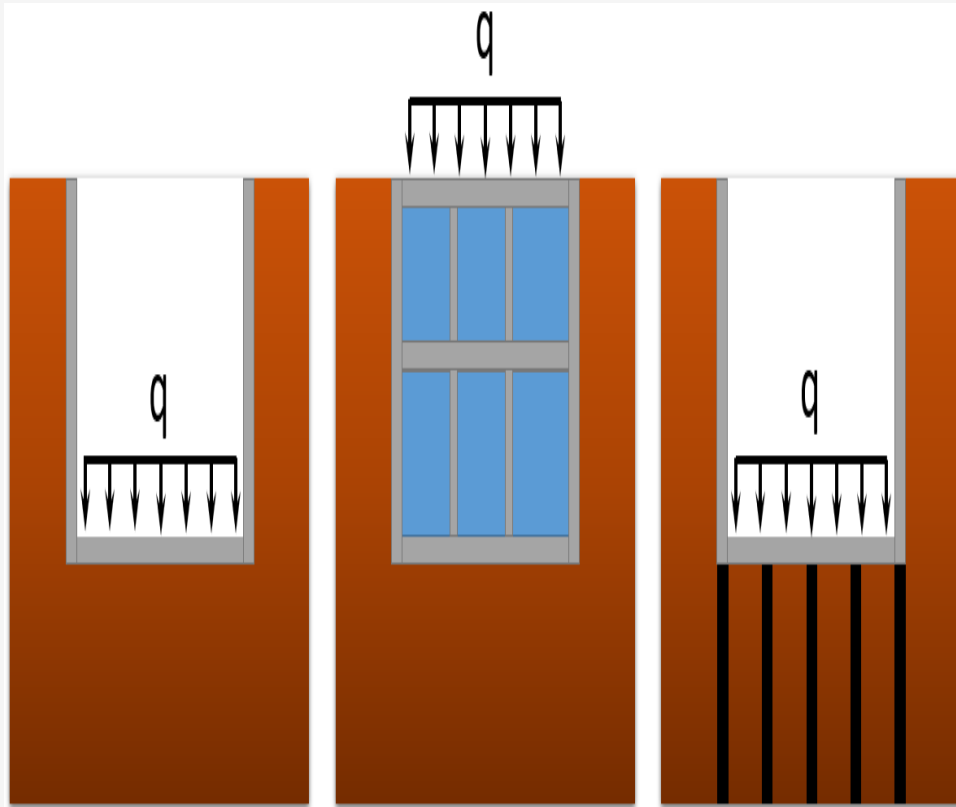
**پی های شناور  
(Floating Foundation)**



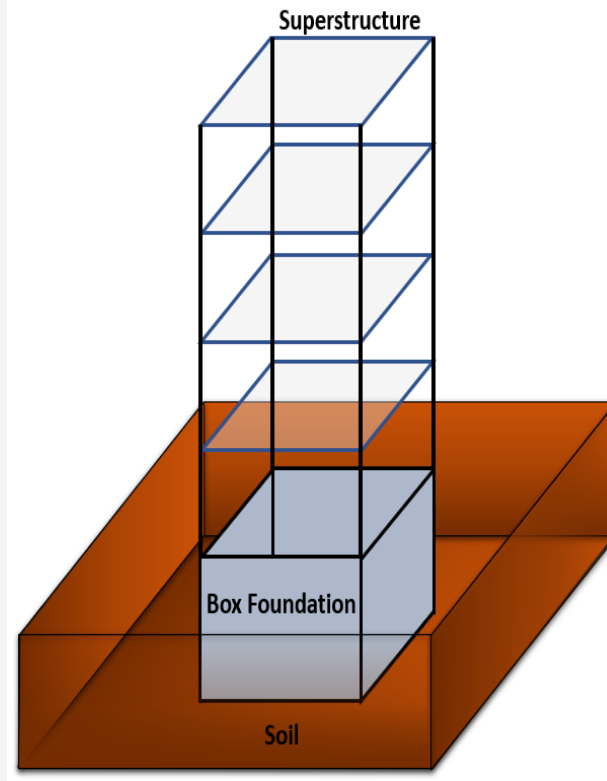
**افزایش توان باربری  
کاهش نشست**

## 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون



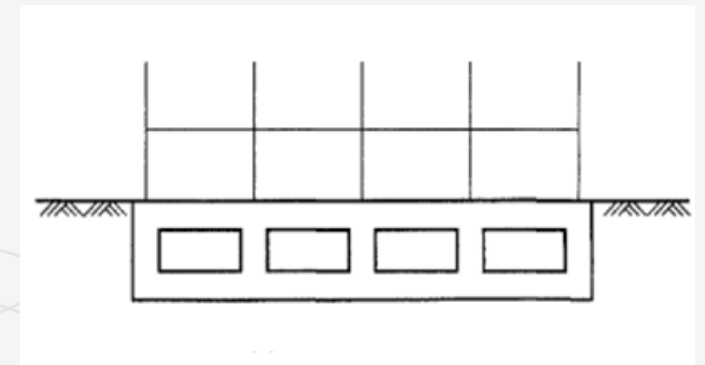
Different types of floating foundations in depth a) simple raft, b) box, c) piled raft



Box Foundation

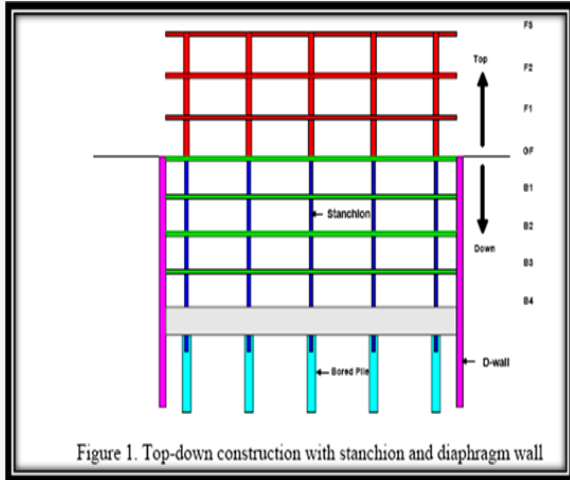
پی های جعبه ای

پی های شناور  
(Floating Foundation)



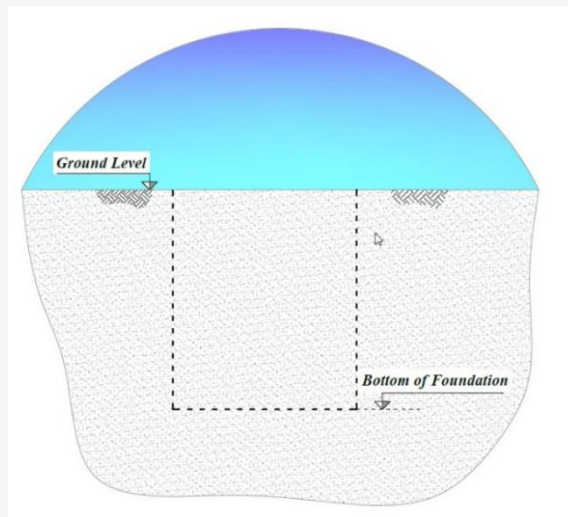
## 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون

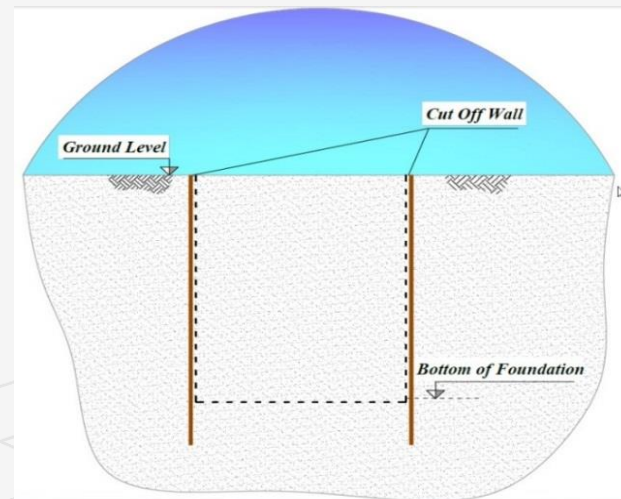


- عملکرد سیستم باکسی صلب به عنوان فونداسیون نیمه عمیق
- طراحی بهینه با تلفیق روسازه و زیرسازه (حائل زیرزمین و دیواربرشی، شمع و ستون)
- 70% سرعت بیشتر در اجرا، 30% هزینه کمتر

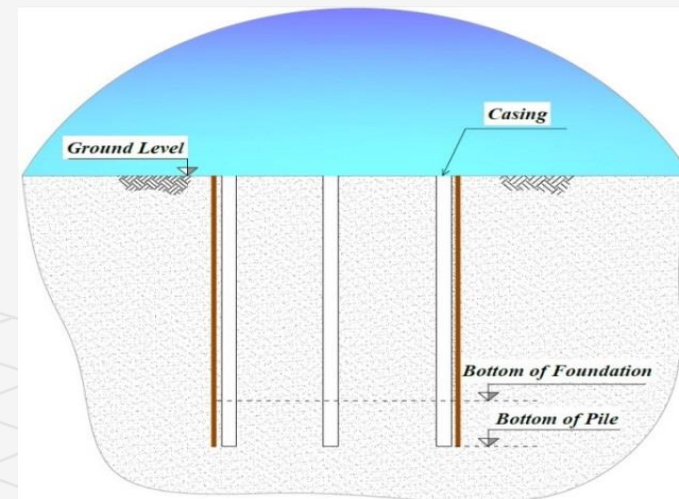
**روش همزمان  
سخت روسازه و  
زیرسازه  
(Top Down)  
Construction  
(Foundation)**



مرحله ۱



مرحله ۲

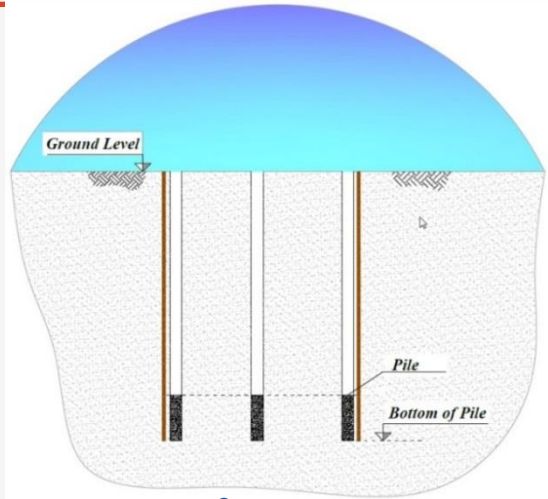


مرحله ۳

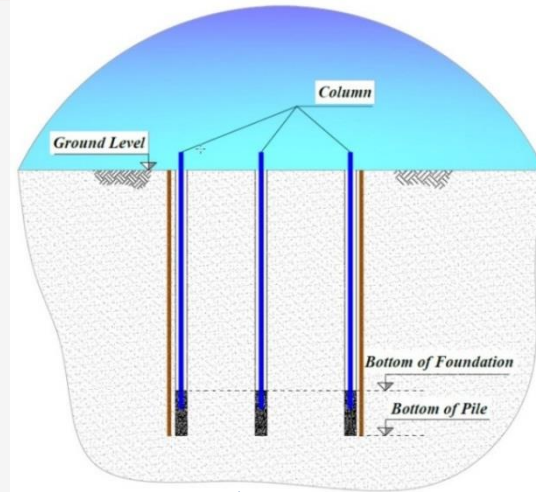


# 4. Foundation System Selection

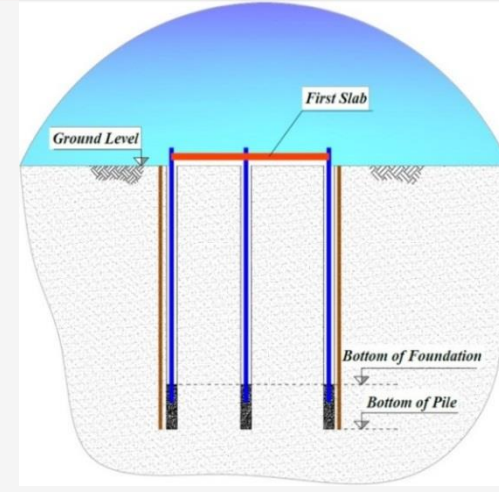
# ۴. انتخاب سیستم فونداسیون



مرحله ۴

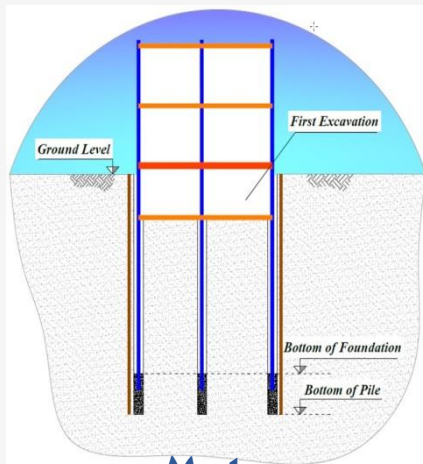


مرحله ۵

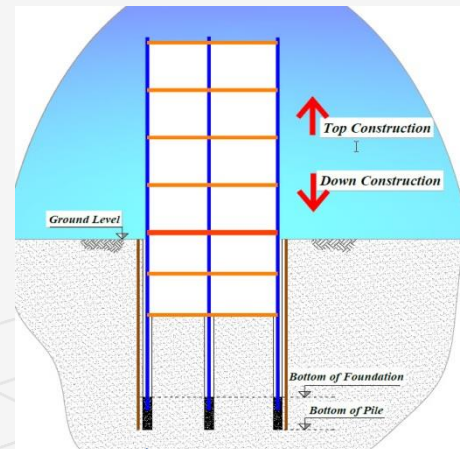


مرحله ۶

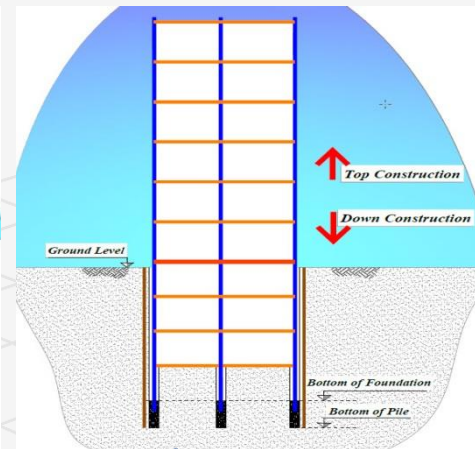
**روش همزمان  
سخت روسازه و  
زیرسازه  
(Top Down)  
Construction  
(Foundation**



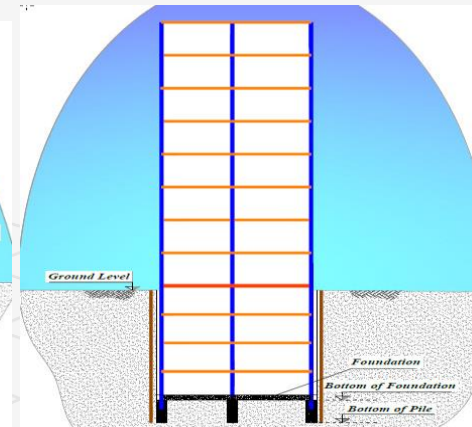
مرحله ۷



مرحله ۸



مرحله ۹



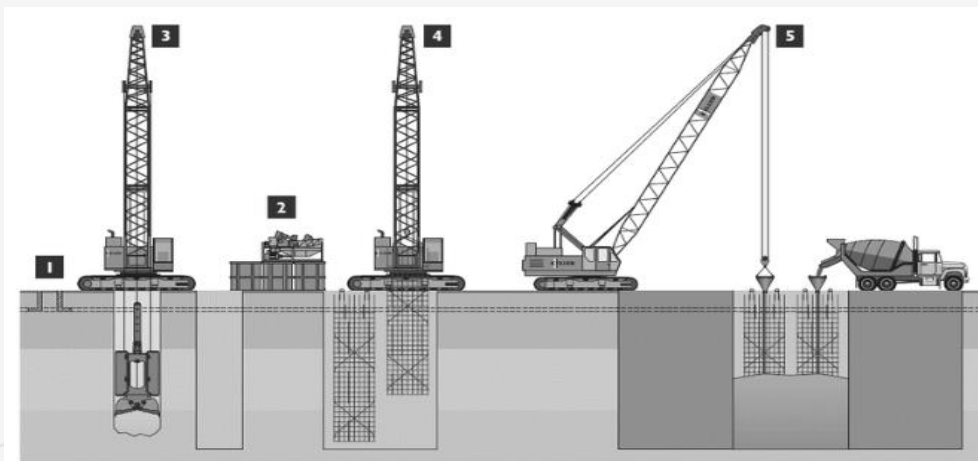
مرحله ۱۰

## 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون



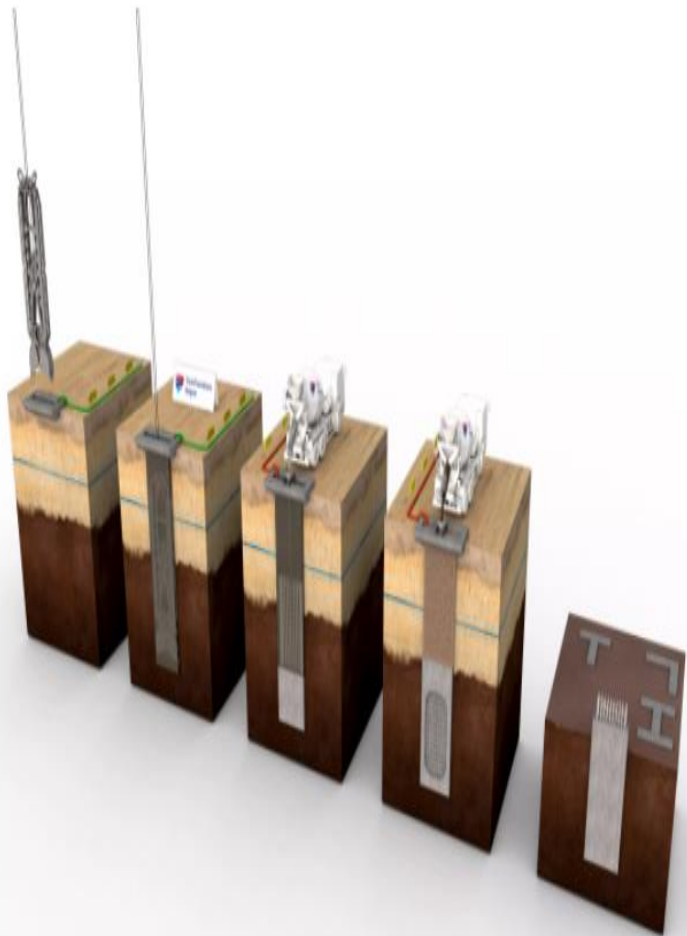
**Barrette  
Foundations**



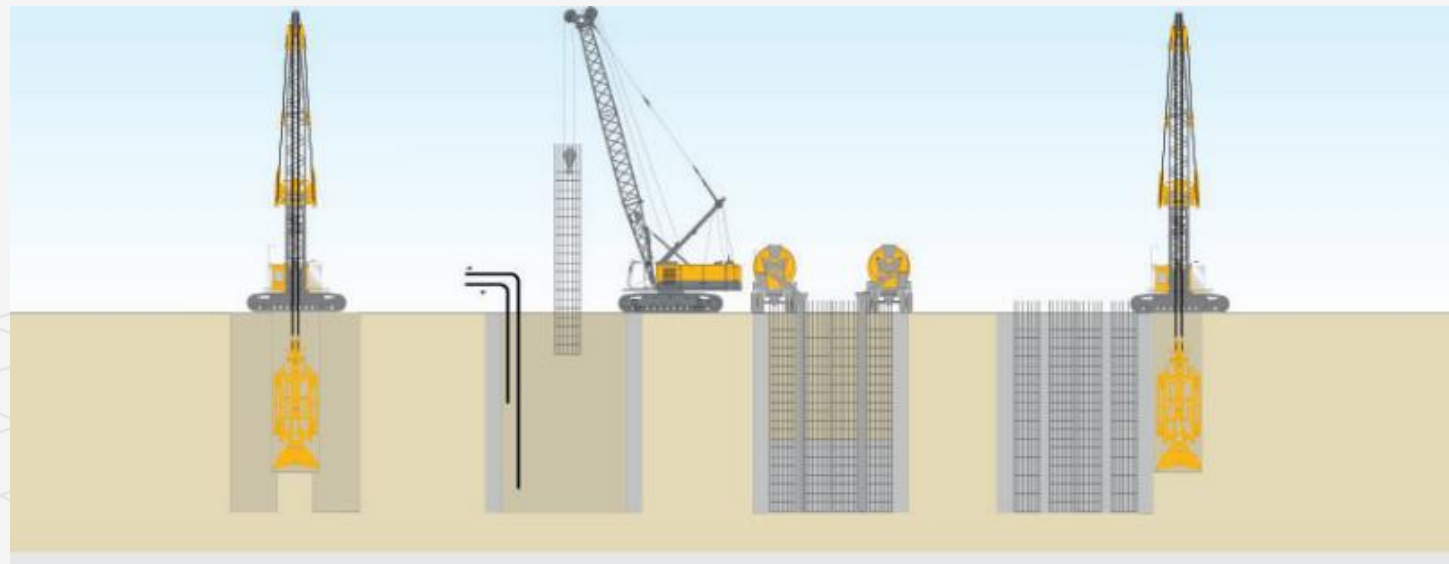


## 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون

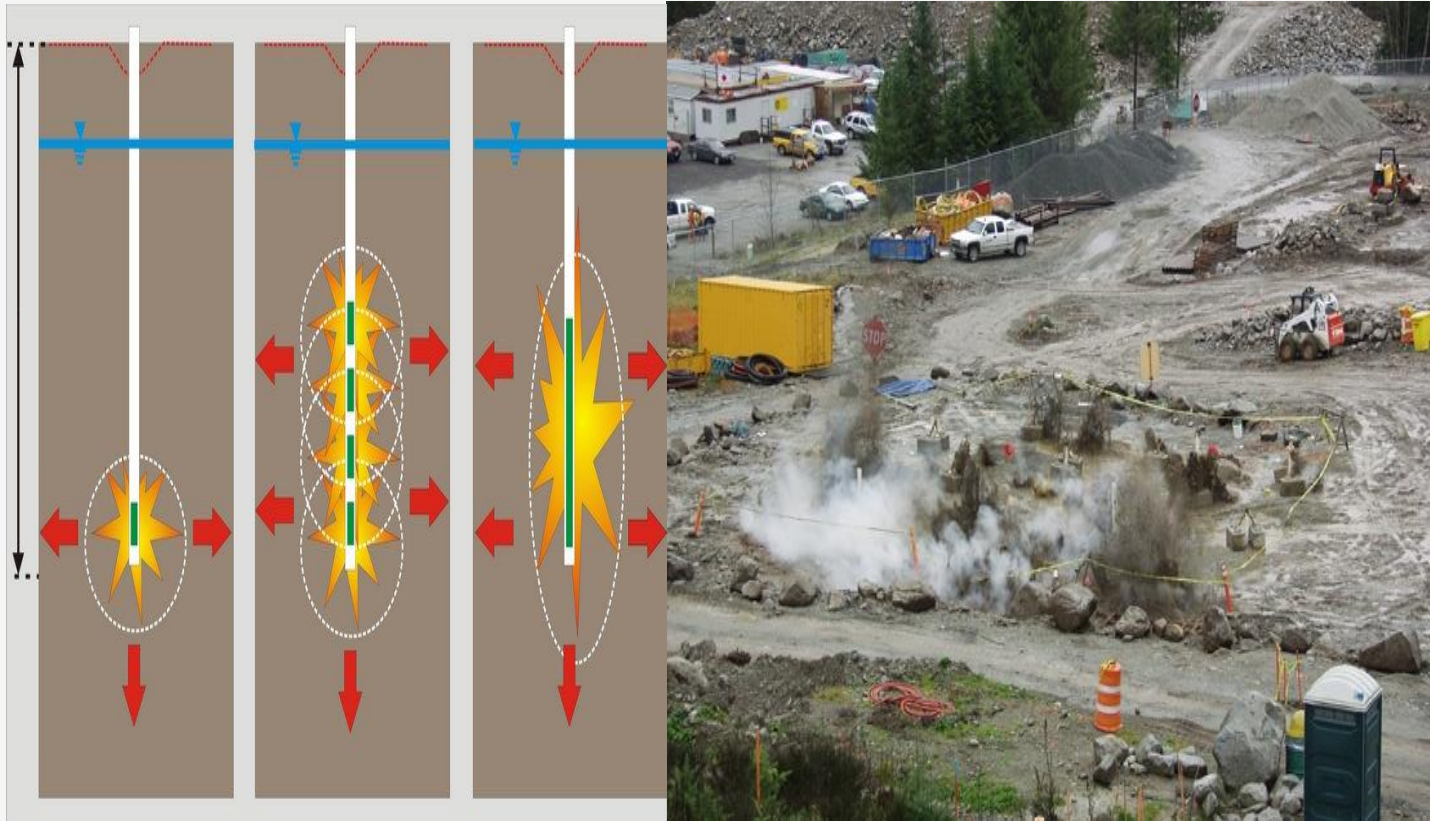


**Barrette  
Foundations**



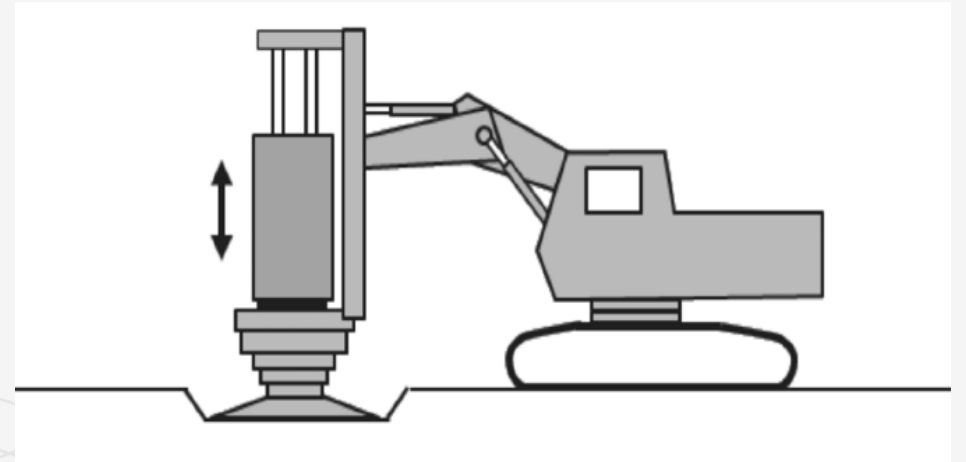
## 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون



تراکم انفجاری

بهسازی انبوهی  
( Massive )  
( Foundation



Rapid Impact Compaction

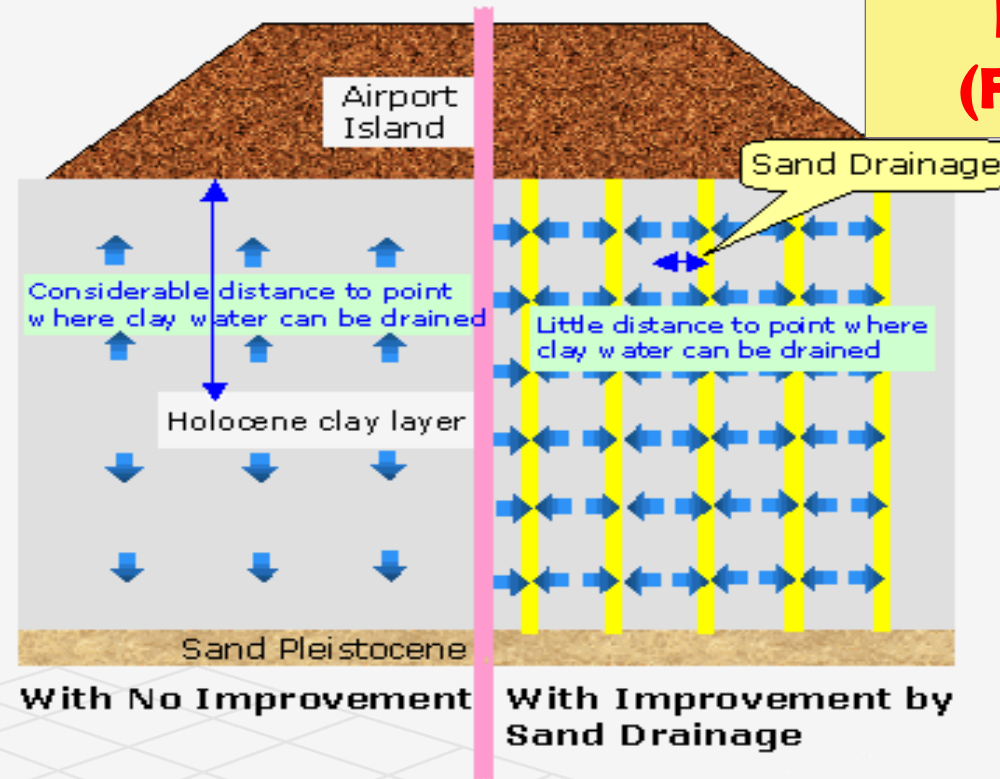


# 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون



تراکم عمق دینامیک

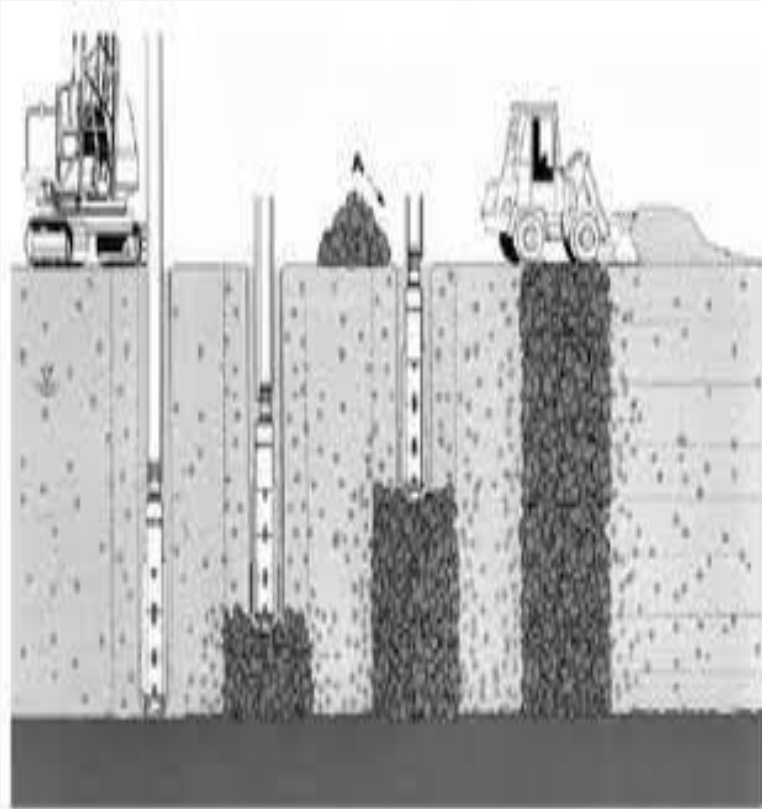


زهشکی قائم

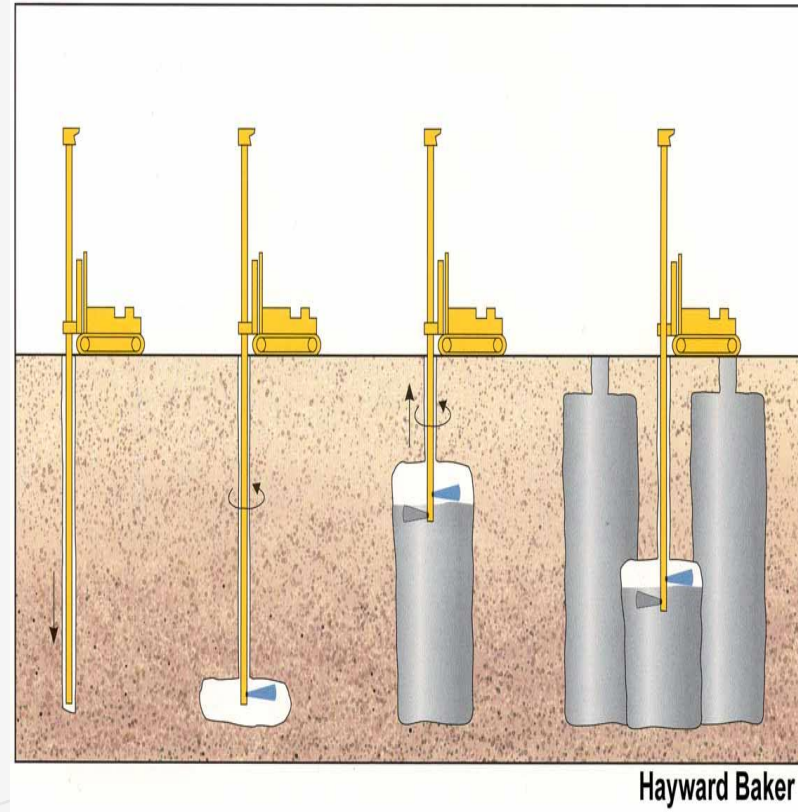


## 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون

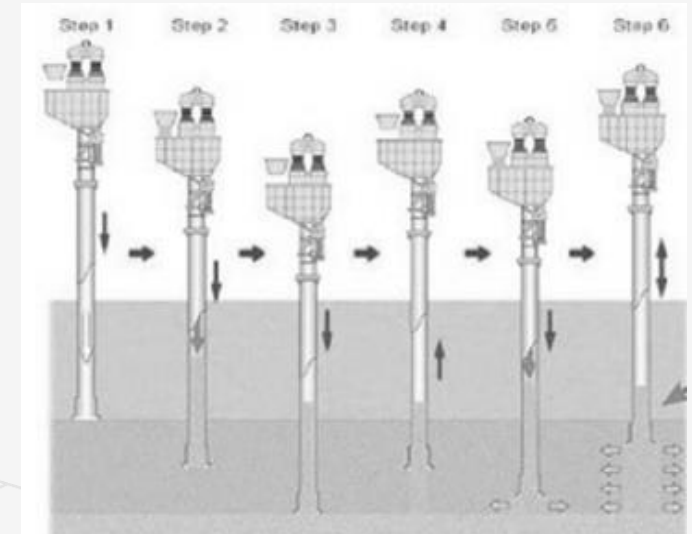


ستون های سنگی و آهنی سنی



تزریق

**بهسازی ستونی  
Columnar Ground )  
(Improvement**

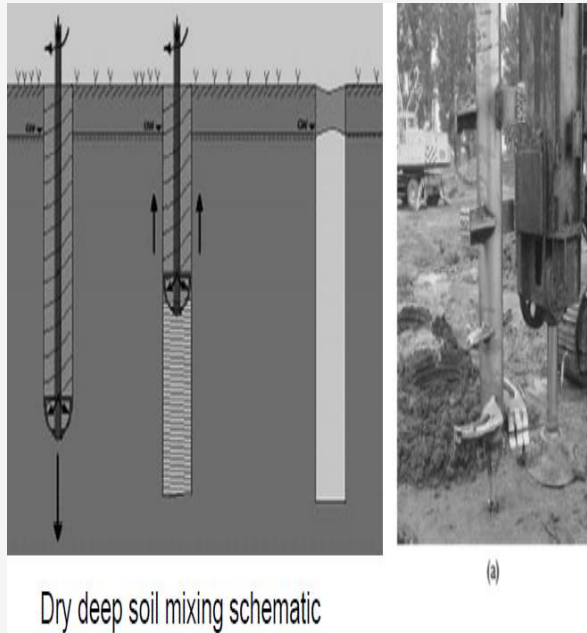


**Sand Compaction Pile (SCP)**

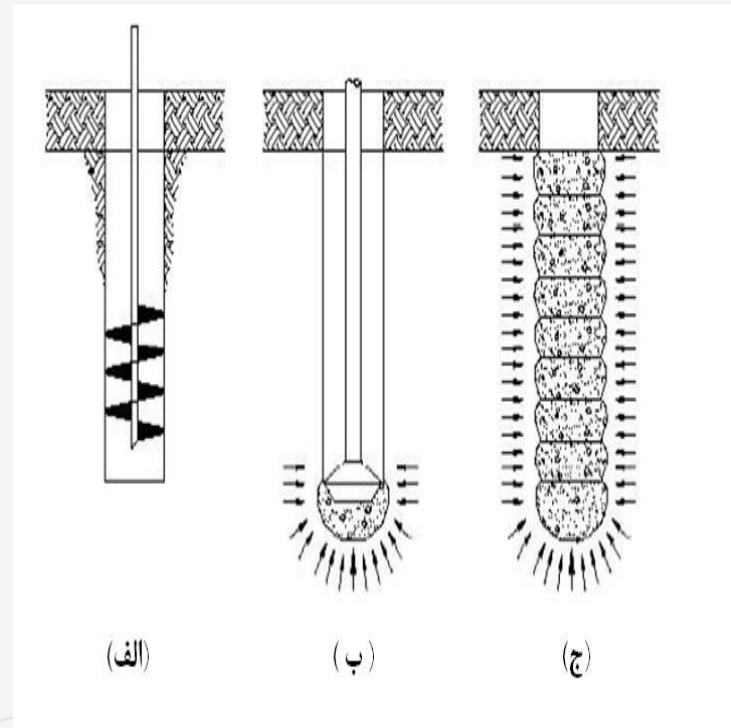
# 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون

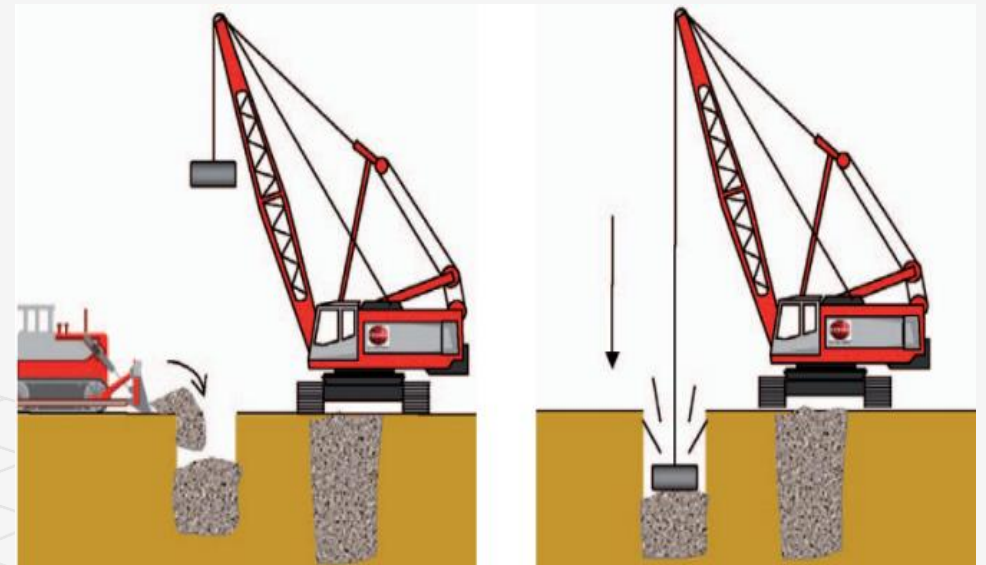
**بهسازی ستونی  
( Columnar Ground )  
(Modification)**



اختلاط خاک در عمق ( DSM )



ستون های سنگریزه ای کوبشی



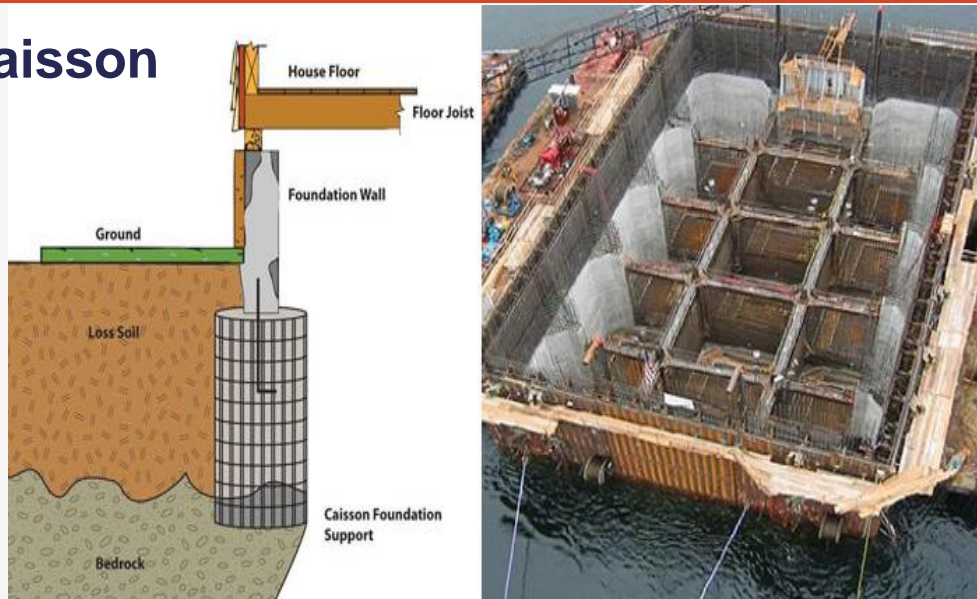
پی های چاهی



# 4. Foundation System Selection

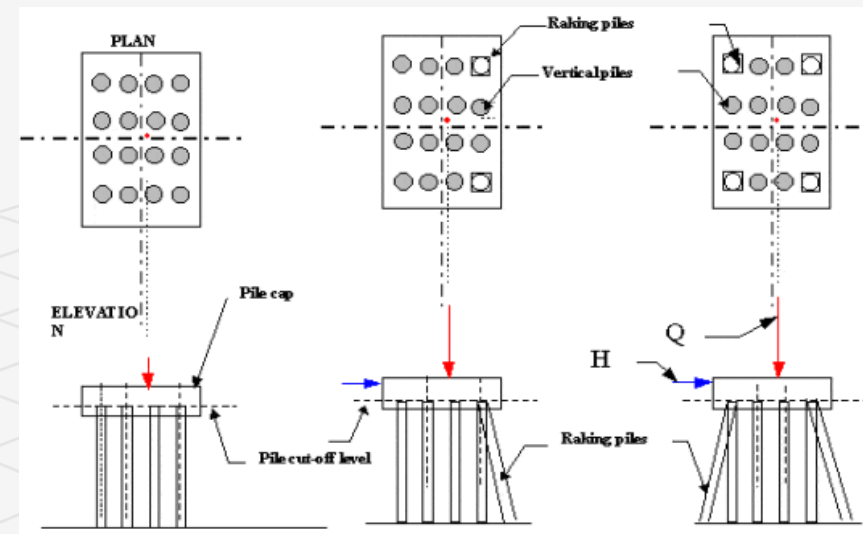
## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون

### Caisson



**Group Pile and Caisson**

### Monopile

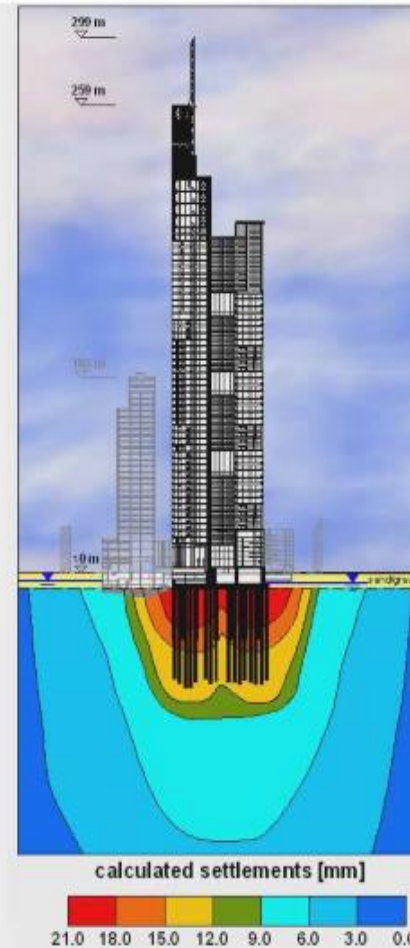
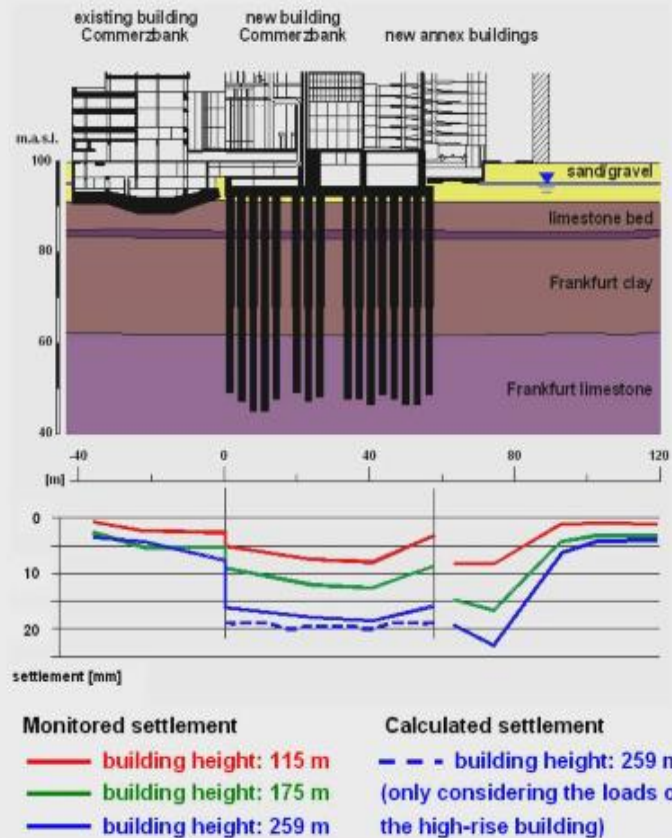


# 4. Foundation System Selection

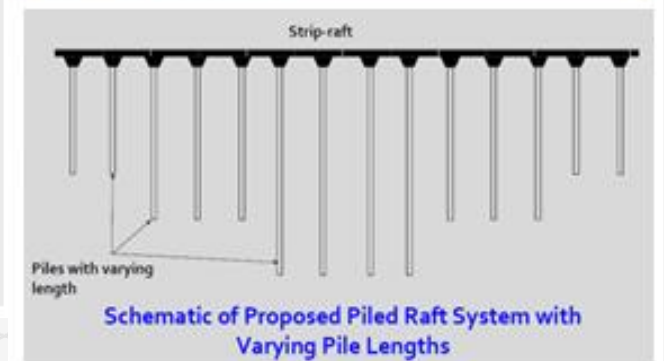
# ۴. انتخاب سیستم فونداسیون



Settlements: calculation and measurement



**پی رادیه مرکب  
(Piled Raft  
Foundation)**



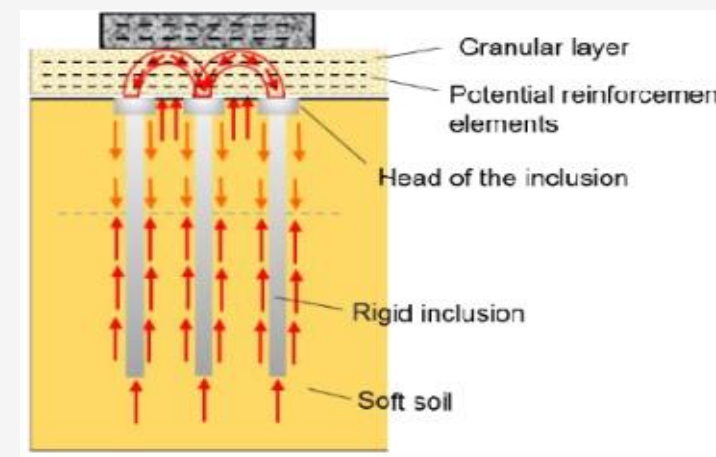
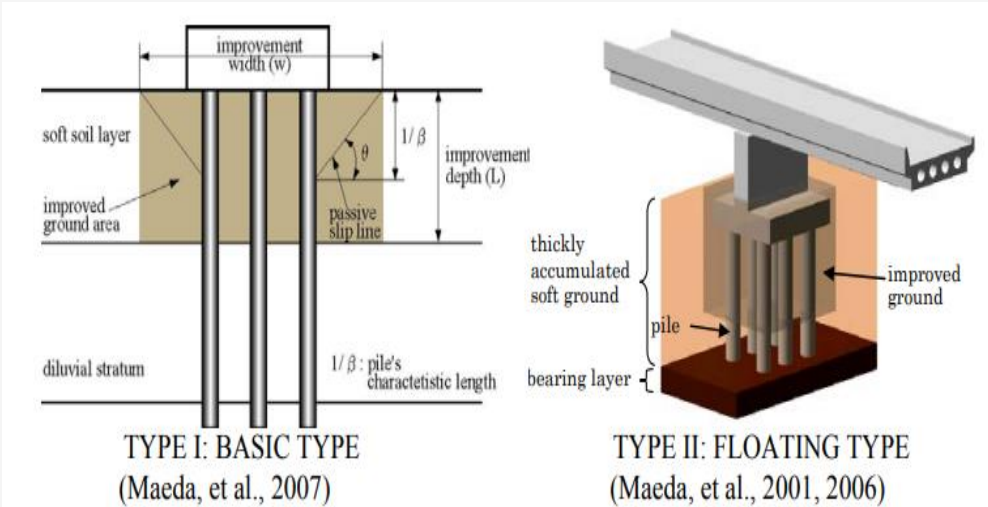
نمونه هایی از سیستم فونداسیون های مرکب

(Poulos, 1998; Randolph, 2009)



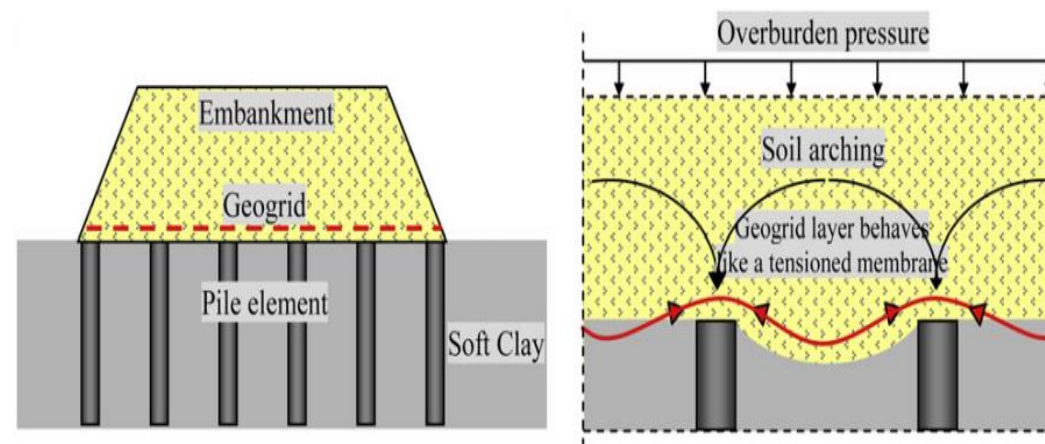
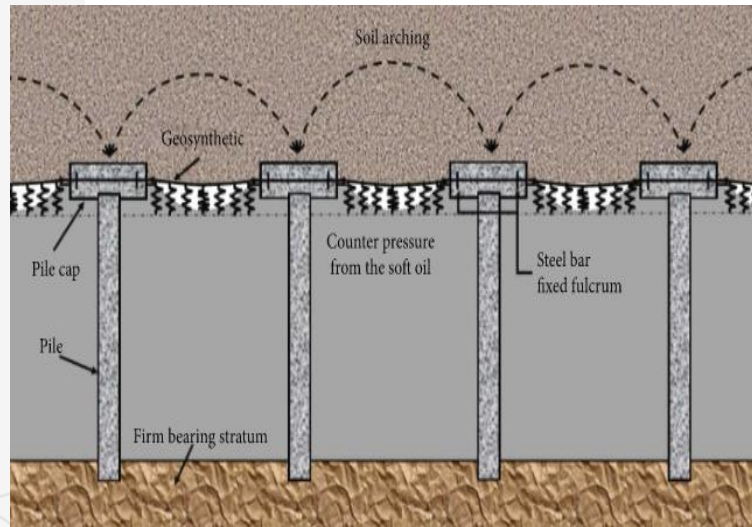
# 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون



**سیستم های  
هیبریدی (تلفیقی)**

تلفیق انواع پی  
برای مثال  
بهسازی خاک و  
اجرای شمع



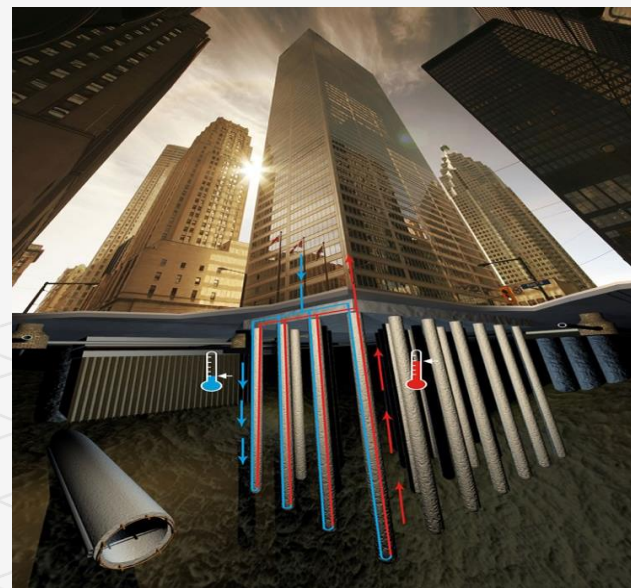
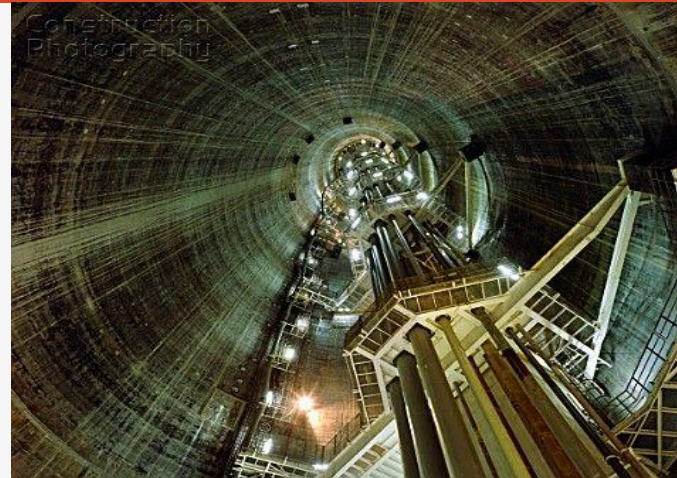


## 4. Foundation System Selection

## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون

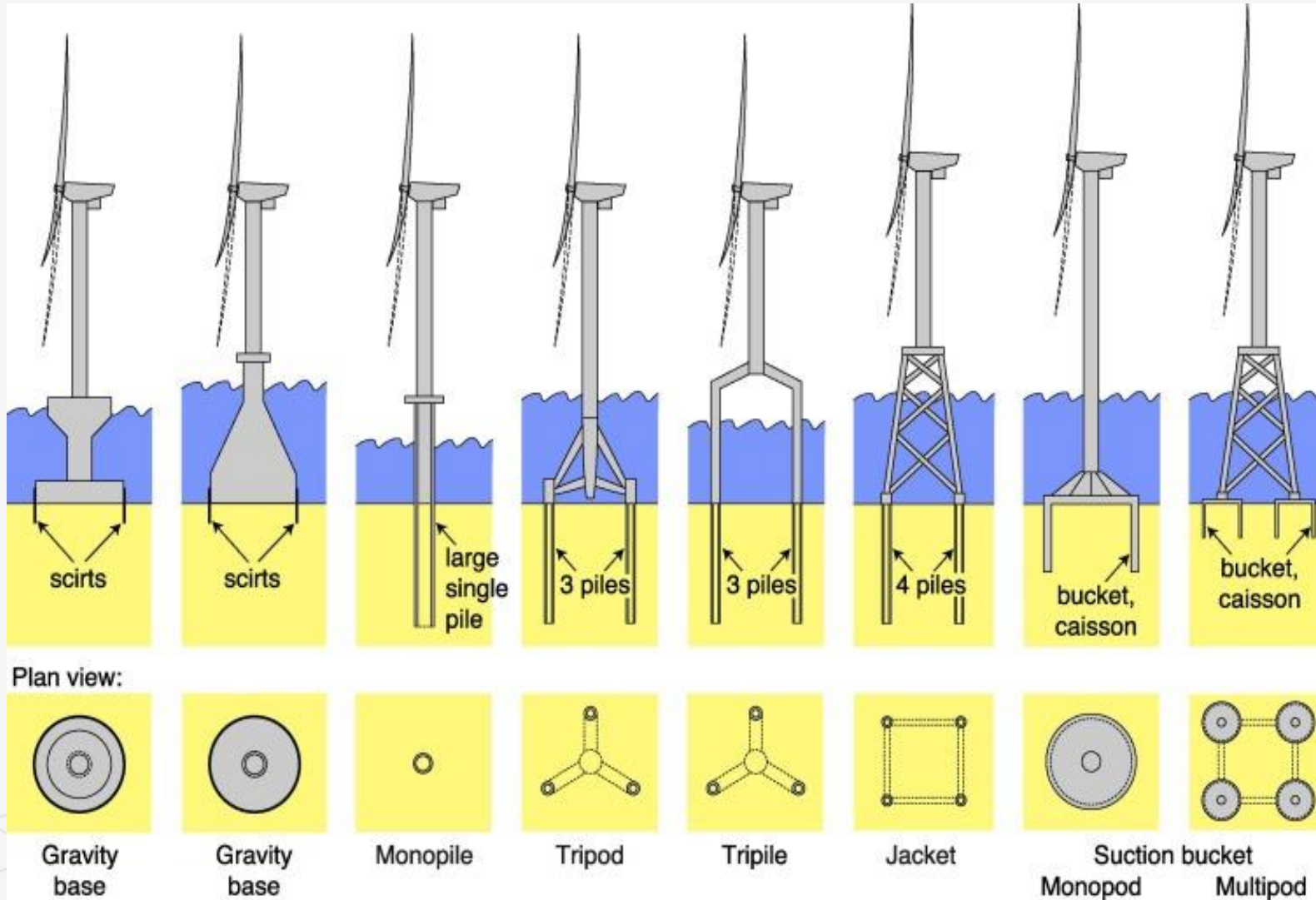
### Other Functions

- استفاده از پی سازه‌های دریایی به عنوان **storage**
- استفاده از شمع‌های حرارتی در تولید انرژی



# 4. Foundation System Selection

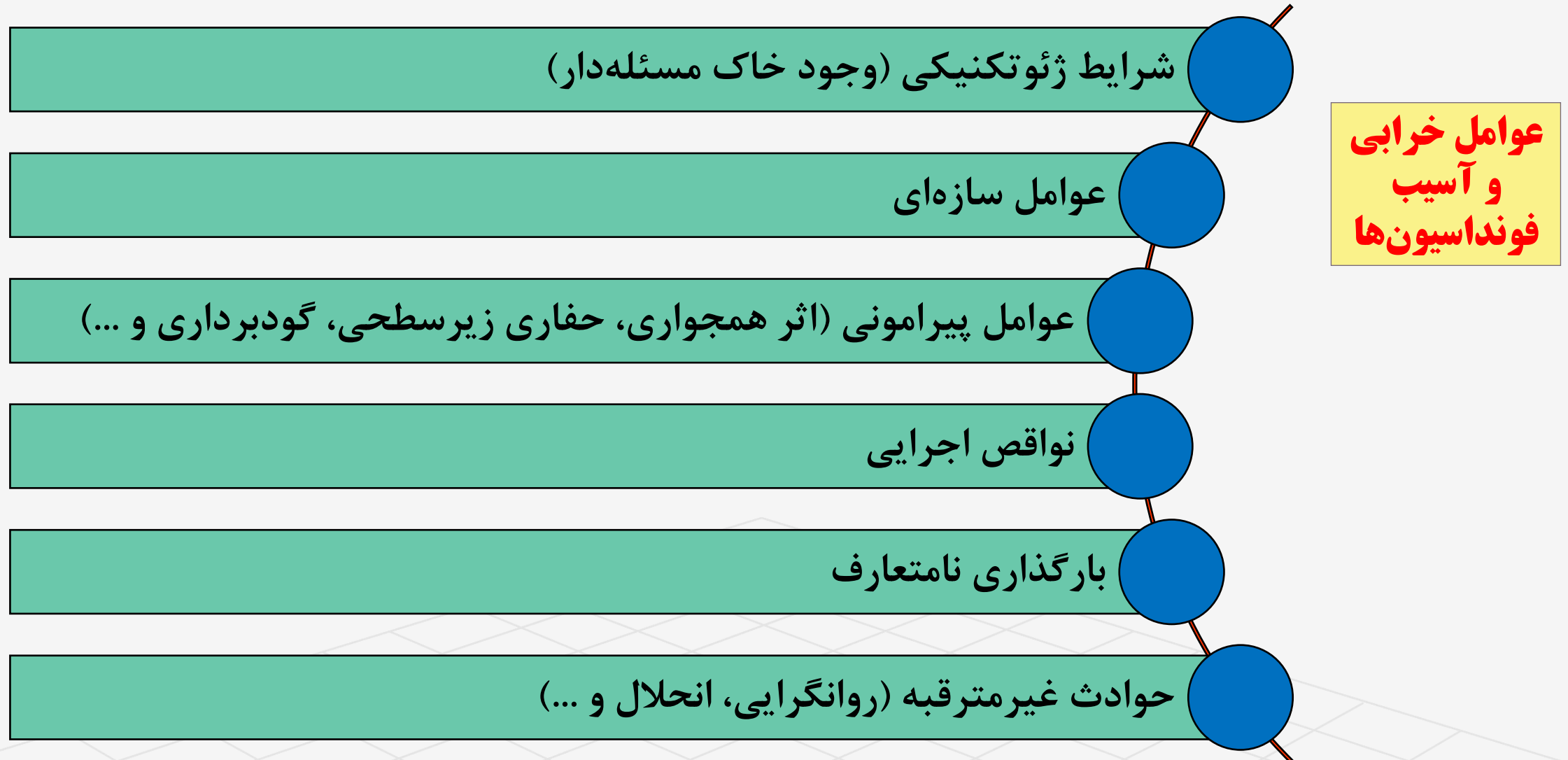
## ۴. انتخاب سیستم فونداسیون



انواع سیستم های  
متداول جهت  
فونداسیون  
توربین های  
فراساحلی

## 5. Foundation Damages

## ۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

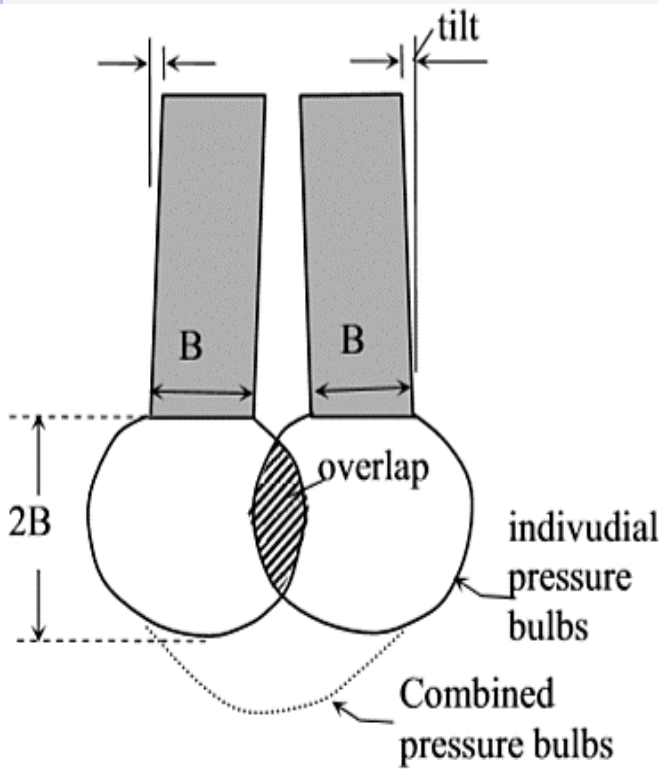




## 5. Foundation Damages

## ۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

نشست و کج‌شدگی سازه‌ها بر اثر همپوشانی تنش‌ها



اثر همجواری سازه‌ها

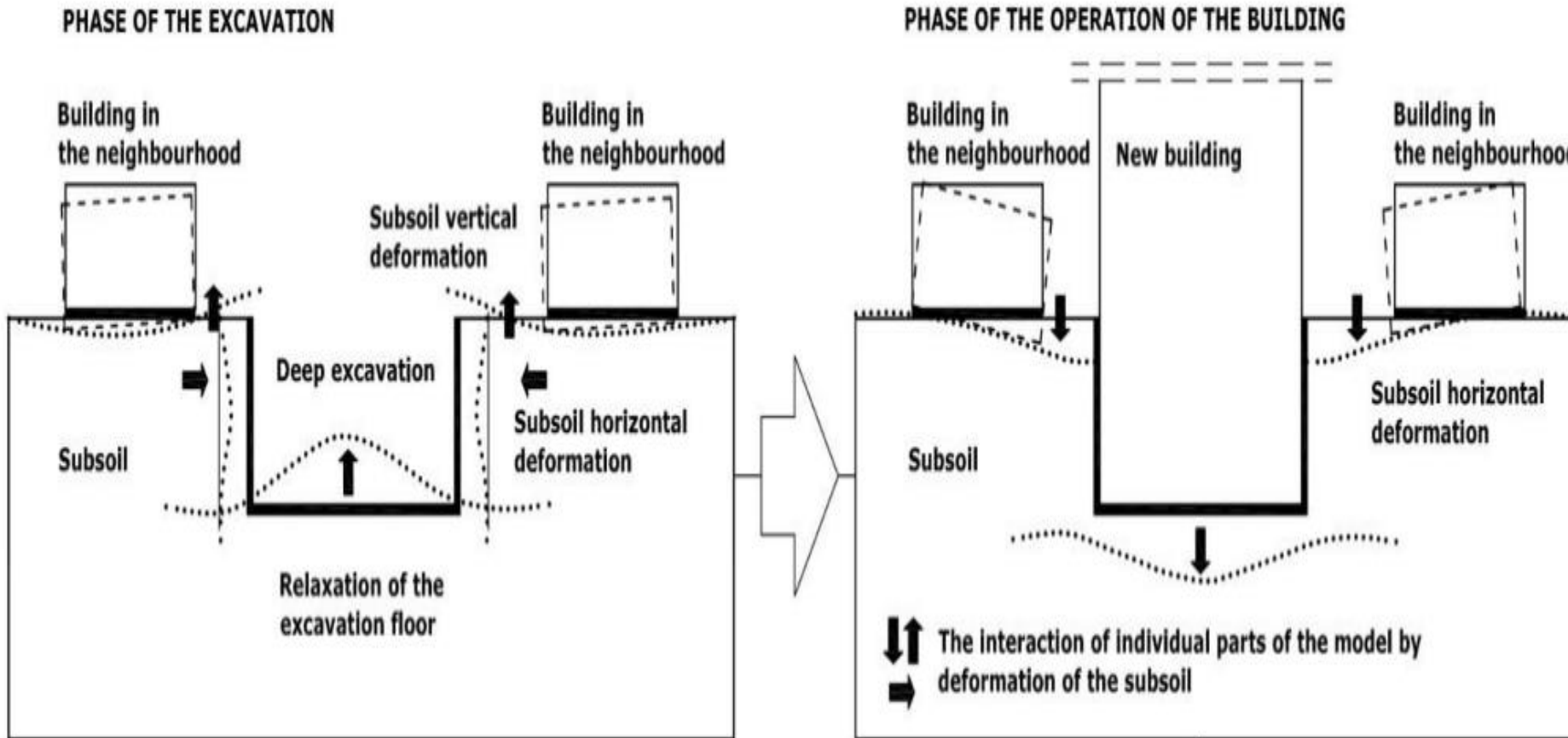
Interference of pressure bulbs

Tilting adjacent silos

The leaning towers

## 5. Foundation Damages

## ۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون



حفاری و  
گودبرداری  
در مجاورت و  
زیر سازه

Phase of the Excavation and Operation of the Buildings

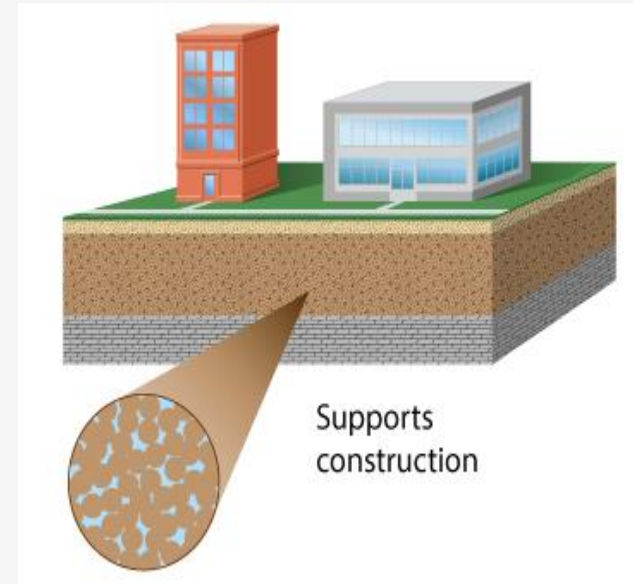


## 5. Foundation Damages

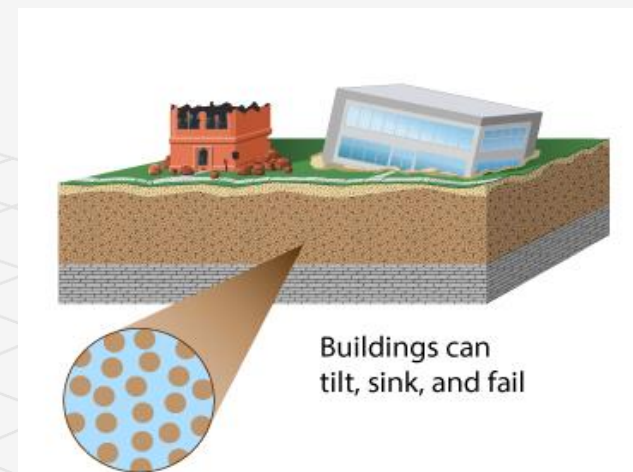
## ۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون



Taiwan earthquake 1999



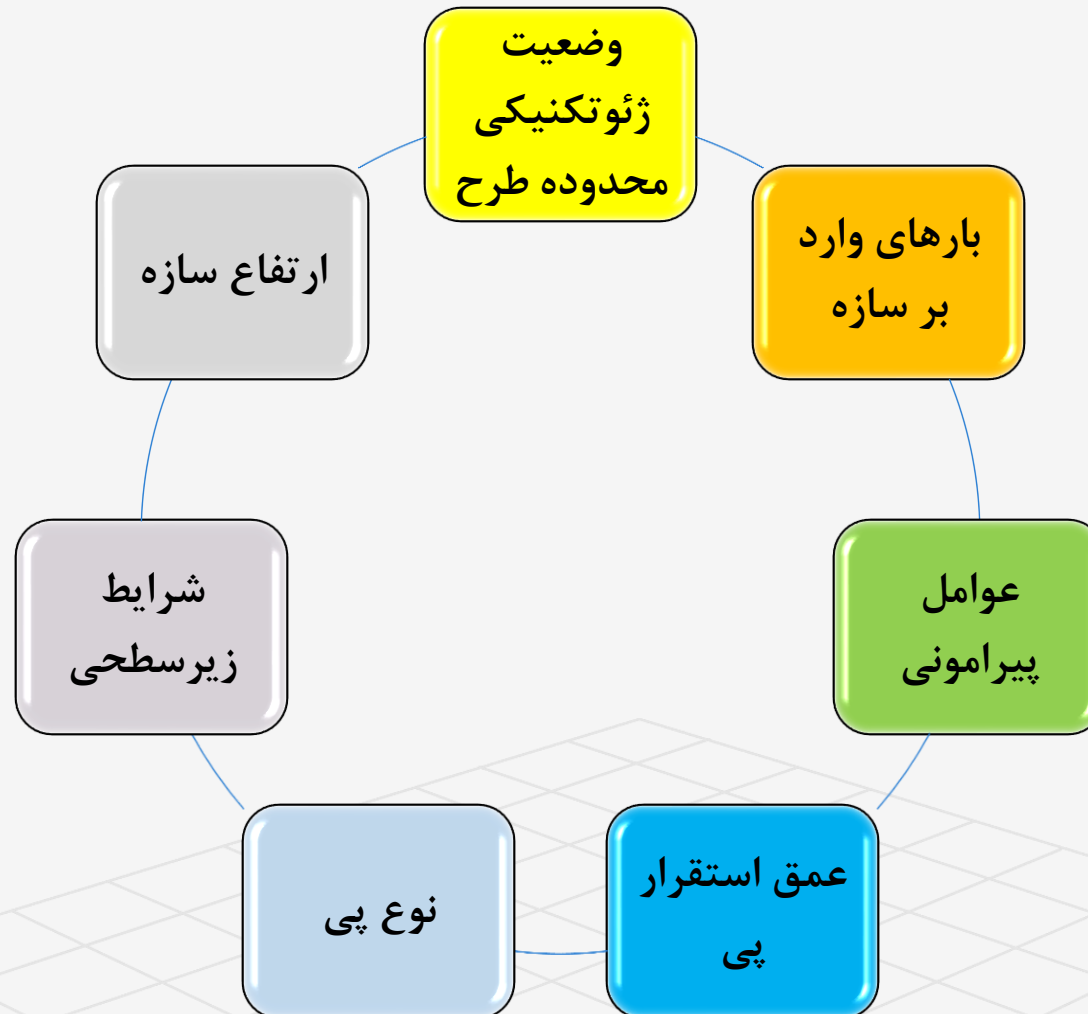
وقوع  
روانگرایی



Buildings can  
tilt, sink, and fail

## 5. Foundation Damages

## ۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون



**عوامل موثر بر پایداری سیستم زیر سازه**

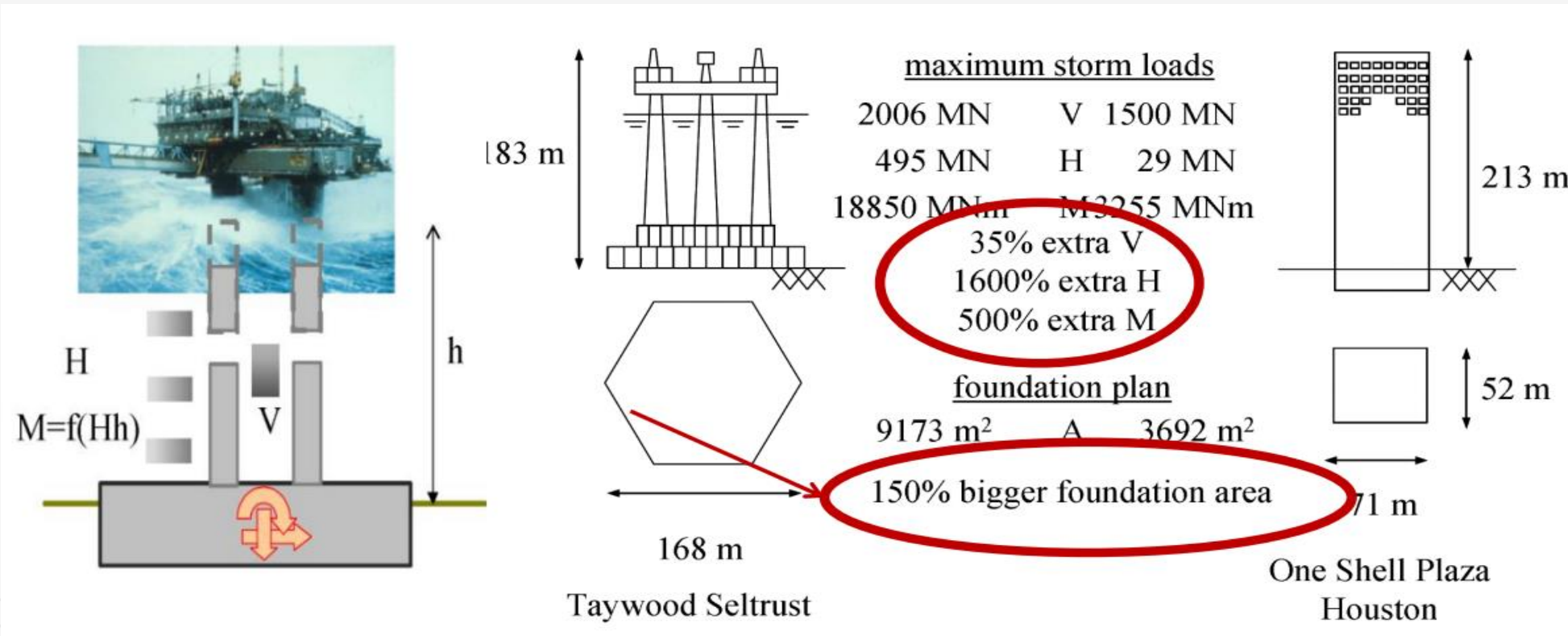
# 5. Foundation Damages

# ۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

ضعف پی‌های سطحی در مقابل بارهای جانبی، لنگر و برگش

وزن سازه و فونداسیون ( $V$ ) + نیروی باد، امواج و جریان‌ها ( $H, M$ )  
 = بار  $VMH$  فونداسیون

**معضلات ناپایداری در سازه‌های بلندمرتبه**





## 5. Foundation Damages

## ۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

مورد عملی شماره یک: Pisa Tower Tilting

موارد عملی آسیب به ساختمان‌های بلند

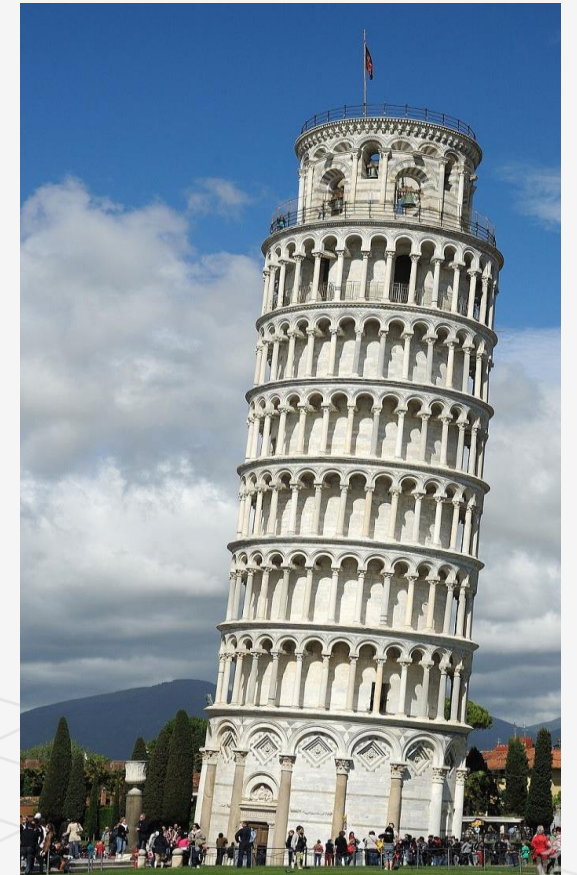
The monument is **58.4 m** in height from the plane of the foundation

### Foundation Type

- ❑ The ring foundation has an external diameter of 19.6 m; the center hole, 4.6 m. The foundation area is thus  $285 \text{ m}^2$

### Type of Damages

- ❑ The inclination of the tower was  $5.5^\circ$  (in other words, about 10%) due to settlement of the foundation



## 5. Foundation Damages

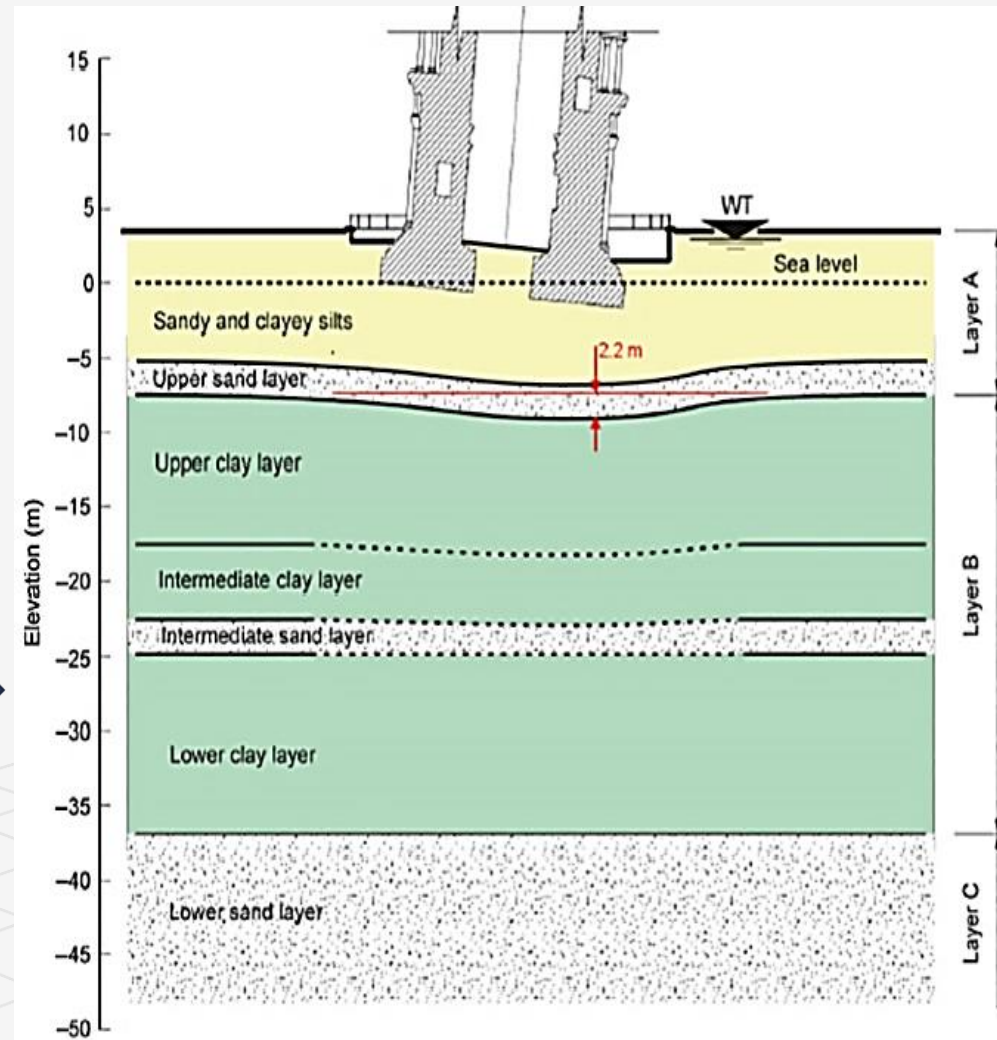
## ۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

### The subsoil of the Tower

- The subsoil of Piazza Tower consists of three main layers

schematic north-south section of the ground underlying the Tower

- The groundwater in Layer A is at a depth of between 1 and 2 m



موارد عملی  
آسیب به  
ساختمان‌های  
بلند



## 5. Foundation Damages

## ۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

مورد عملی شماره دو: Santos Adjacent Buildings

موارد عملی  
آسیب به  
ساختمان‌های  
بلند

□ رخ دادن نشست‌های غیریکنواخت در ساختمان‌های مرتفع ساخته‌شده بر روی فونداسیون سطحی

انتخاب سیستم نامناسب فونداسیون

همجواری سازه‌ها

عوامل اصلی نشست سازه‌ها:

Sand and intermediate sand mixed with marine clay

Marine clay

Rock and strong residual soils

لایه‌بندی خاک محل

## 5. Foundation Damages

## ۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

### Professor Milton Vargas:

*'The buildings near the beautiful beach in Santos are like dominoes, and that if one building collapsed, all the other would also collapse.'*

موارد عملی  
آسیب به  
ساختمان‌های  
بلند



## 5. Foundation Damages

## ۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

موارد عملی آسیب به ساختمان‌های بلند

مورد عملی شماره سه: Millennium Tower San Francisco

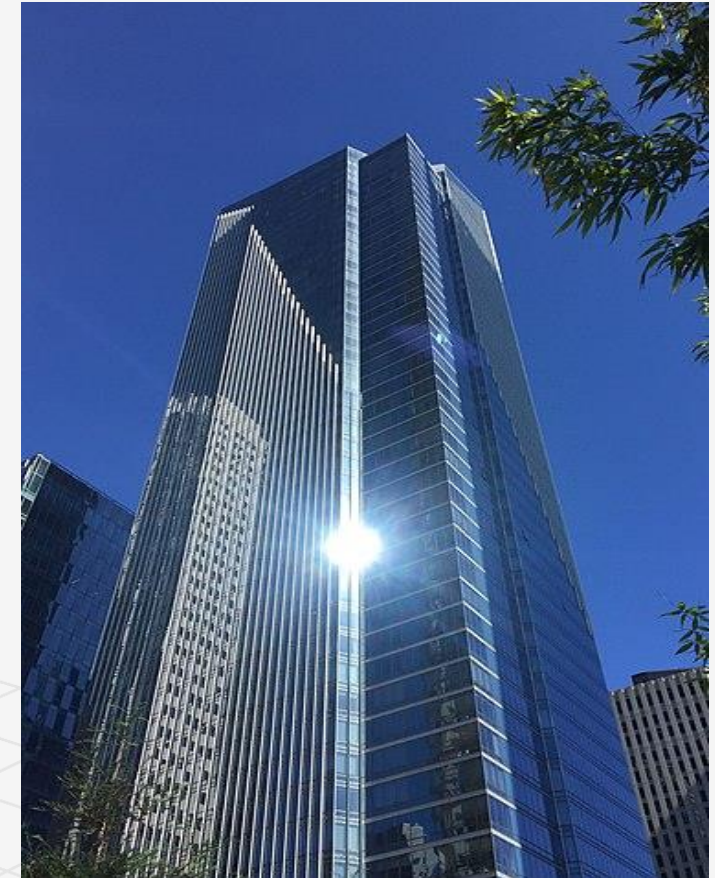
The tallest residential building in San Francisco with a **58-story**, **645-foot-tall** (197 m)

### Foundation specifications

A **10-foot-thick**, heavily reinforced concrete mat supported by approximately **940 precast, prestressed concrete piles** driven into a dense, silty sand layer present approximately **50 to 85 ft** below grade.

### Damage Cause

settlement resulted from consolidation of a deep-seated clay layer under the imposed tower loading, combined with increased effective stresses in these materials resulting from long-term lowering of the water table for construction of this and adjacent structures.





## 5. Foundation Damages

## ۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

مورد عملی شماره سه: Millennium Tower San Francisco

### Signs of Millennium tower foundation damages

Cracks occur in the foundation and paving around the tower due to tilting and sinking of the structure

موارد عملی  
آسیب به  
ساختمان‌های  
بلند



## 5. Foundation Damages

## ۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

مورد عملی شماره سه: Millennium Tower San Francisco

موارد عملی آسیب به ساختمان‌های بلند

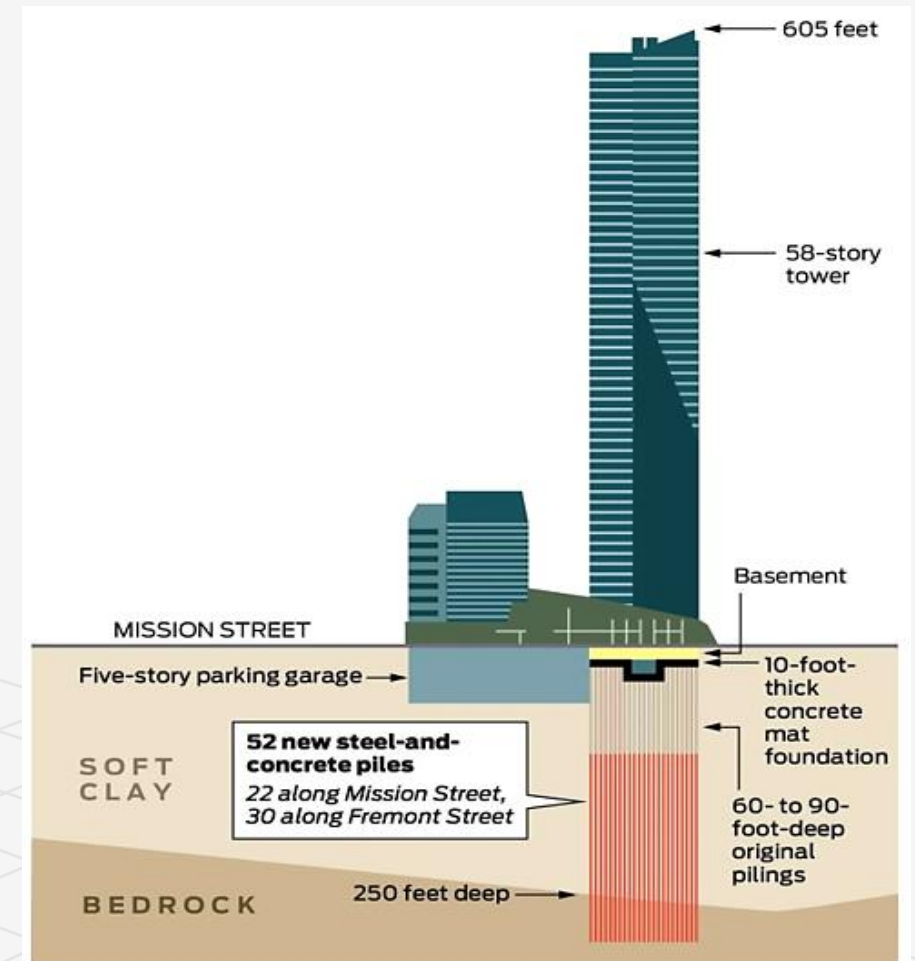
The amount of tilt and sink of the structure until 2022

Year	Tilt (cm)	Sink (cm)
2016	15	41
2018	36	46
2022	71	*



### Foundation strengthening plan

Installation of 52 piles along the north and west sides of the tower beneath the sidewalk that reach down 76.2 m



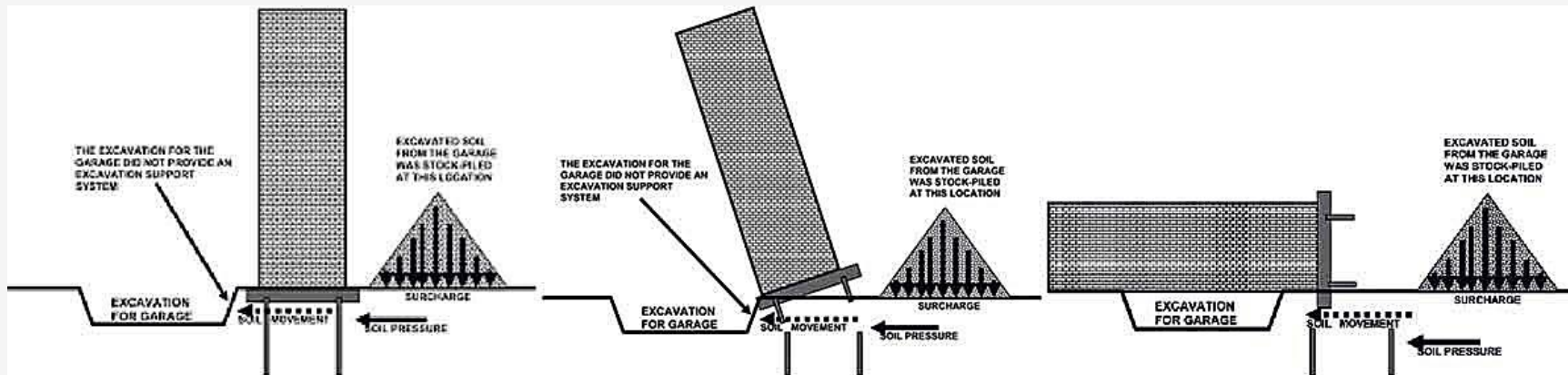


## 5. Foundation Damages

## ۵. آسیب ها و معضلات فونداسیون

موارد عملی  
آسیب به  
ساختمان های  
بلند

مورد عملی شماره چهار: واژگونی ساختمان ۱۳ طبقه مسکونی در شانگهای (۲۰۰۹)



علل احتمالی ریزش ساختمان:

- ❑ اعمال سربار در ضلع شمالی و عدم اجرای سازه نگهبان برای گود
- ❑ خرابی شمع های فونداسیون سازه
- ❑ خاک اشباع ضعیف زیر ساختمان

## 6. Case Studies

### ۶. موارد عملی

#### 1- Al Faisaliah building, Raft

- Located in **Riyadh** center
- **40-story** office tower
- **3-4 m** thick **raft**
- Area of **1600 m<sup>2</sup>** and volume of **6000 m<sup>3</sup>** for raft
- Height-to-breadth ratio of **5.8**
- Supporting a total load of just over **1.1 GN**
- Tapers from a **45 m** square to zero at the height of **263 m**
- The superficial ground deposits comprise **1–6 m** of **silty sand and gravel** overlying Jurassic limestone.

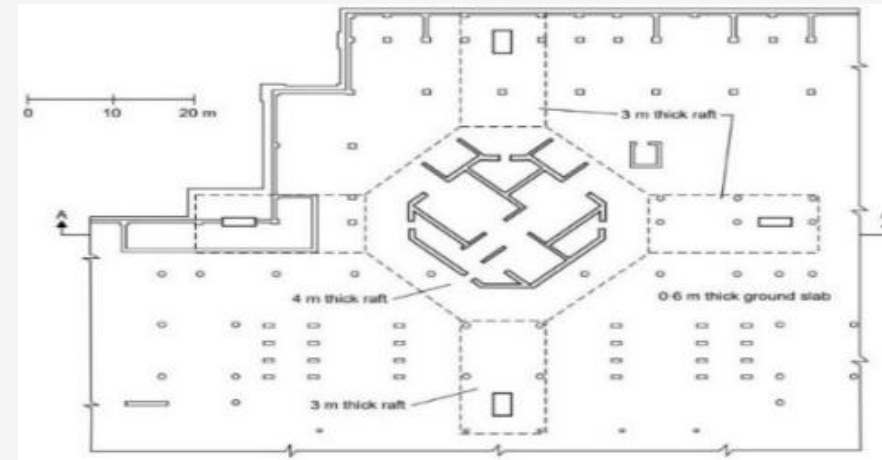
## 6. Case Studies

### ۶. موارد عملی

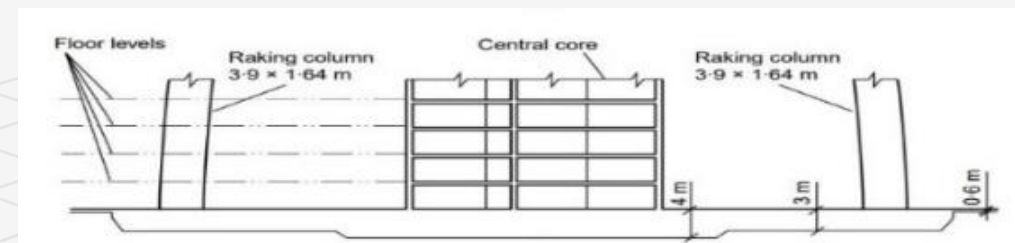
#### 1- Al Faisaliah building, Raft



(a)



(b)



(c)

Al Faisaliah building complex (a) computer simulation; (b) part basement plan; (c) section A-A

## 6. Case Studies

### ۶. موارد عملی

#### 2-Torre Latino Americana, Floating foundation and piles

Mexico City, Mexico

- **Year of Completion: 1956**
- **Height: 204 m**
- **Number of Storeys: 44**
- **Gross floor area: 27,727 m<sup>2</sup>**
- **Primary use: Office & Museum**

۱- نقش مطالعات ژئوتکنیک در شناخت خاک مسئله‌دار

۲- اهمیت شمع‌های اتکایی

۳- نمونه موفق شناورسازی

۴- انتخاب صحیح فونداسیون جهت کنترل نشست‌ها



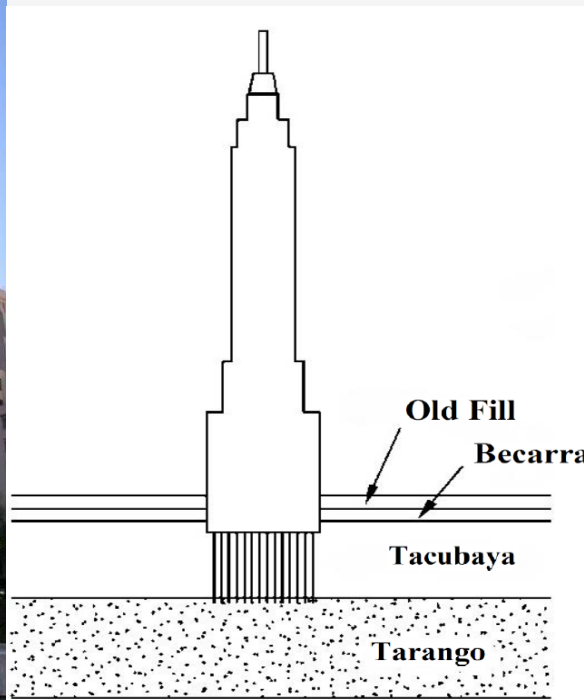
## 6. Case Studies

## ۶. موارد عملی

### 2-Torre Latino Americana, Floating foundation and piles



(a)



(b)

a) general view of Torre Latino Americana Tower, b) foundation and sublayer profile of Torre Latino Americana Tower

Soil	$C_c$
Normally consolidated medium sensitive clays	0.2 to 0.5
Chicago silty clay (CL)	0.15 to 0.3
Boston blue clay (CL)	0.3 to 0.5
Vicksburg buckshot clay (CH)	0.5 to 0.6
Swedish medium sensitive clays (CL-CH)	1 to 3
Canadian Leda clays (CL-CH)	1 to 4
<b>Mexico City clay (MH)</b>	<b>7 to 10</b>
Organic clays (OH)	10 to 15
Peats (Pt)	Long, short
Organic silt and clayey silts (ML-MH)	1.5 to 4
San Francisco Bay mud (CL)	0.4 to 1.2
San Francisco Old Bay clays (CH)	0.7 to 0.9
Bangkok clay	0.4

Typical compression Index  $C_c$  values (Holtz et al., 2011)

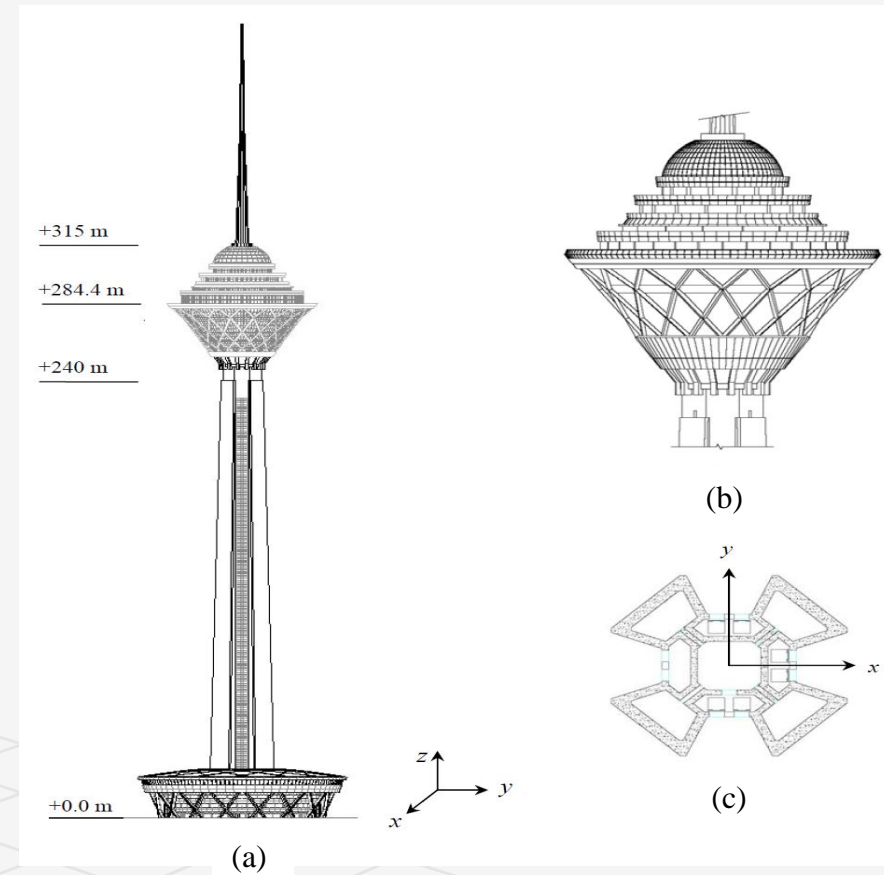
## 6. Case Studies

## ۶. موارد عملی

### 3- Milad Tower, Hybrid Raft

- Year of Completion: 2008
- Height: 453 m
- Gross floor area: 154,000 m<sup>2</sup>
- Primary use: Communication, Conference, Leisure

لزوم به‌کارگیری پی‌های عریض در سازه‌های خاص و تحت بارهای ناپایدار کننده بزرگ

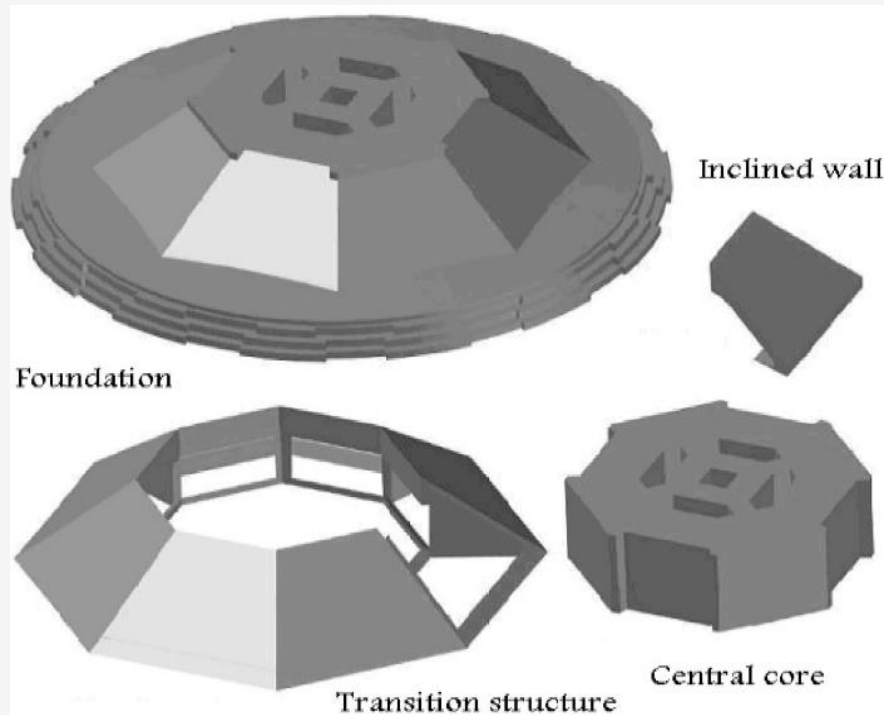


The Milad Tower: (a) completed form, (b) head structure, (c) shaft section at zero level

## 6. Case Studies

## ۶. موارد عملی

### 3- Milad Tower, Hybrid Raft



(a)



(b)

The transition structure and foundation of the Milad Tower: (a) numerical model, (b) excavation and reinforcement of foundation

## 6. Case Studies

### ۶. موارد عملی

#### 4-The Nonoalco Tower, Inverted barrel shell

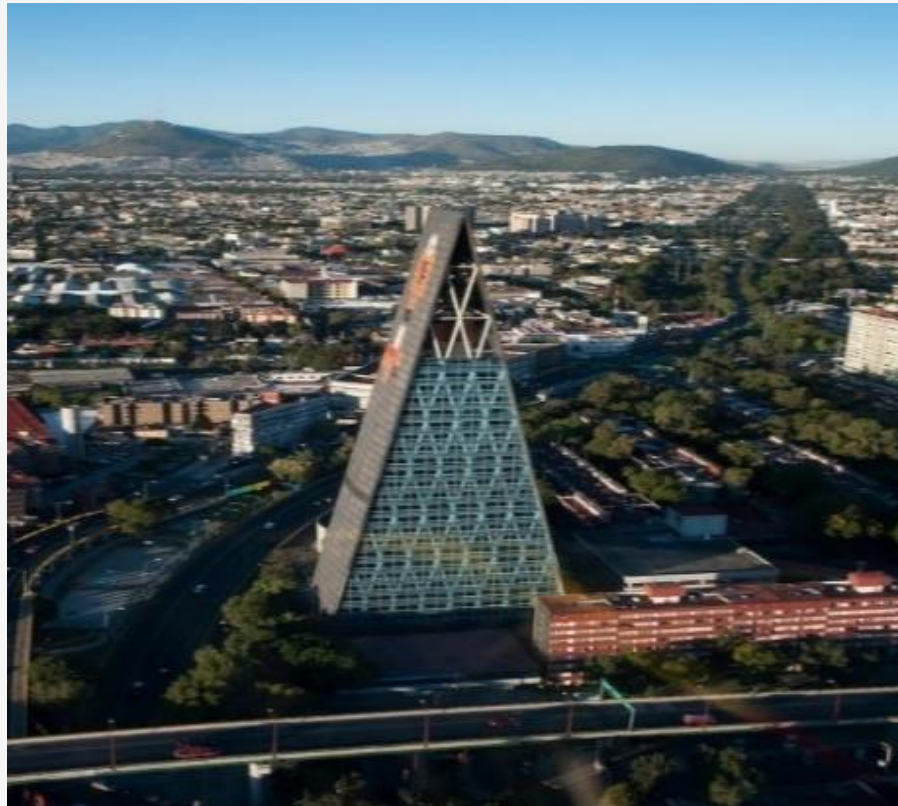
- One example of a highly ambitious development of a complicated shell foundation system
- Located in **Mexico City**
- The **inverted barrel shells** were linked by reinforced concrete girders
- Supported overall by the cast-in-place friction piles
- Estimated to have saved **50% material costs** over the conventional two-way slab foundation that was replaced
- The foundation system exhibited **increased stiffness and reduced weight**



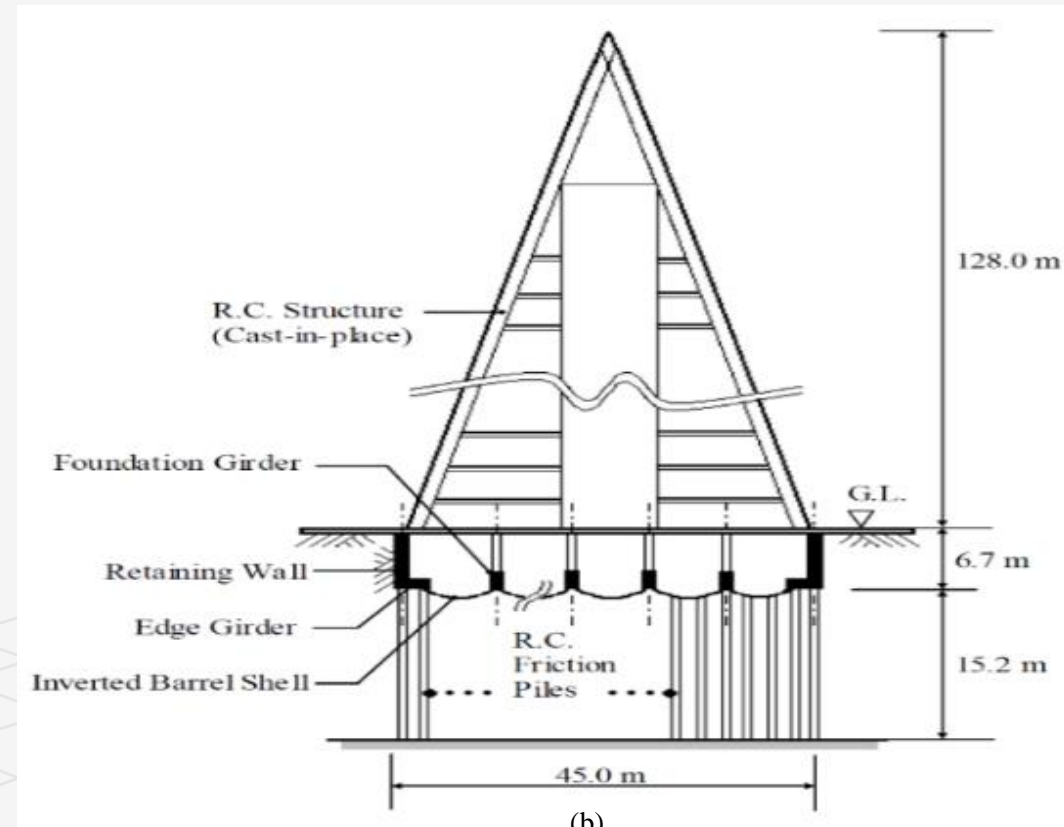
## 6. Case Studies

### ۶. موارد عملی

#### 4-The Nonoalco Tower, Inverted barrel shell



(a)



(b)

The Nonoalco Tower a) the completed form, b) section of building and foundation

## 6. Case Studies

### ۶. موارد عملی

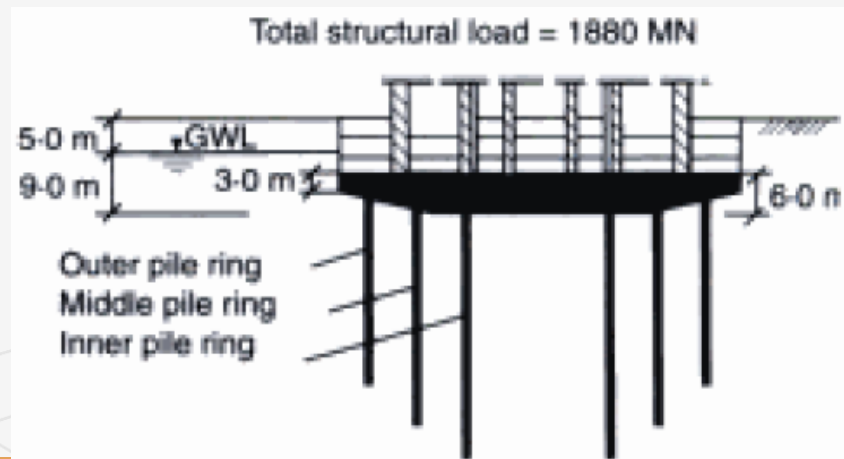
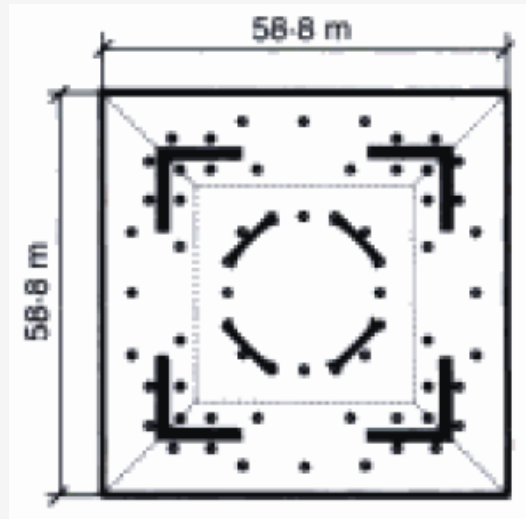
#### 5-Meseturm Building, PRF

- **60-storey**
- Located in **Frankfurt**
- **256 m height**
- The total weight of the building is about 1900 MN
- The horizontal cross-section of the tower is 41 m square
- **The raft is 60 m square**
- The required stiffness of the tower is achieved by the core.
- **Piled raft foundation** was chosen, reducing the mean settlement by more than one-half
- Mainly used for offices, and to a lesser extent for apartments and restaurants

## 6. Case Studies

## ۶. موارد عملی

### 5-Meseturm Building, PRF



## 6. Case Studies

### ۶. موارد عملی

#### 6-Burj Khalifa Tower, PRF

- The world tallest building
- Located in **Dubai**
- **160 storey**
- A podium development surrounding the tower base consisting of a 4-6 story garage.
- Founded on a **3.7 m thick raft** supported on **192 piles**
- **1.5 m diameter** piles, extending nearly **45 m** below the raft base
- Relatively weak rock
- Significant **wind loads**



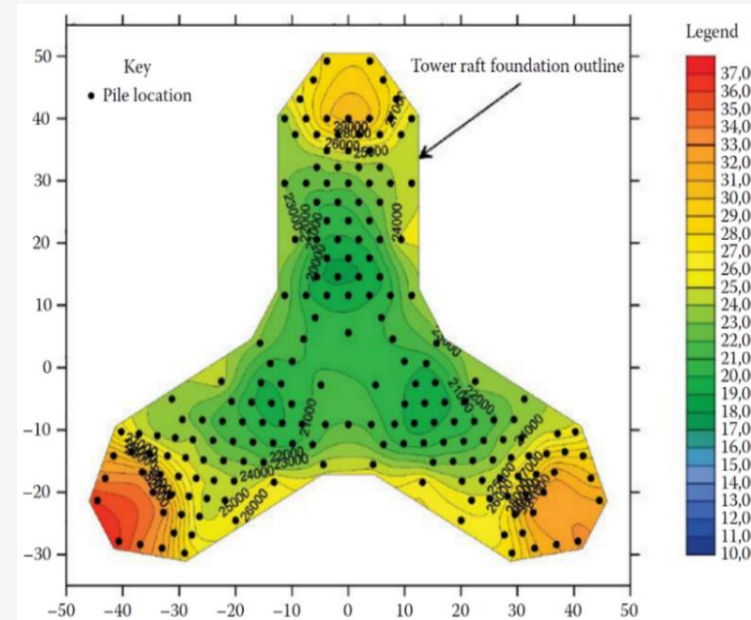
## 6. Case Studies

## ۶. موارد عملی

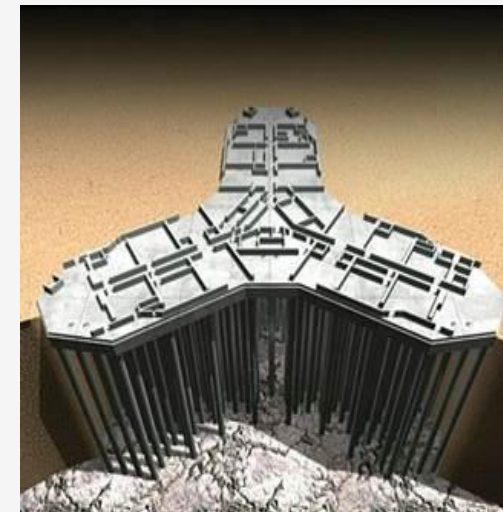
### 6-Burj Khalifa Tower, PRF



(a)



(b)



(c)

The Burj Khalifa , a) the completed form, b) contours of maximum axial load (kN) in piles of PRF (axes are dimensions of plan in meters) (Poulos & Bunce, 2008), c) piles of PRF (front view)

## 6. Case Studies

### ۶. موارد عملی

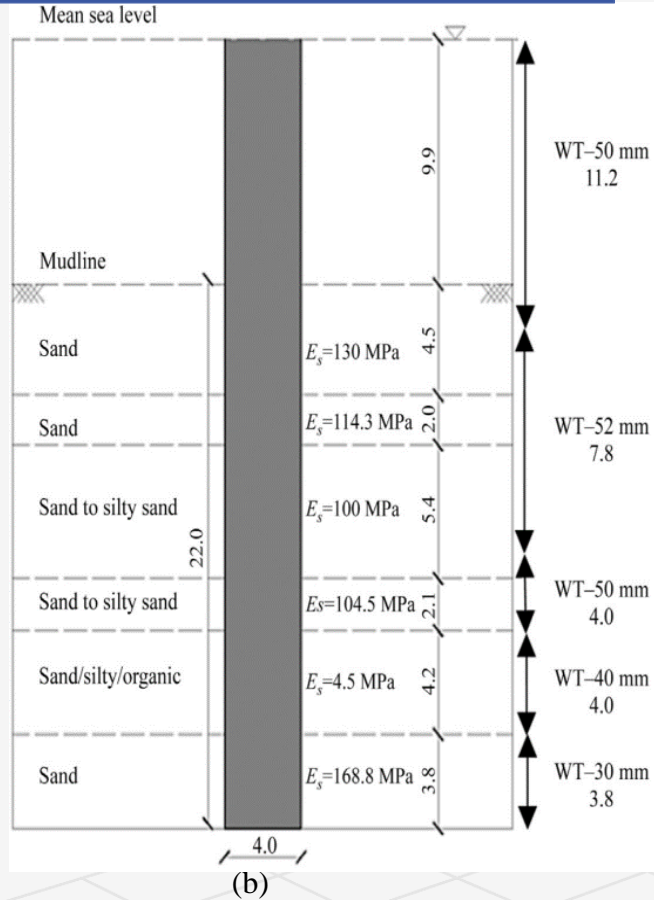
#### 7-Horns Rev 1 Offshore Wind Farm

- Built in 2003
- Located in the North Sea west of Esbjerg in **Denmark**
- Consists of **80 turbines**
- Tower **height of 60 m**
- **Rotor of 80 m diameter**
- Total park area of approximately **20 km<sup>2</sup>**
- The foundations of the turbines are **steel monopoles**
- **4 m** outer diameters for monopiles
- Monipile lengths of **30 m to 32.7 m**

# 6. Case Studies

## ۶. موارد عملی

### 7-Horns Rev 1 Offshore Wind Farm



(a)

Soil layer	Type	Depth [m]	$E_s$ [MPa]	$\gamma / \gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	$\psi$ [°]	$\nu$ [-]
1	Sand	0 - 4.5	130	20/10	45.4	15.4	0.28
2	Sand	4.5 - 6.5	114.3	20/10	40.7	10.7	0.28
3	Sand to silty sand	6.5 - 11.9	100	20/10	38.0	8	0.28
4	Sand to silty sand	11.9 - 14.0	104.5	20/10	36.6	6.6	0.28
5	Sand/silt/organic	14.0 - 18.2	4.5	17/7	27.0	0	0.28
6	Sand	18.2 →	168.8	20/10	38.7	8.7	0.28

(c)

The Horns Rev 1 Offshore Wind Farm: (a) general view, (b) schematic of monopile and soil profile

(Jalbi, Shadlou, and Bhattacharya 2017), (c) soil parameters (Augustesen et al., 2009)

## با تقدیر ویژه از همکاران:

مهندس مهدی غلامی

مهندس امیرحسین ابراهیمی پور

مهندس سید سجاد شیرانی

مهندس پویا بهرامی سامانی

**با سپاس از التفات شما**  
**Thanks for your attention**