

بسمه تعالیٰ
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 مهندسین عمران

❖ نیروهای امداد و نجات

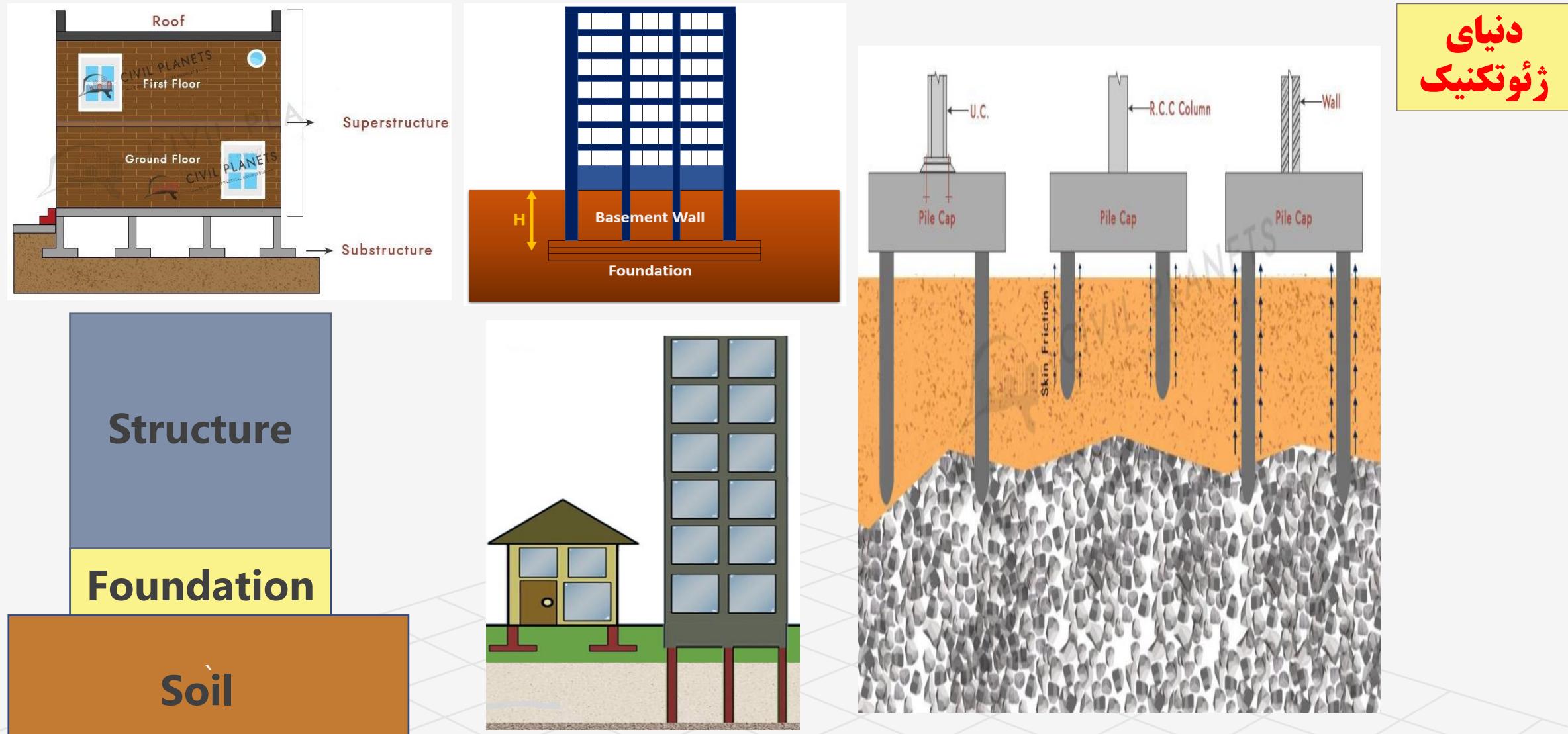
Outline

- 1 **Introduction**
- 2 **High-rise Structures (Tall Buildings)***
- 3 **Major Requirements**
- 4 **Foundation System Selection**
- 5 **Foundation Damages**
- 6 **Case Studies**

- ۱ مقدمه
- ۲ سازه‌های مرتفع (ساختمان‌های بلند) *
- ۳ ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه
- ۴ انتخاب سیستم فونداسیون
- ۵ آسیب‌ها و معضلات
- ۶ موارد عملی

1. Introduction

۱. مقدمه



1. Introduction

۱. مقدمه



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

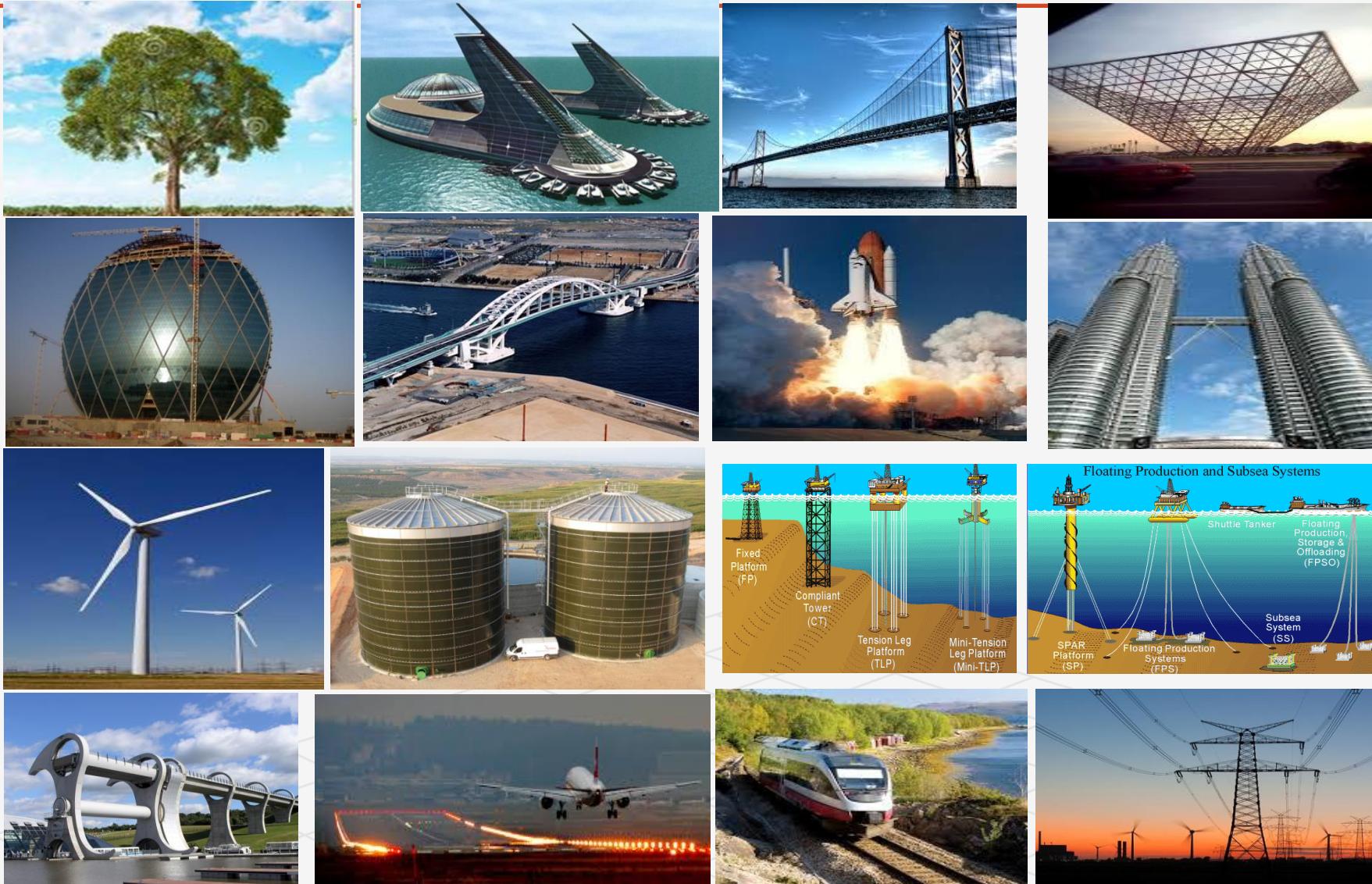


دنیای
ژئوتکنیک

1. Introduction

۱. مقدمه

سازه‌ها و اینجی



1. Introduction

۱. مقدمه

- پروژه‌های عمرانی
- مهندسی پی

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

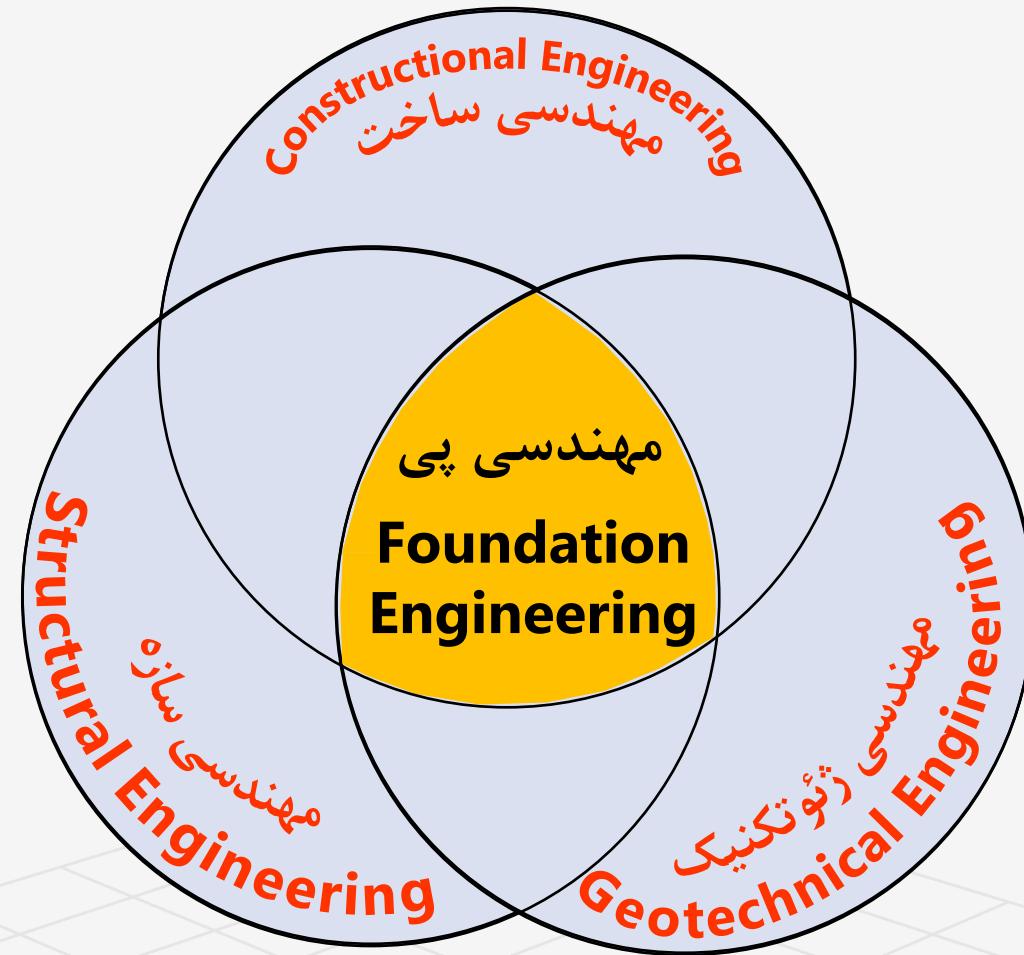
ترزاقی:

«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



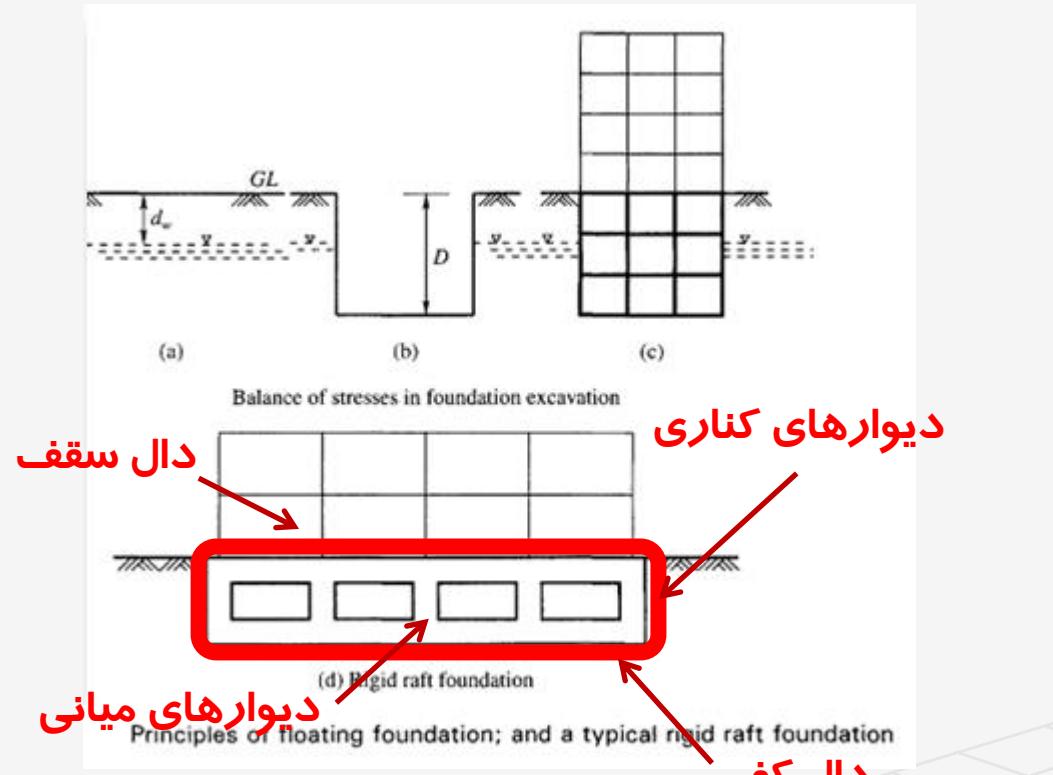
مهندسی پی

Multidisciplinary: Structural, Geotechnical and Constructional

1. Introduction

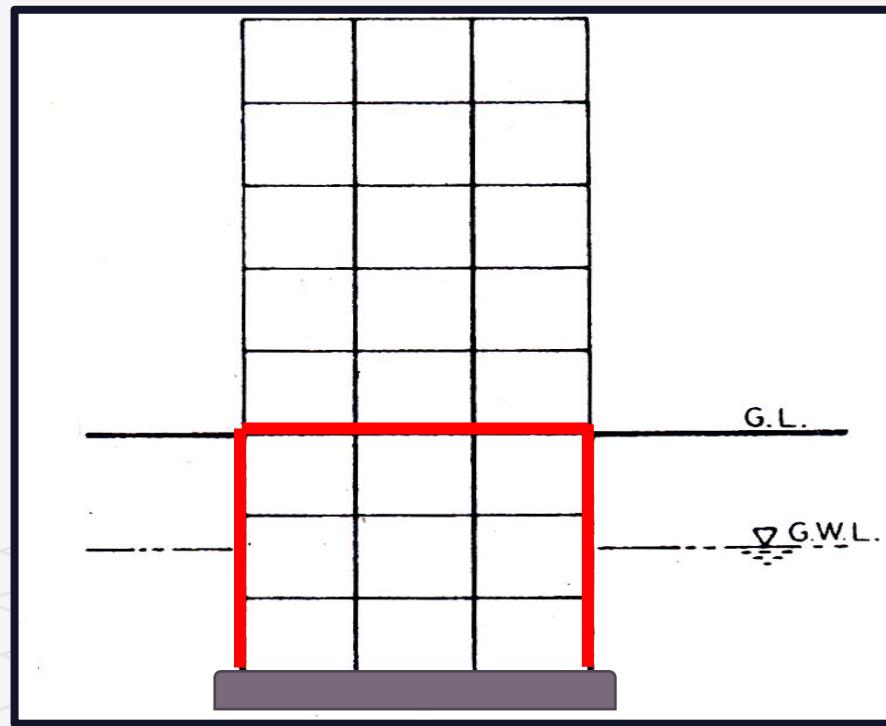
۱. مقدمه

اجزای اصلی یک
پروژه ساختمانی



سیستم فونداسیون

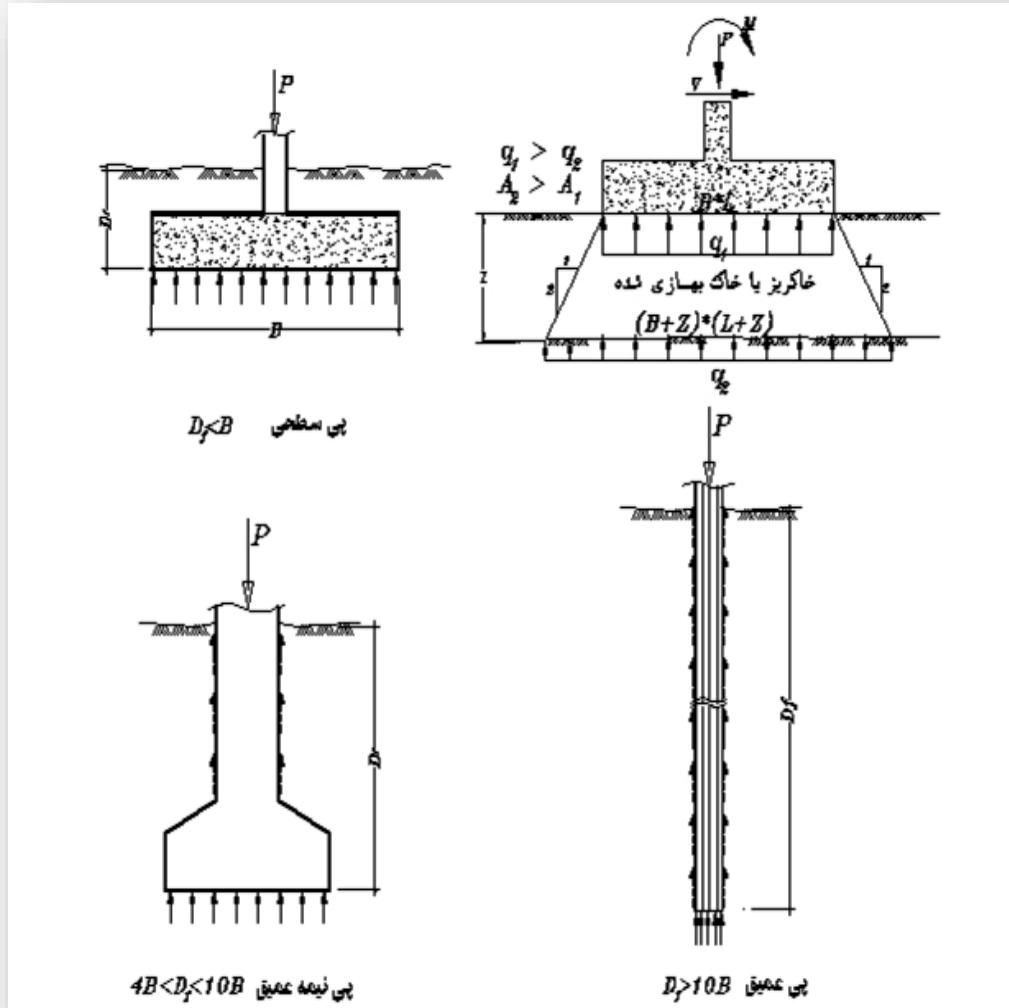
Foundation System or Footing?



پی رادیه

1. Introduction

۱. مقدمه

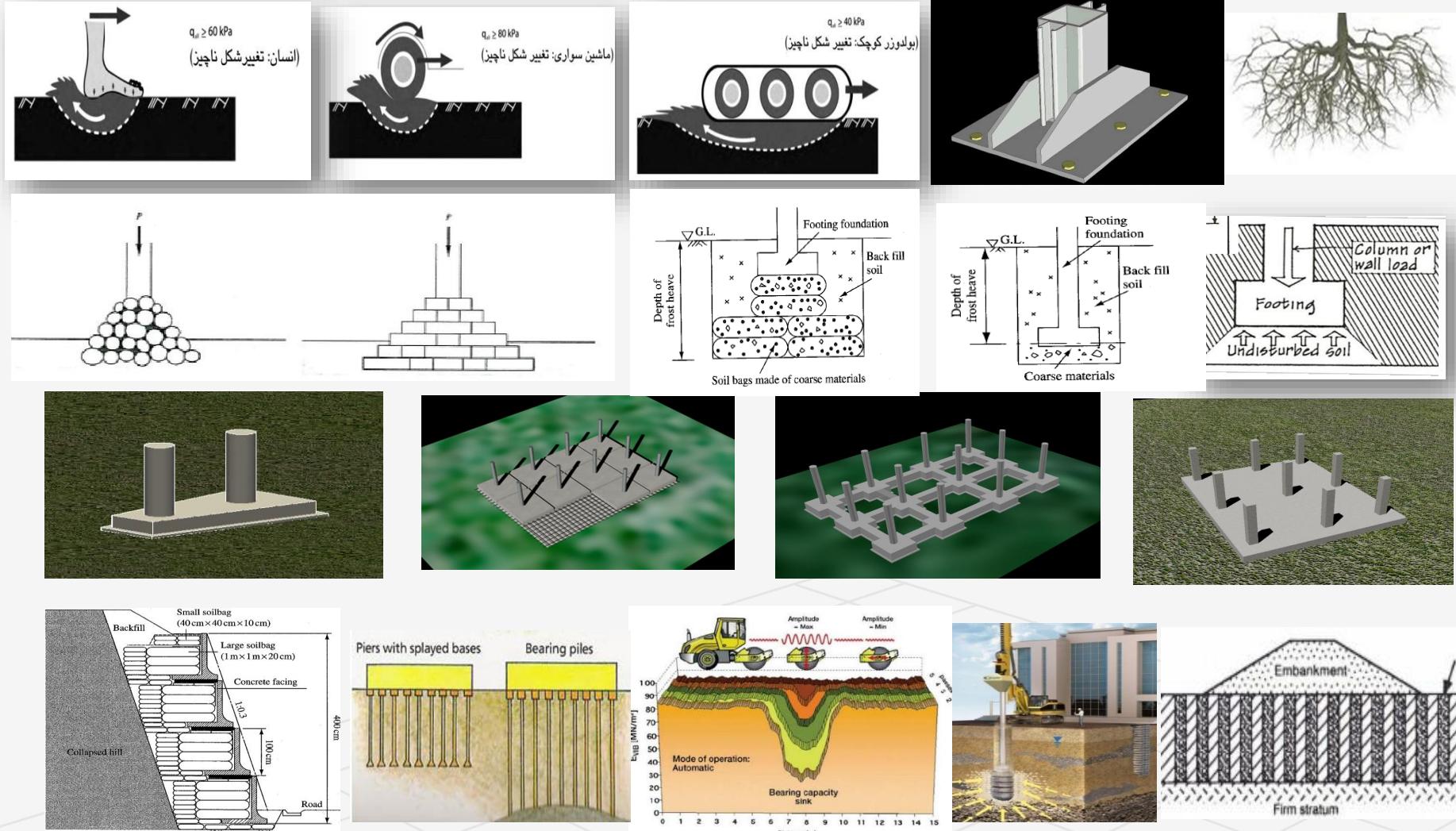


سیستم‌های پی‌سازی
بر مبنای اجرا



1. Introduction

۱. مقدمه

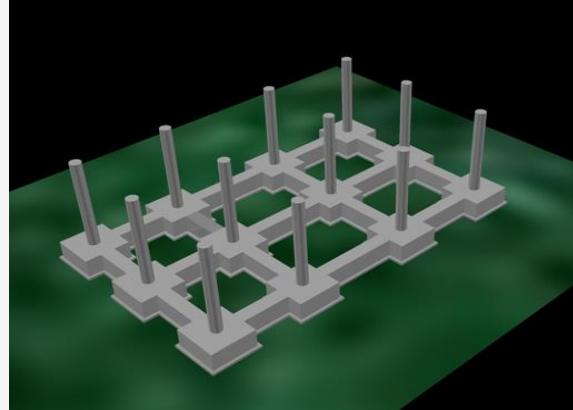
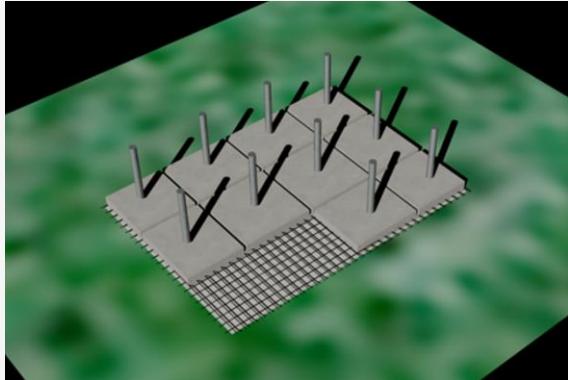


پی‌های
متداول

پی عنصر
انتقالی بین
سازه و
زمین

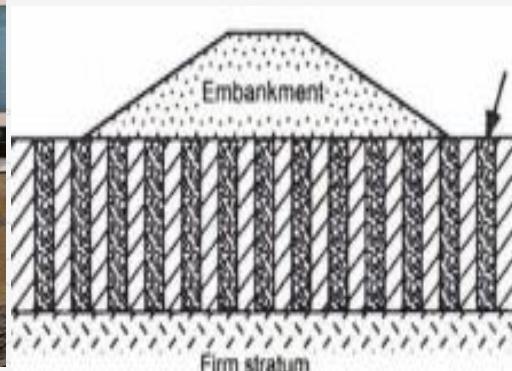
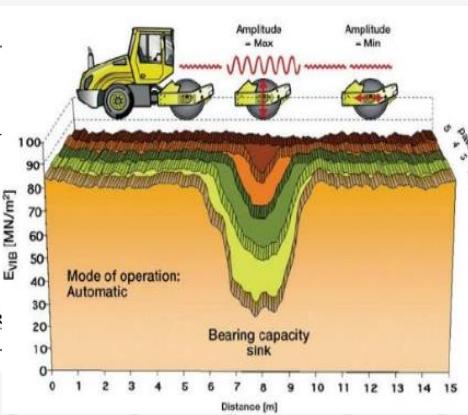
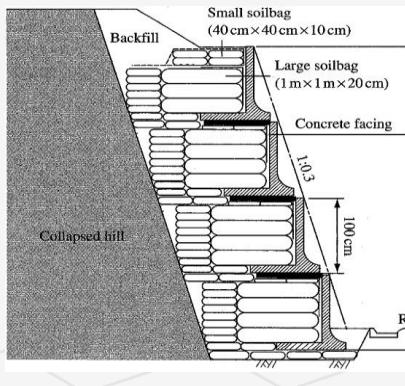
1. Introduction

۱. مقدمه



انواع
فونداسیون‌ها:
سطحی، سطحی
+ بهسازی

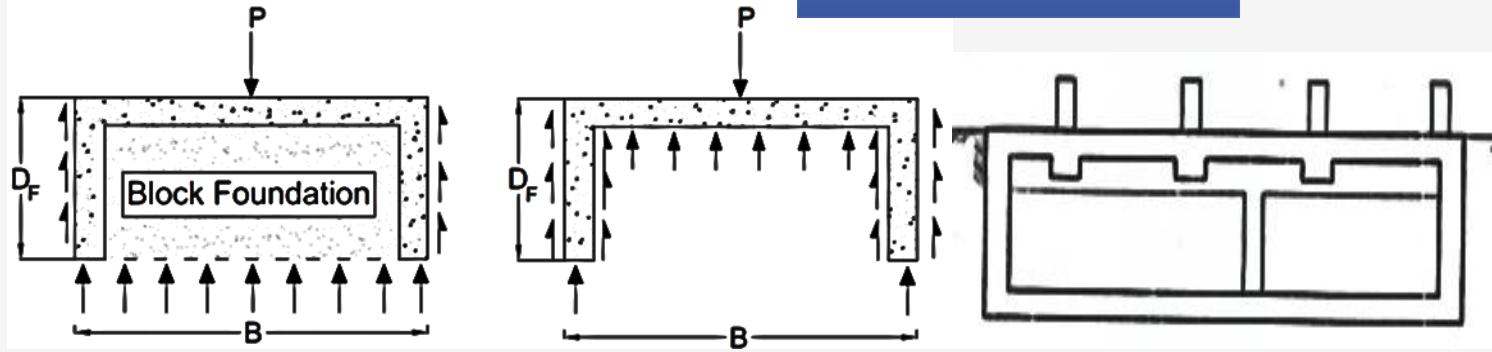
سطحی + بهسازی



1. Introduction

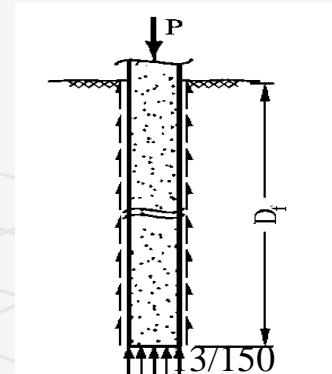
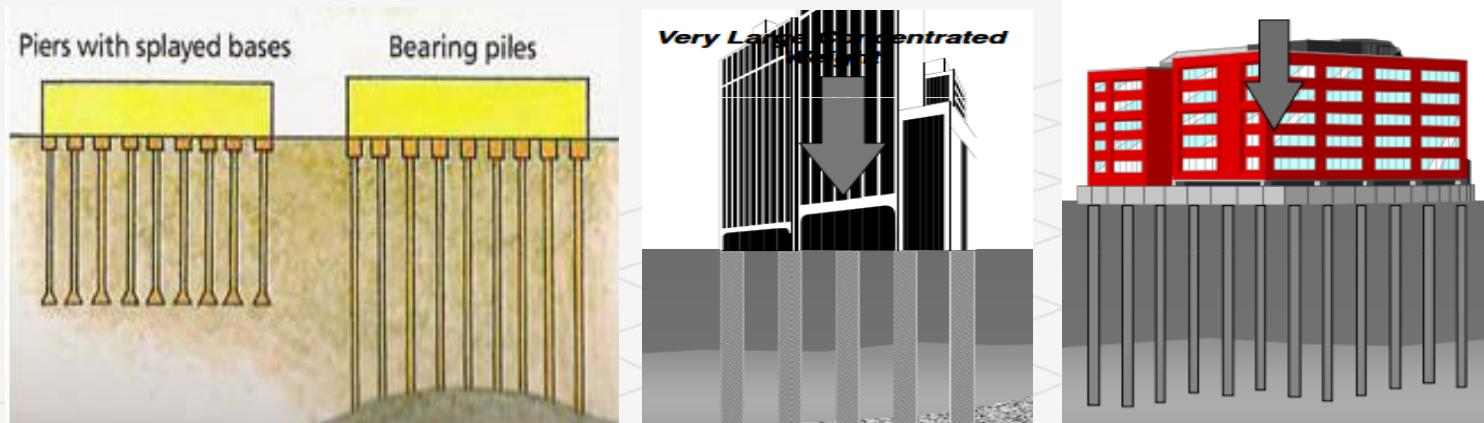
۱. مقدمه

پی نیمه عمیق



انواع
فونداسیون‌ها:
نیمه عمیق،
عمیق

پی عمیق
 $D/B > 10$

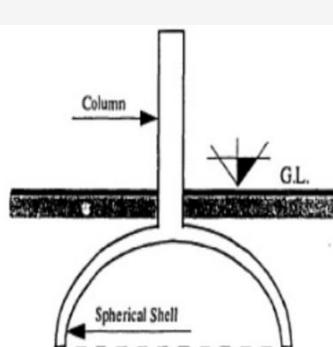
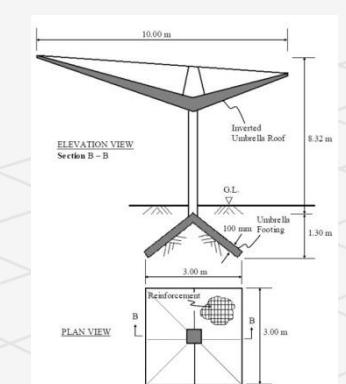
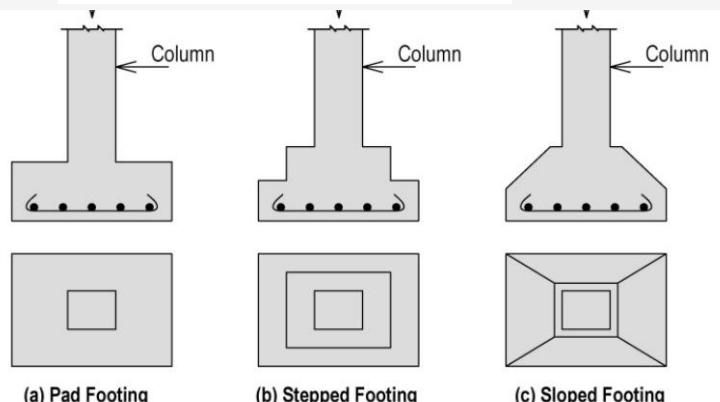
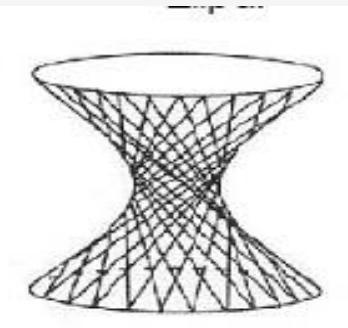
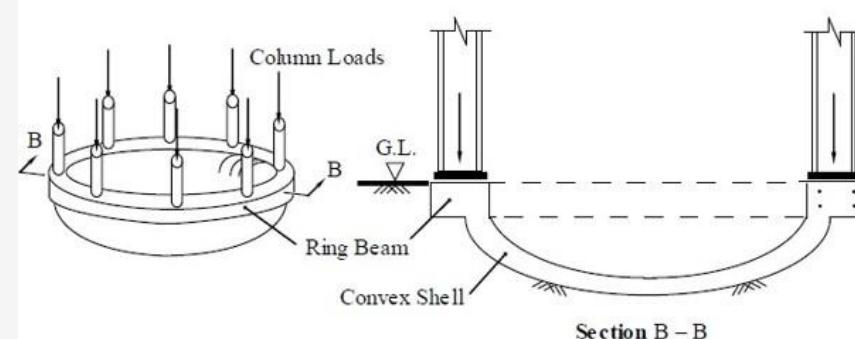
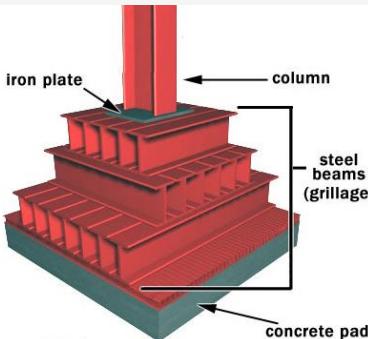


1. Introduction

۱. مقدمه

- 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

**فونداسیون‌های
غیرمعارف**



1. Introduction

۱. مقدمه



قبل از ساخت روسازه (سازه‌های متداول)

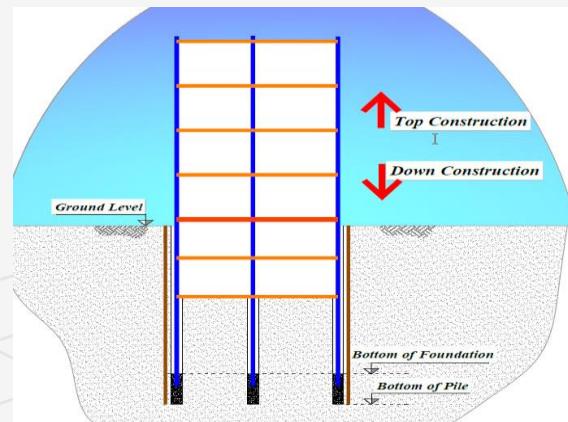
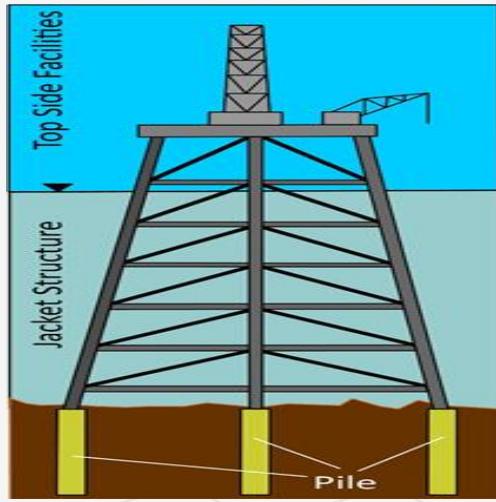
پس از ساخت روسازه (ساخت سکوها در دریا)

ساخت همزمان پی و روسازه (Top-Down Construction)

نیاز حداقل به ساخت پی (اجرای سازه روی سنگ)

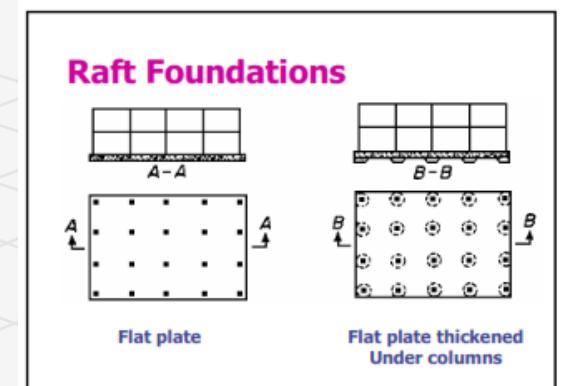
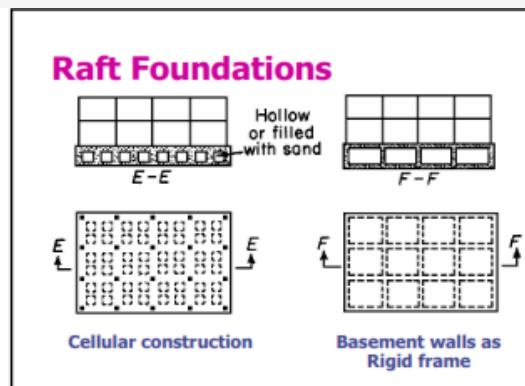
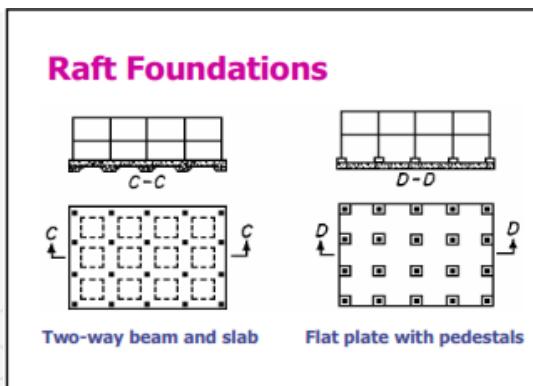
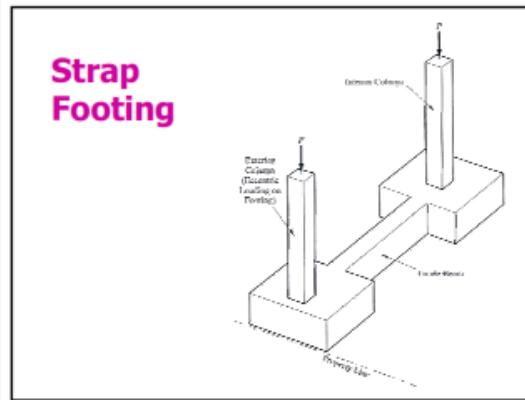
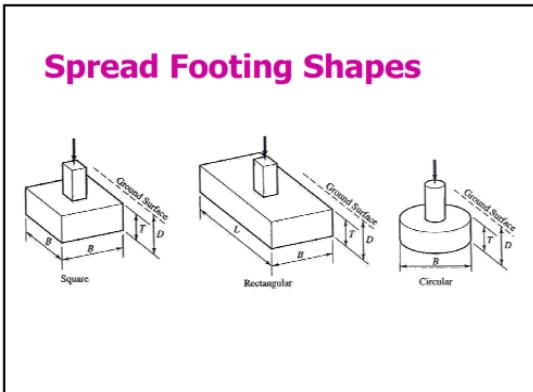
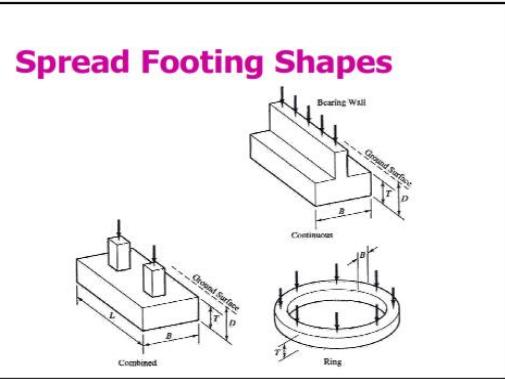
تکمیل و ترمیم پی‌های موجود بر اساس ارتقا و تغییرات روسازه

**زمانبندی
اجرای پی‌ها**



1. Introduction

۱. مقدمه



پی‌های سطحی

- پی‌های منفرد
- پی‌های مرکب
- پی‌های پیوسته و نواری
- پی‌های شبکه‌ای
- پی‌های گسترده

1. Introduction

۱. مقدمه

**معضلات
فونداسیون‌های
سطحی و عمیق**

پی سطحی

- ضعف ظرفیت باربری برای تحمل سازه‌های سنگین و بلند
- معصل نشستهای کلی و غیریکنواخت
- ناپایداری در برابر بارهای جانبی، لنگرهای نیروهای برکنش
- ارائه حداقل اندرکنش با خاک بستر (عدم بسیج اصطکاک جداری و پدیده محصور شدن)

پی عمیق

- 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 غیربینه در طراحی و بهره‌برداری

راه حل میانه: بهسازی، پی‌های نیمه‌عمیق

1. Introduction

۱. مقدمه

بهمسازی 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

- 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

• اهداف بهسازی:

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 filter 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 sand 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

۱- عملیات خاکی (Earth work)

۲- مترادف سازی (Densification)

۳- بهسازی فیزیکی- شیمیایی (Physical & Chemical Modification)

۴- بهسازی هیدرولیکی (Hydraulic modification)

۵- مسلح سازی (Reinforcement)

۶- متدهای نوین (Bioremediation)

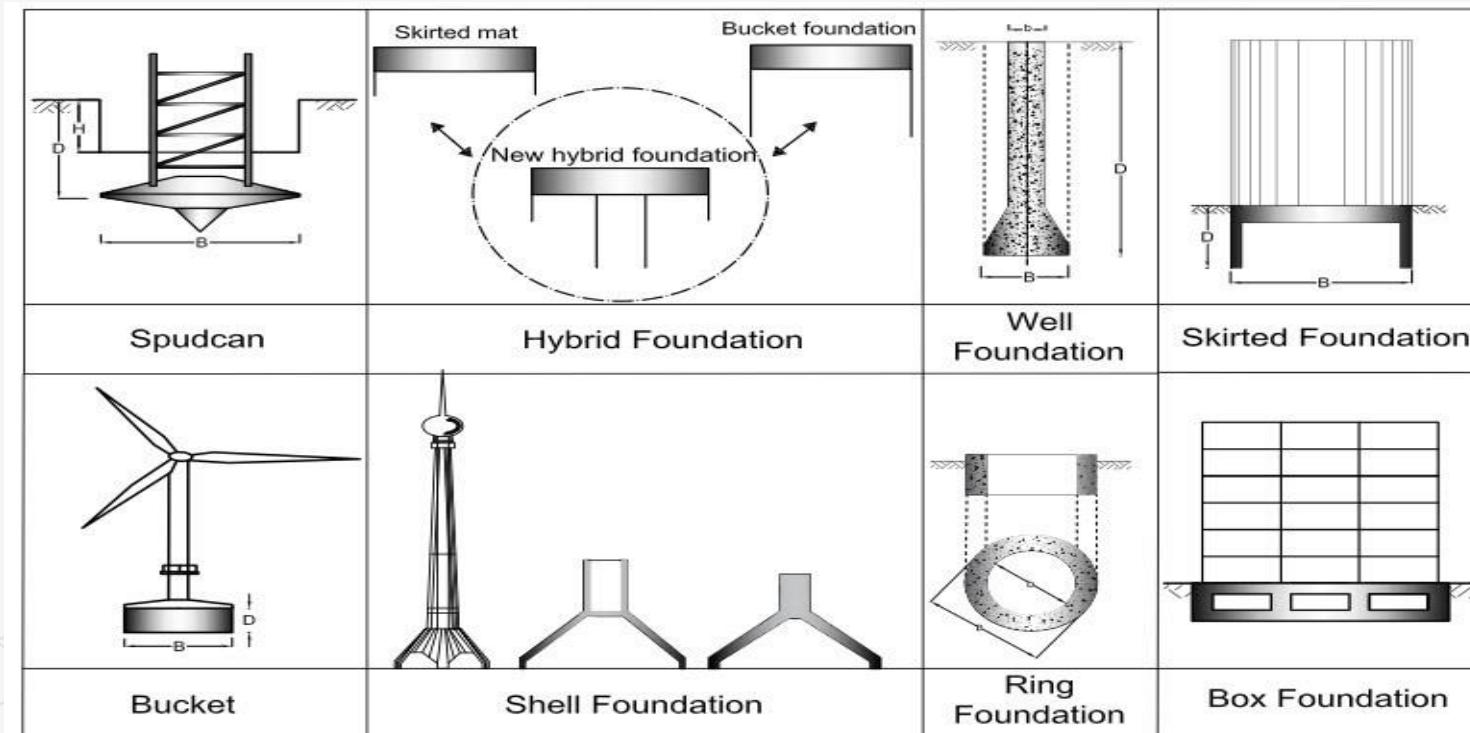
دسته‌بندی کلی روشهای
بهسازی خاک

1. Introduction

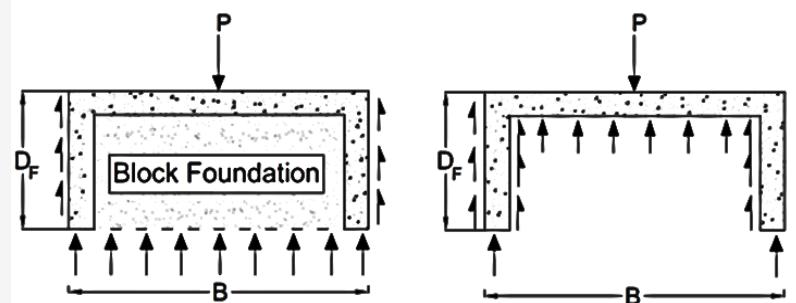
۱. مقدمه

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

انواع پی‌های
نیمه عمیق

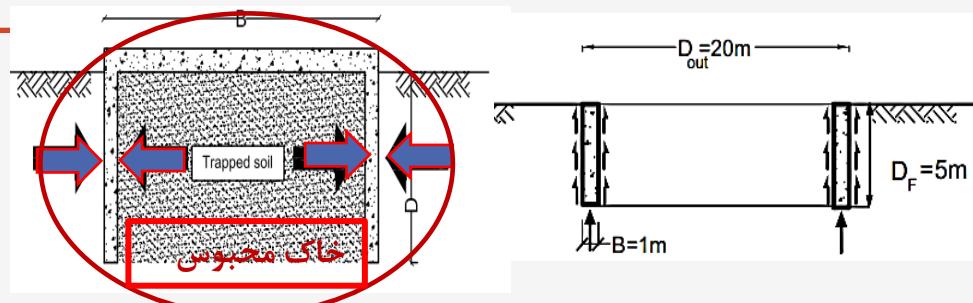


1. Introduction



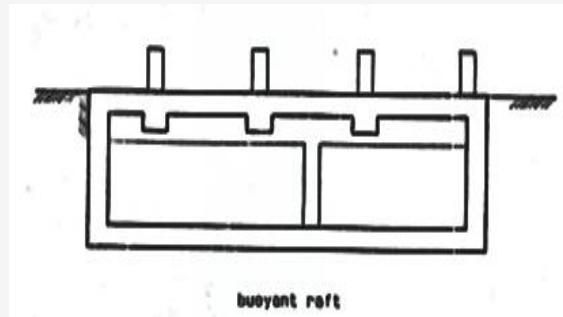
پی دامنه‌دار

$$0.5 < D/B < 2$$

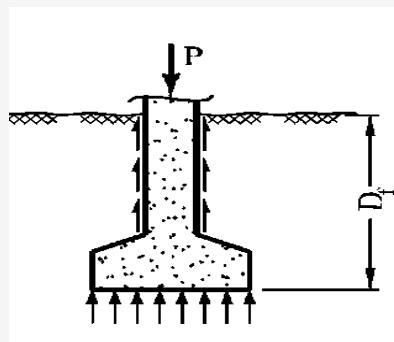


پی بلوکی

پی پوسته‌ای



پی شناور



پی چاهی $3 < D/B < 6$

افزایش پایداری

محصورشدگی و بهبود باربری
کاهش نشت

$0.5 < D/B < 4$
باربری کف و جدار

مقایسه عملکردی و
هندسی پی‌های مختلف:
پی‌های ترکیبی و
نیمه عمیق

1. Introduction

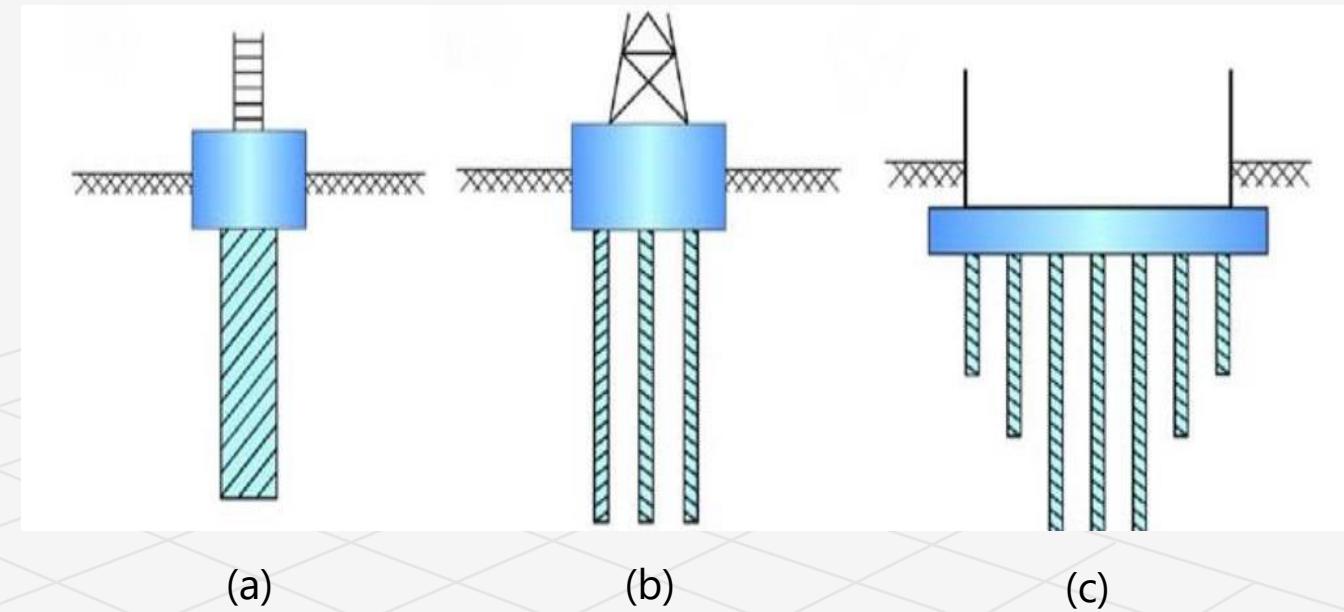
۱. مقدمه

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

شموعهای H شکل



شموعهای لولهای ته باز



پیهای عمیق

شموعهای لولهای ته بسته



شموعهای لولهای ته بسته با غلاف نوک تیز انتهایی

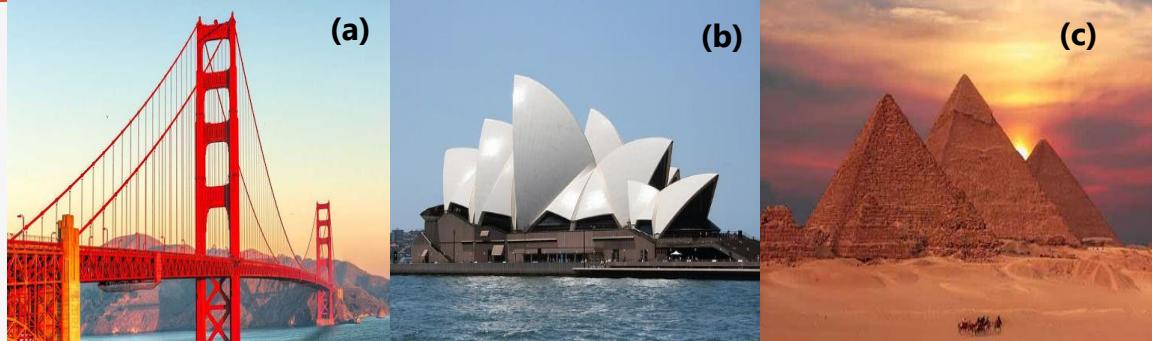


نمونه‌هایی از انواع پیهای عمیق

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)

طبقه‌بندی پی‌ها
بر اساس هندسه

۱- پی‌های خطی: انواع شمع‌های تک

1. Linear Foundations: Single Piles

۲- پی‌های صفحه‌ای: انواع پی‌های سطحی و پوسته‌ای

2. Planar Foundations: Shallow & Shell Foundations

۳- پی‌های حجمی: گروه شمع، رادیه مرکب و ...

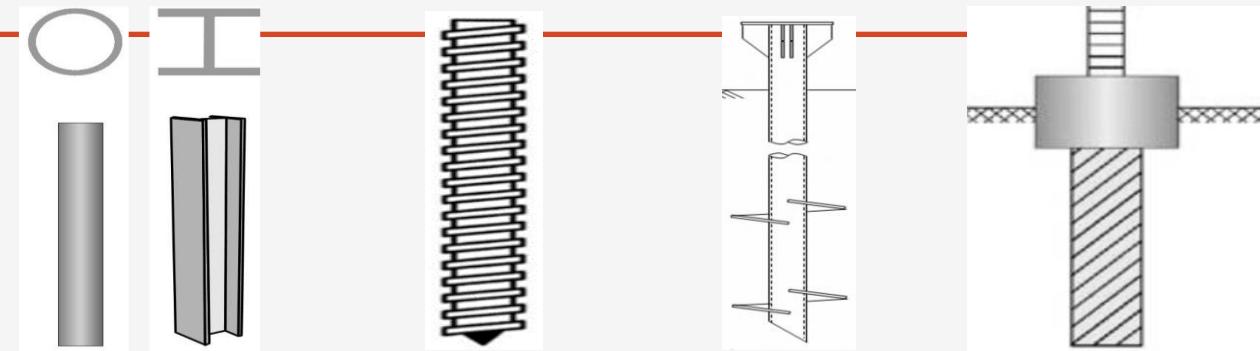
3. Volumetric (Massive) Foundations: PRF & so on

دسته‌بندی کلی پی‌ها بر
اساس هندسه

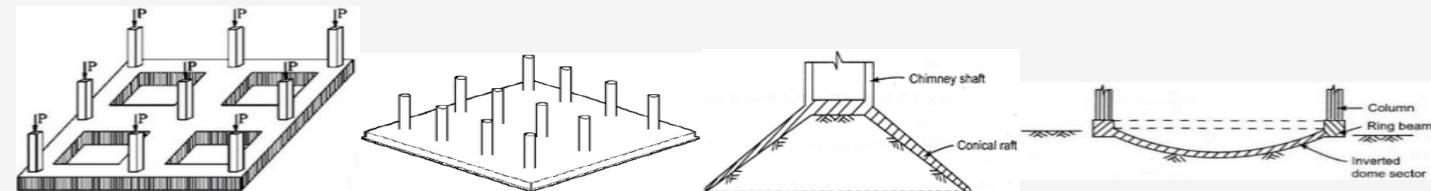
1. Introduction

Eslami et al., 2022a

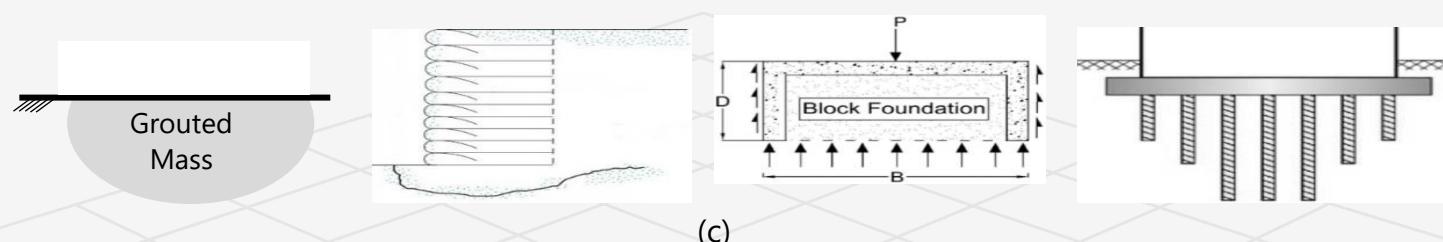
۱. مقدمه



(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. Section-act Foundations:

Different types of shallow foundations

2. Vector-act Foundations:

Different types of single piles

3. Surface-act Foundations:

Different types of shell foundations

4. Block-act Foundations:

Bucket foundations, Mass treated soil & so on

5. Hybrid Foundations:

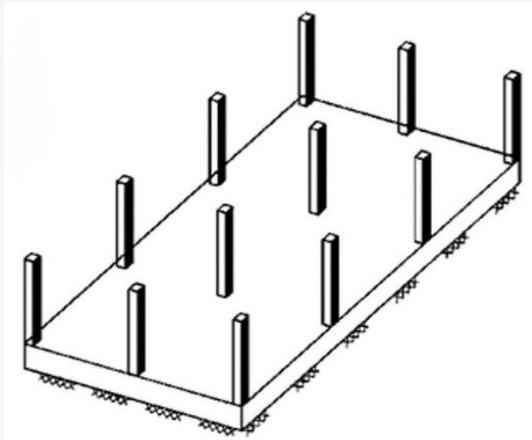
PRFs, Group Piles & so on

رسنگانی کلی پی‌ها بر اساس
سیستم انتقال بار

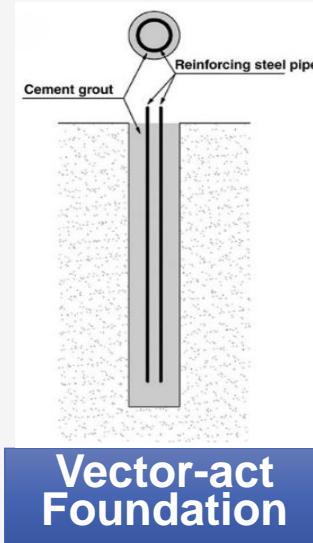
1. Introduction

۱. مقدمه

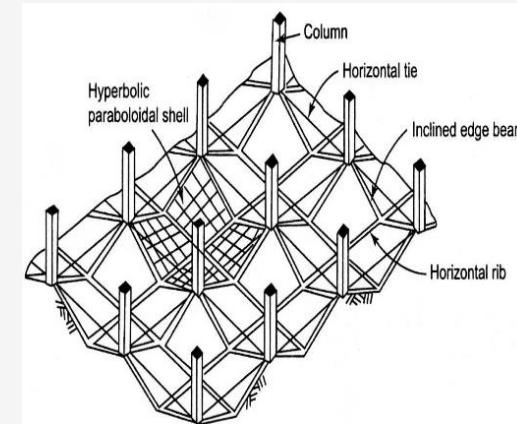
Eslami et al., 2022b



Section-act Foundation

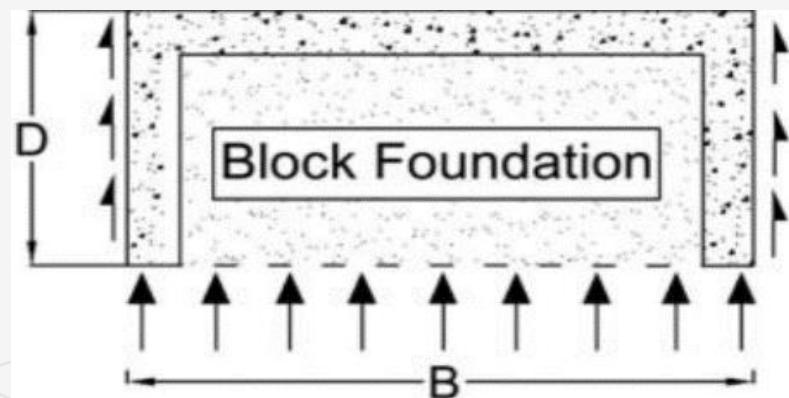


Vector-act Foundation

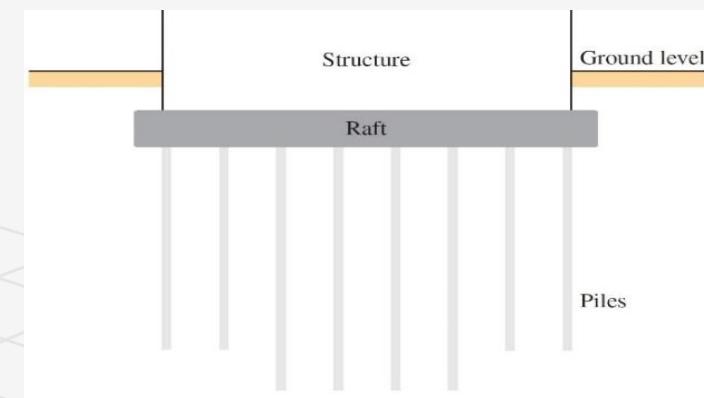


Surface-act Foundation

طبقه‌بندی پی‌ها
بر اساس سیستم
انتقال بار



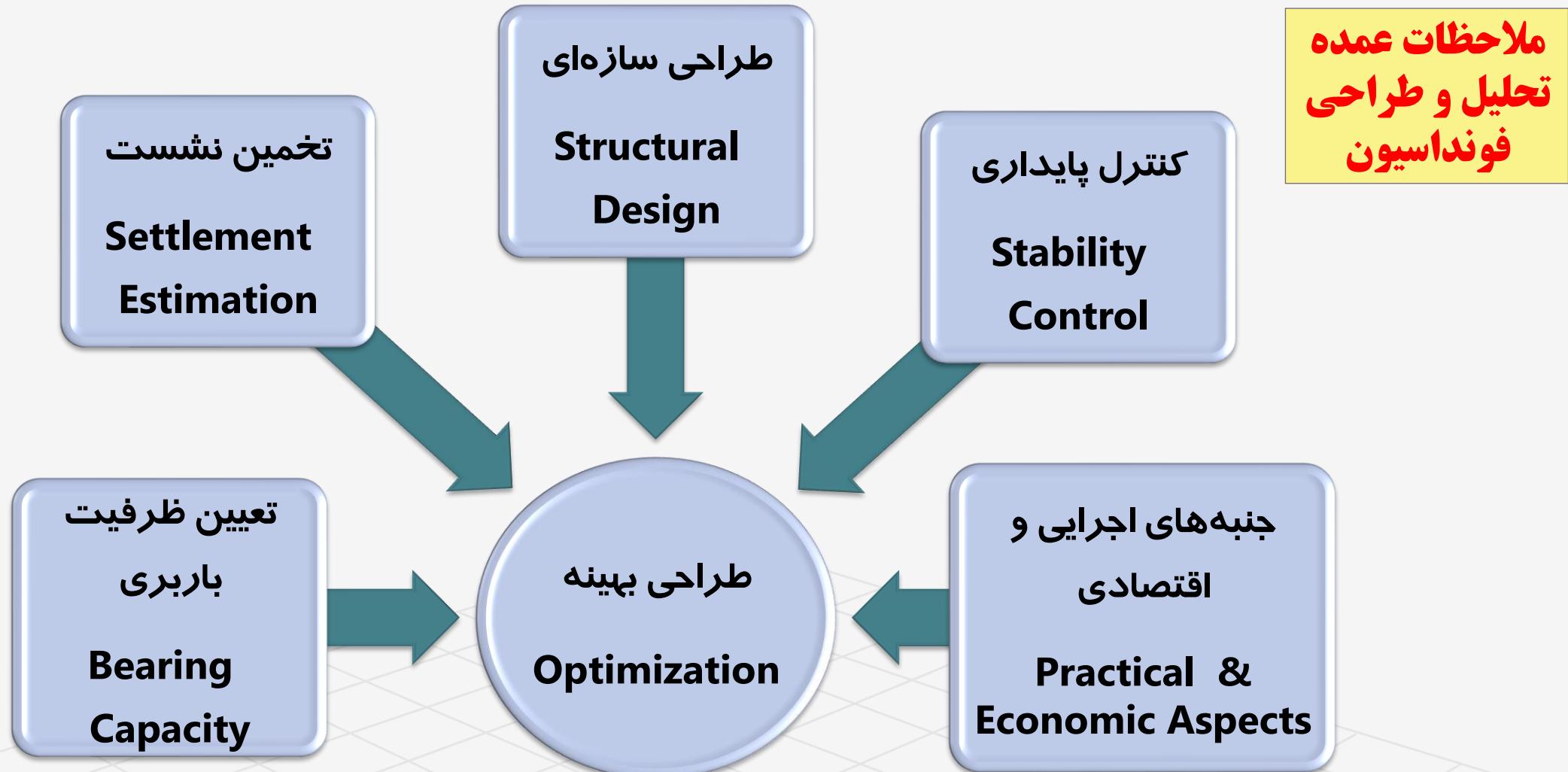
Block-act Foundation



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**

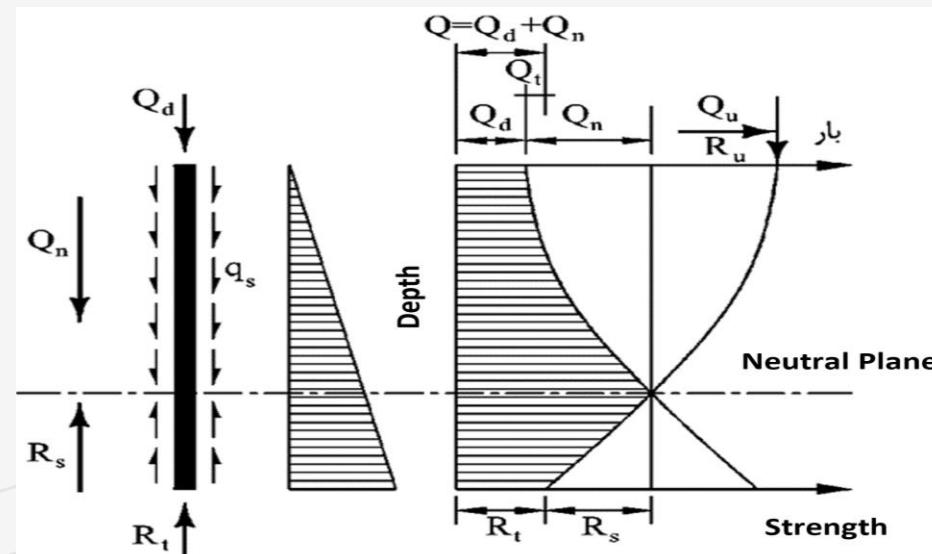
3. Major Requirements

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

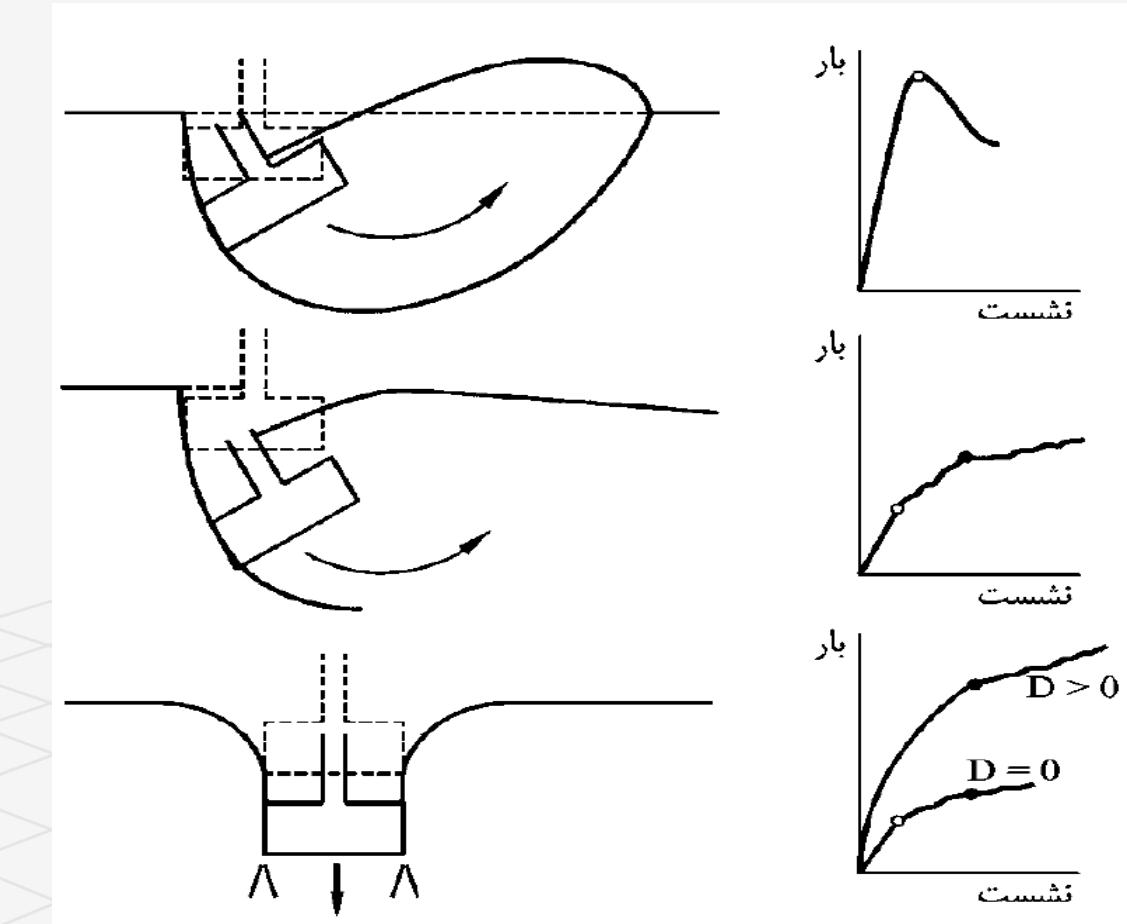
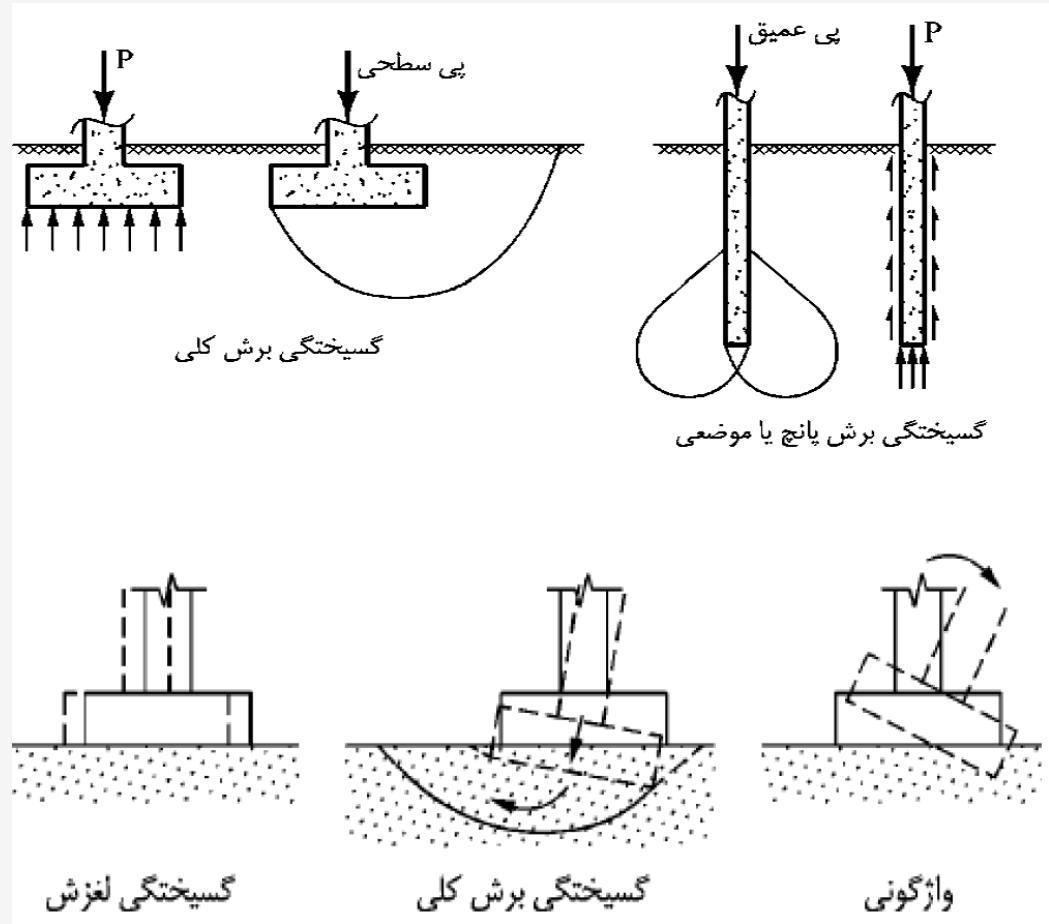
- شرایط خاک: پارامترهای مقاومتی و سختی
- نوع خاک
- شرایط تراکم
- هندسه پی: عمق استقرار
- طول
- عرض
- ضخامت
- شرایط محیطی: محصور شدگی
- آب زیرزمینی
- بارگذاری
- هندسه زمین

عوامل موثر
در طراحی
ژئوتکنیکی

3. Major Requirements

۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

mekanizmehaye gashmaghi



3. Major Requirements

Terzaghi (1943)

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

C = cohesion parameter

\bar{q} = surcharge around the foundation equals to γD_f

γ = average effective unit weight of the soil below and around the foundation

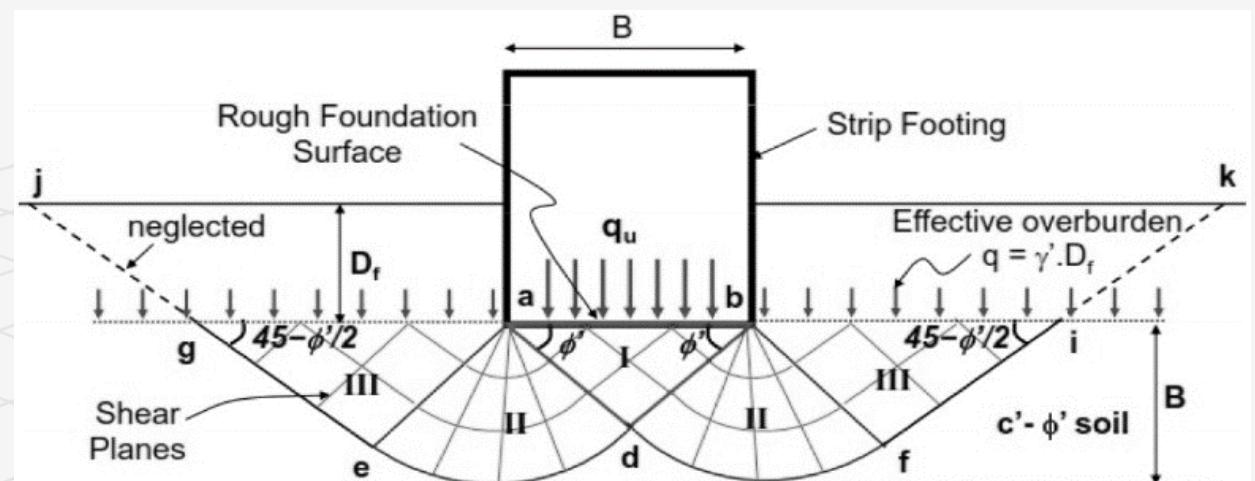
B = foundation width

D_f = embedment depth of the foundation

N_c , N_q , N_γ = non-dimensional factors

۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

رابطه پایه ظرفیت باربری پی‌های سطحی



3. Major Requirements

۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

• پارامترهای مقاومت برشی خاک اطراف و زیر پی

چسبندگی (C)

زاویه اصطکاک داخلی (φ)

فاکتورهای
مهم در ظرفیت
باربری

$$\uparrow C \quad \uparrow q_{ult}$$

$$\uparrow \varphi \quad \uparrow q_{ult}$$

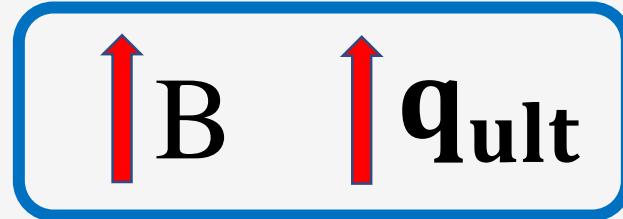
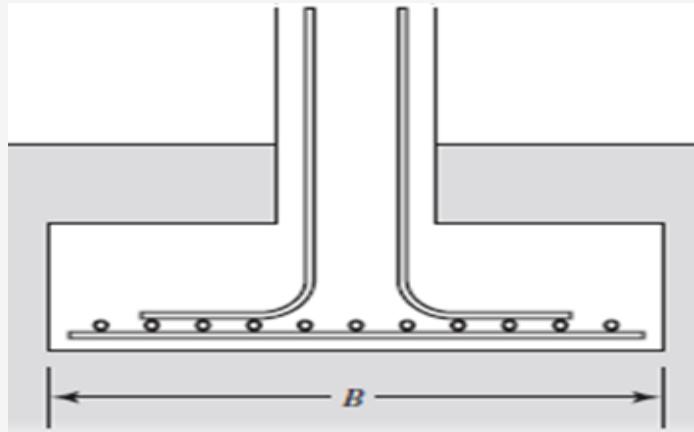
• سطح آب زیرزمینی

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

اعمال ضرایب کمتر از واحد



3. Major Requirements



۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

- **وقوع آب‌شستگی**

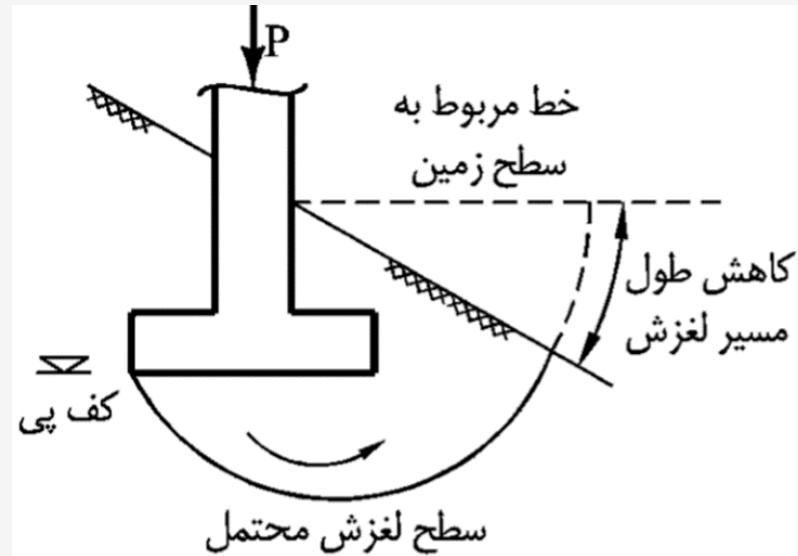
**فاکتورهای مهم
در ظرفیت
باربری**

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

**شیب دار بودن زمین
گودبرداری**

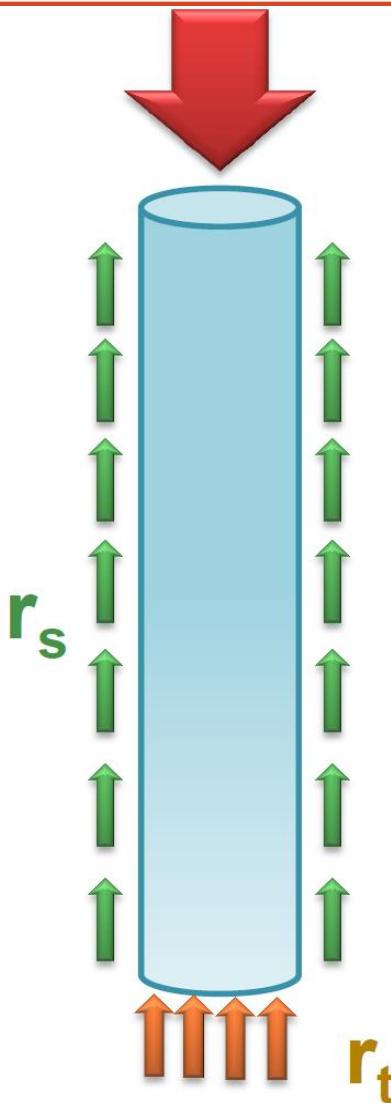
**فاکتورهای
 مهم در ظرفیت
 باربری**

کاهش طول مسیر لغزش

q_{ult}

3. Major Requirements

۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه



$$R_t = r_t \cdot A_t$$

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

$$R_u = R_t + R_s$$

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

- مشخصات خاک
- عمق استقرار
- مشخصات شمع

ظرفیت باربری پی عمیق

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

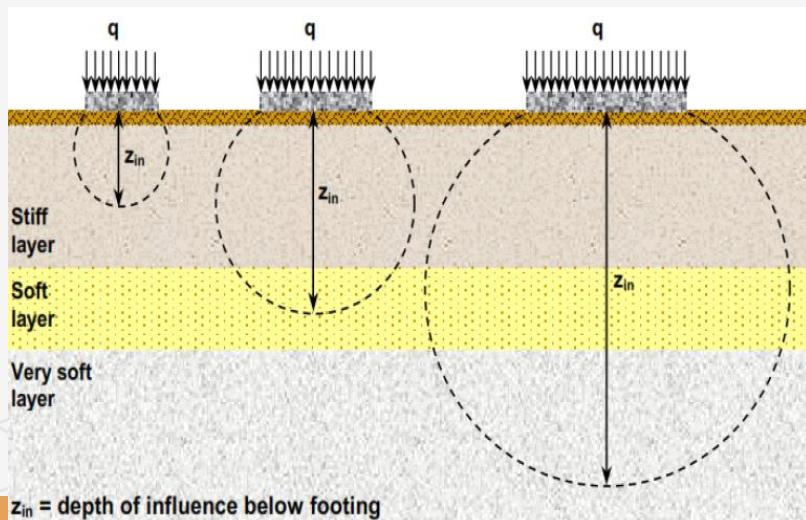
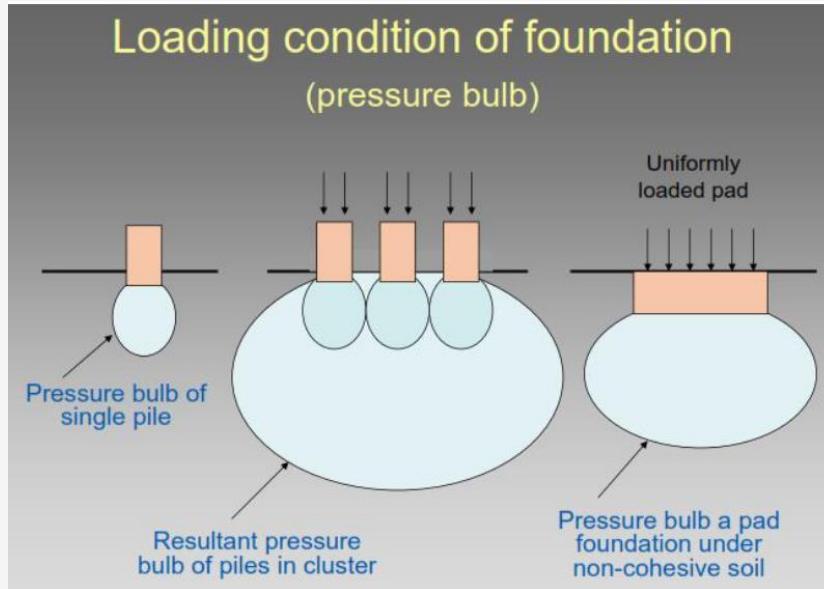
D_f عمق استقرار شمع در زمین

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



- هم‌جوارسازی

نشست پی‌های سطحی

- نشست‌های القایی

- گودبرداری در مجاورت پروژه

- بارهای سیکلی و دینامیکی

3. Major Requirements

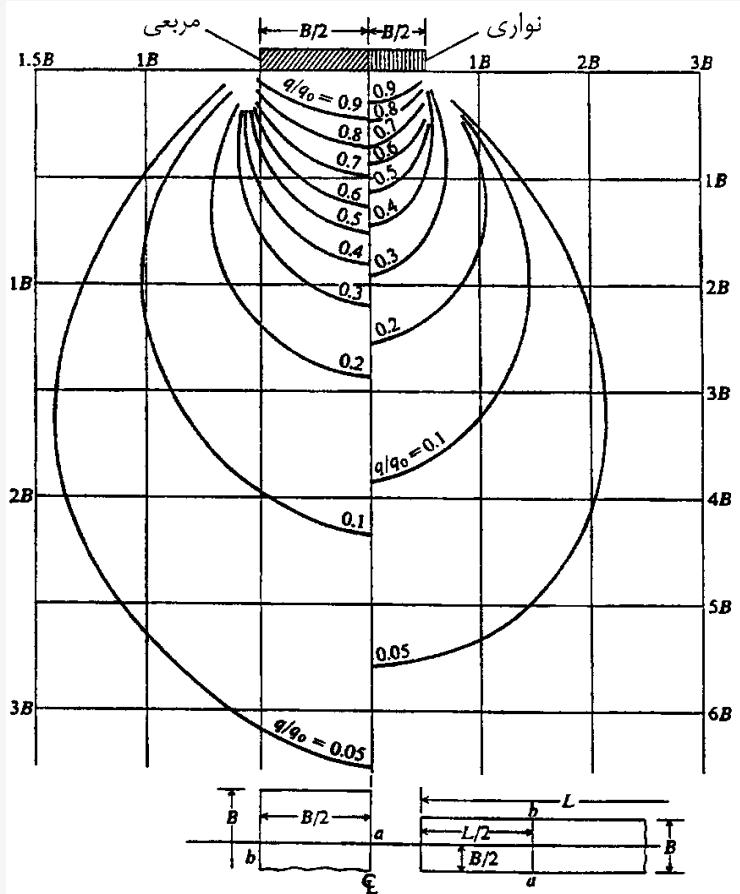
۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

**فاکتورهای مهم در
تعیین و ارزیابی نشست**

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

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 صلبیت پی (0.1 – 0.4)

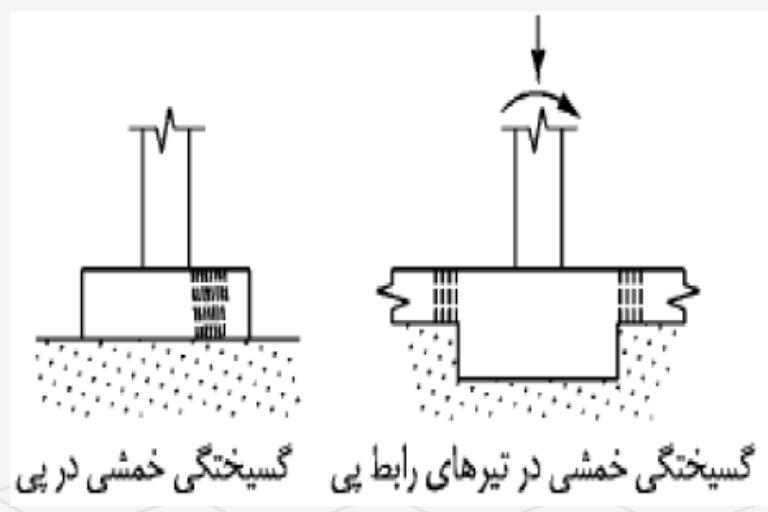
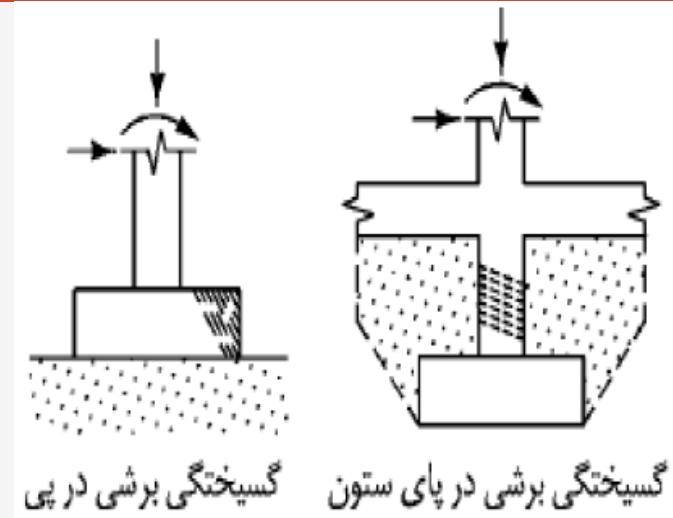
E_s : مدول خاک

S : مقدار نشست

**پارامترهای
موثر در
نشست آنی و
تحکیمی**

3. Major Requirements

۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه



• تعیین نیروهای داخلی

• خرابی‌های خمشی، برشی و لهیدگی

• عوامل موثر بر صلبیت و انعطاف‌پذیری

**طراحی
سازه‌ای**

• مدول عکس العمل بستر

• اختلاف بار ستون‌ها

• مدول الاستیسیته خاک

• اثر روسازه

• ممان اینرسی پی

• ضخامت پی

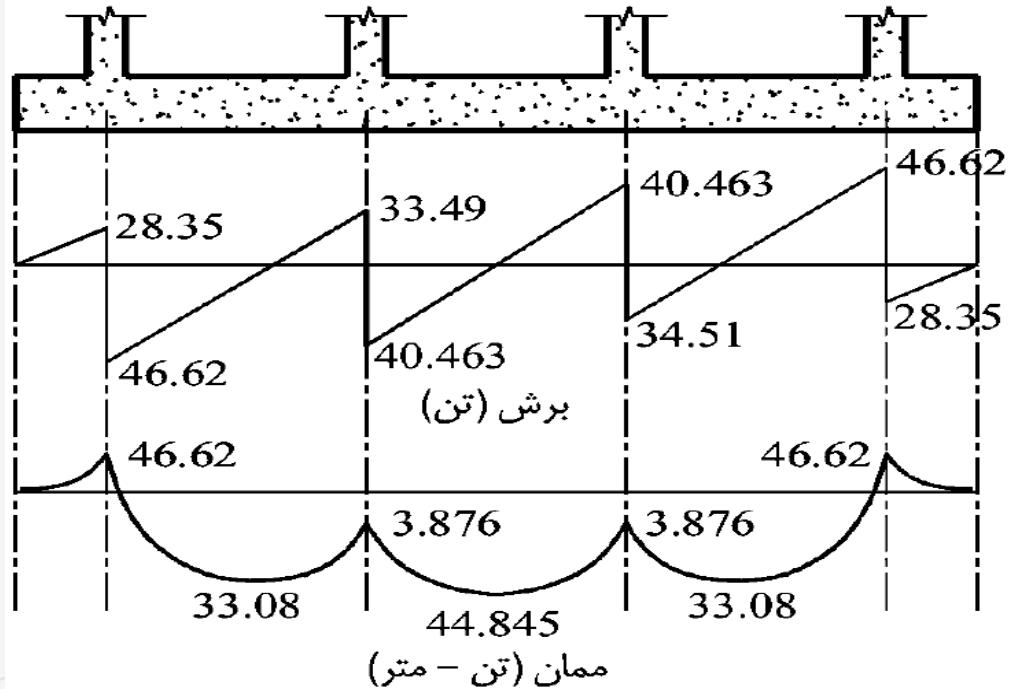
• مدول الاستیسیته بتن

3. Major Requirements

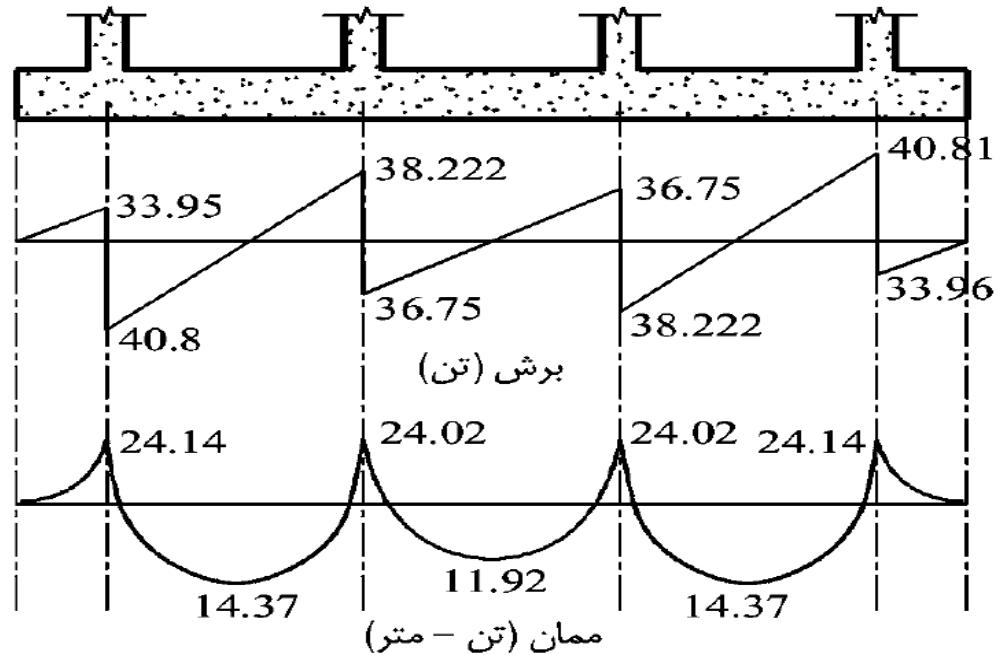
۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

آنالیز پی نواری با فرض
حالت‌های صلب و انعطاف‌پذیر

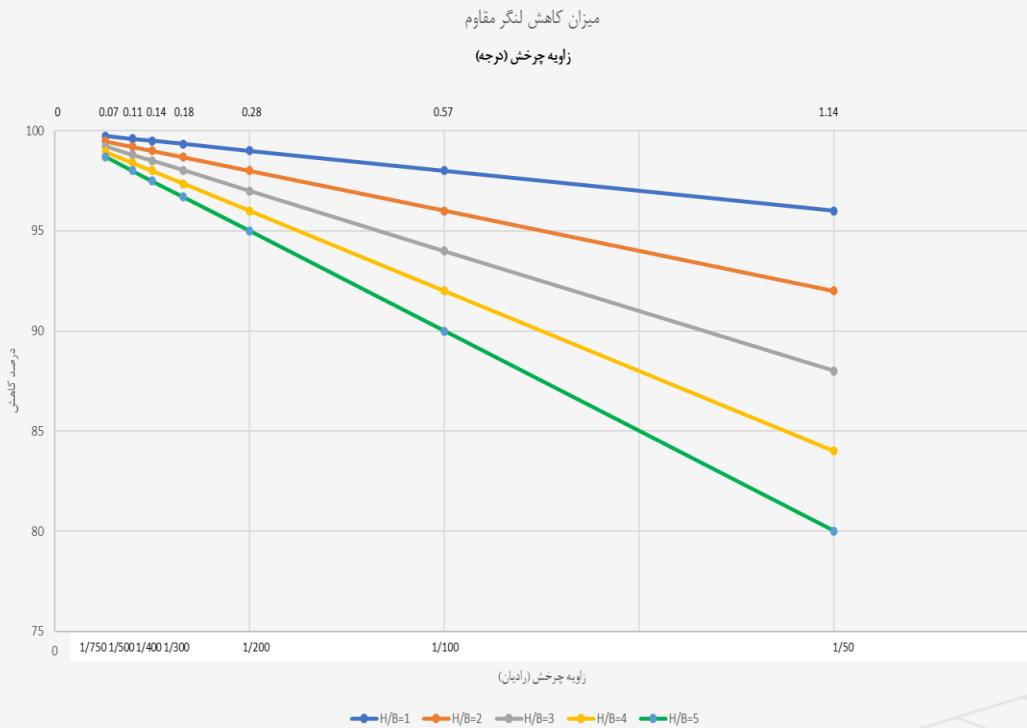
صلب



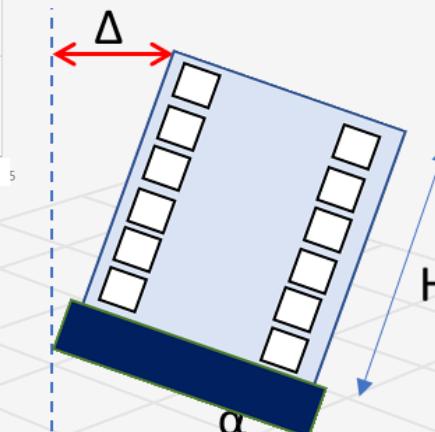
انعطاف‌پذیر



3. Major Requirements



درصد کاهش لنگر مقاوم در اثر چرخش پی

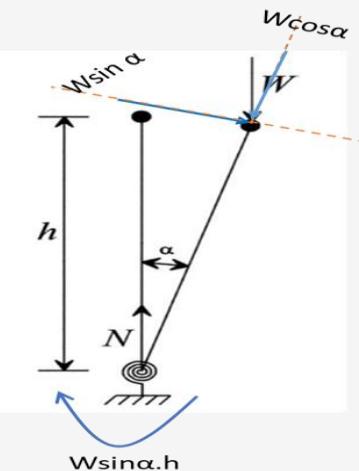


جابه‌جایی افقی سازه

۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

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

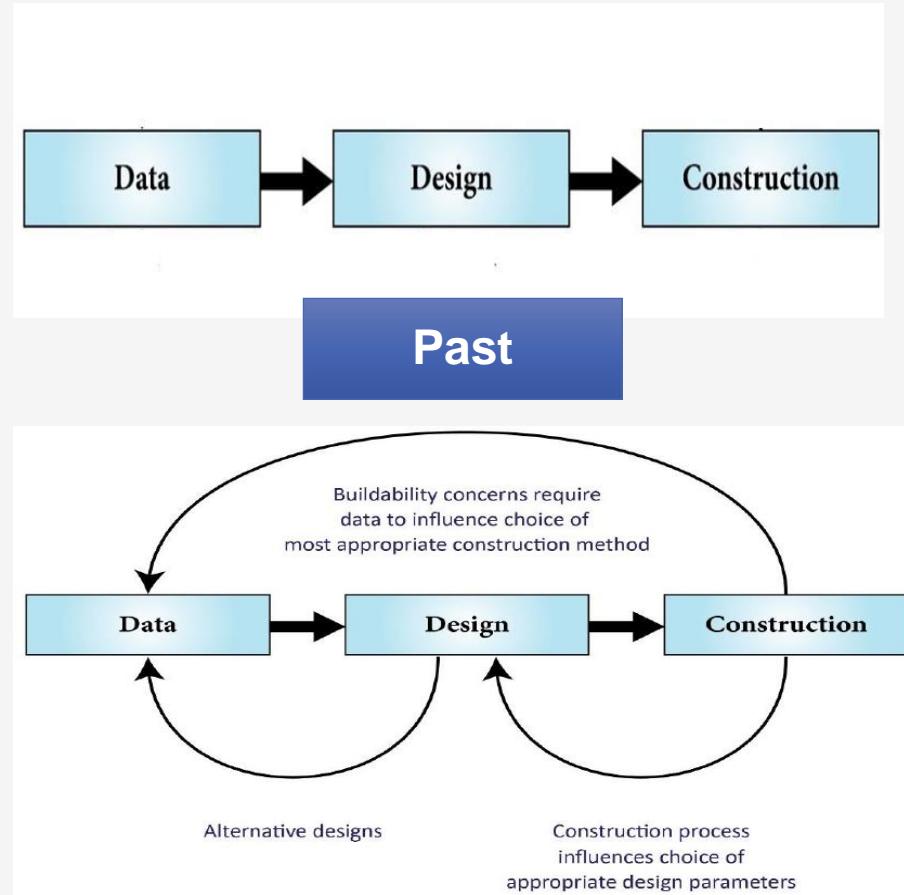
فاکتورهای مهم در ارزیابی پایداری



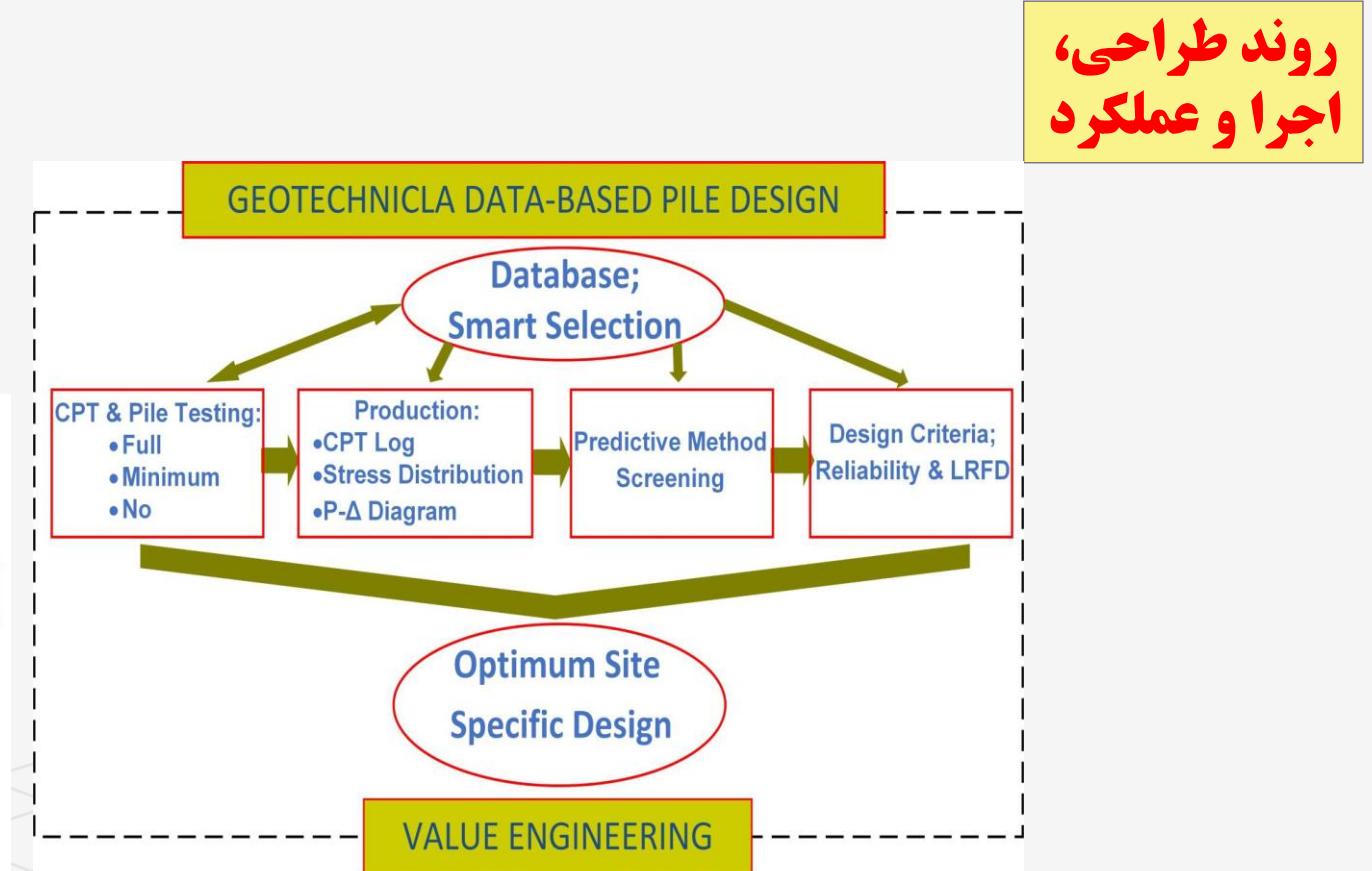
مدل سازی چرخش برج پیزا با آونگ معکوس

3. Major Requirements

۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه



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



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

روند طراحی،
اجرا و عملکرد

3. Major Requirements

Salgado (2008):

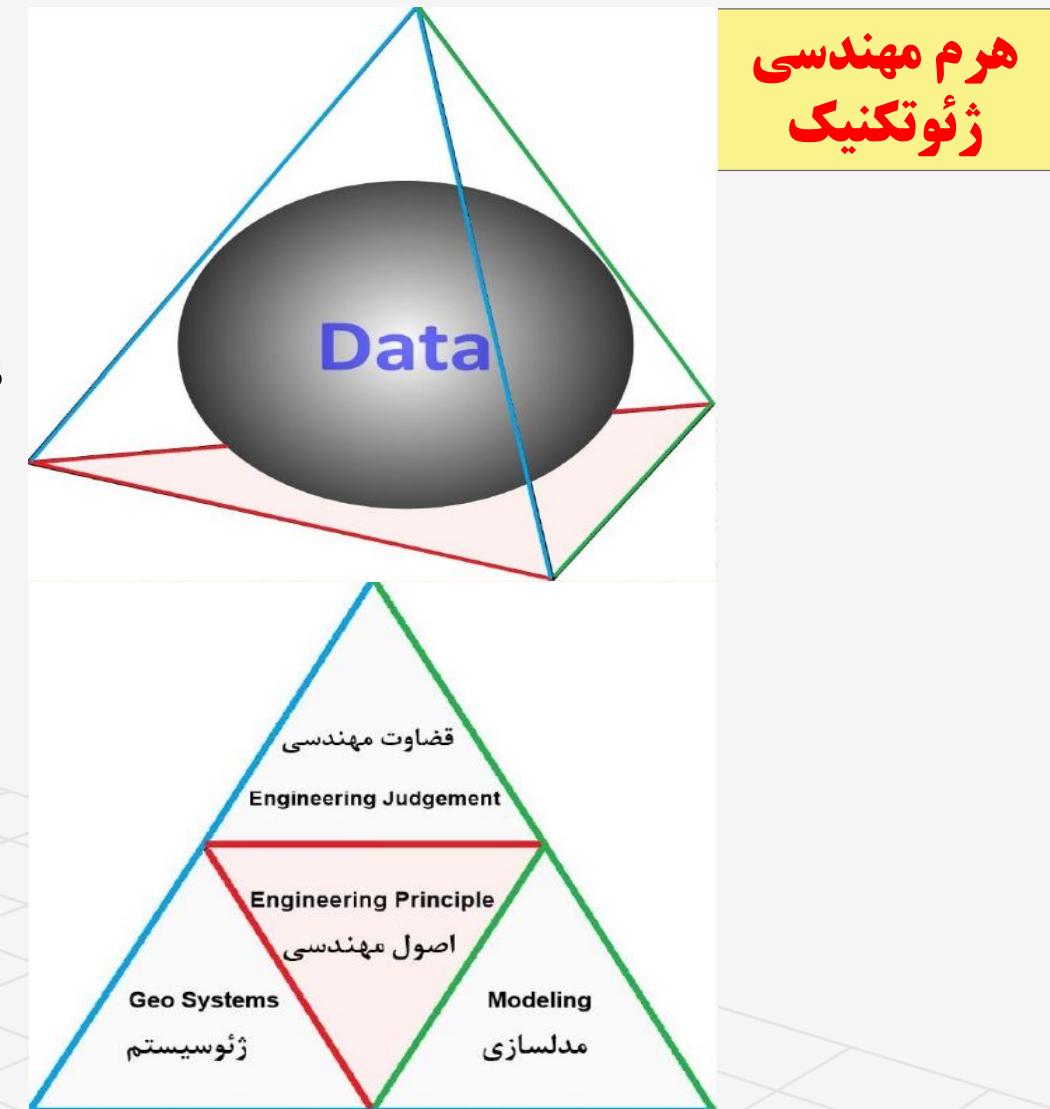
Foundation engineering tools are:

- **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)

۳. ملاحظات تحلیل و طراحی زیر سازه

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)

(Pile Group) گروه شمع

پی‌های پوسته‌ای (Shell Foundations)

Piled Raft Foundation

پی‌های شناور (Floating Foundations)

سیستم‌های هیبریدی (تلفیقی)

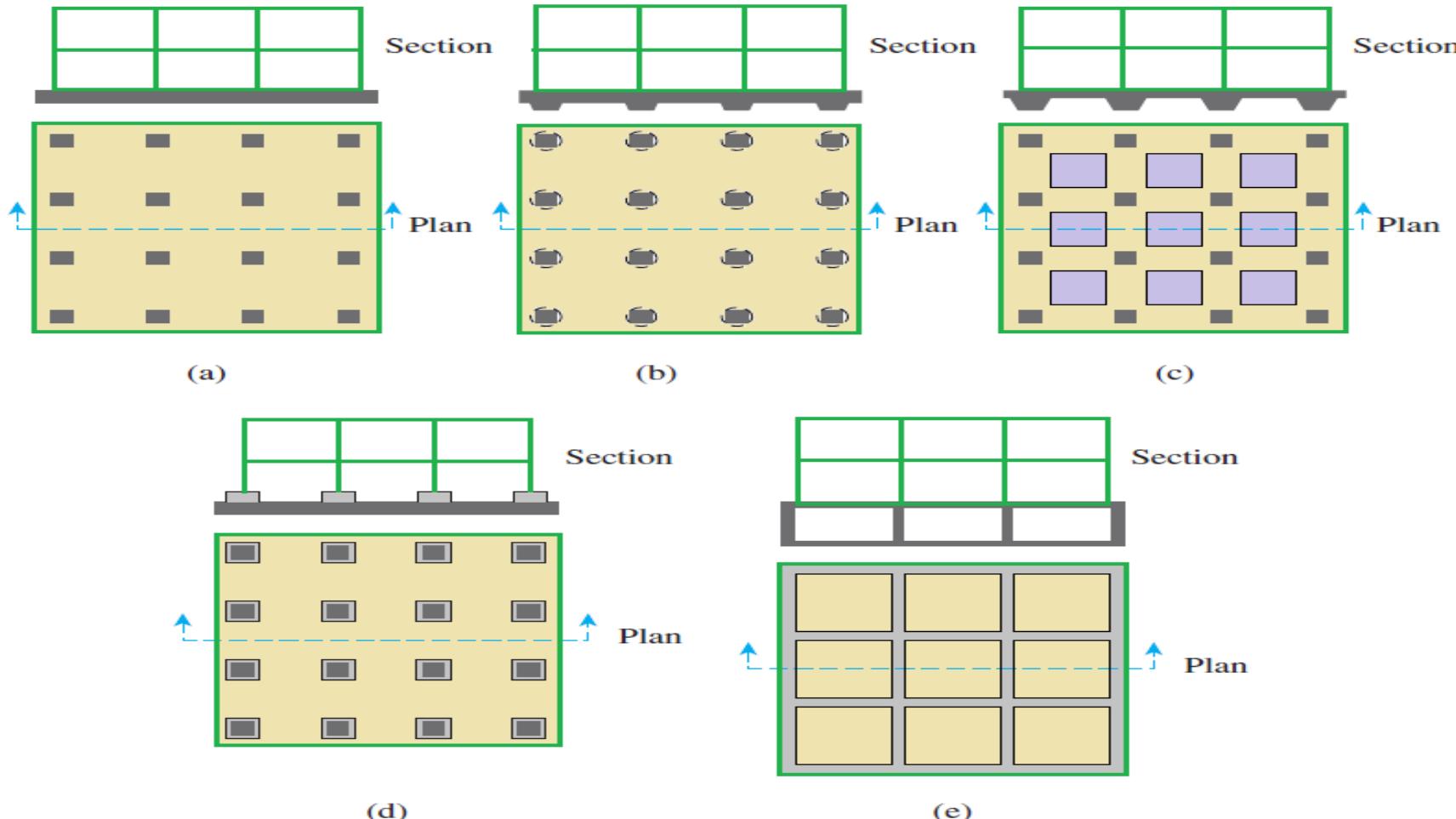
Barrette Foundations

Other Functions

Top Down Constructions

4. Foundation System Selection

۴. انتخاب سیستم فونداسیون

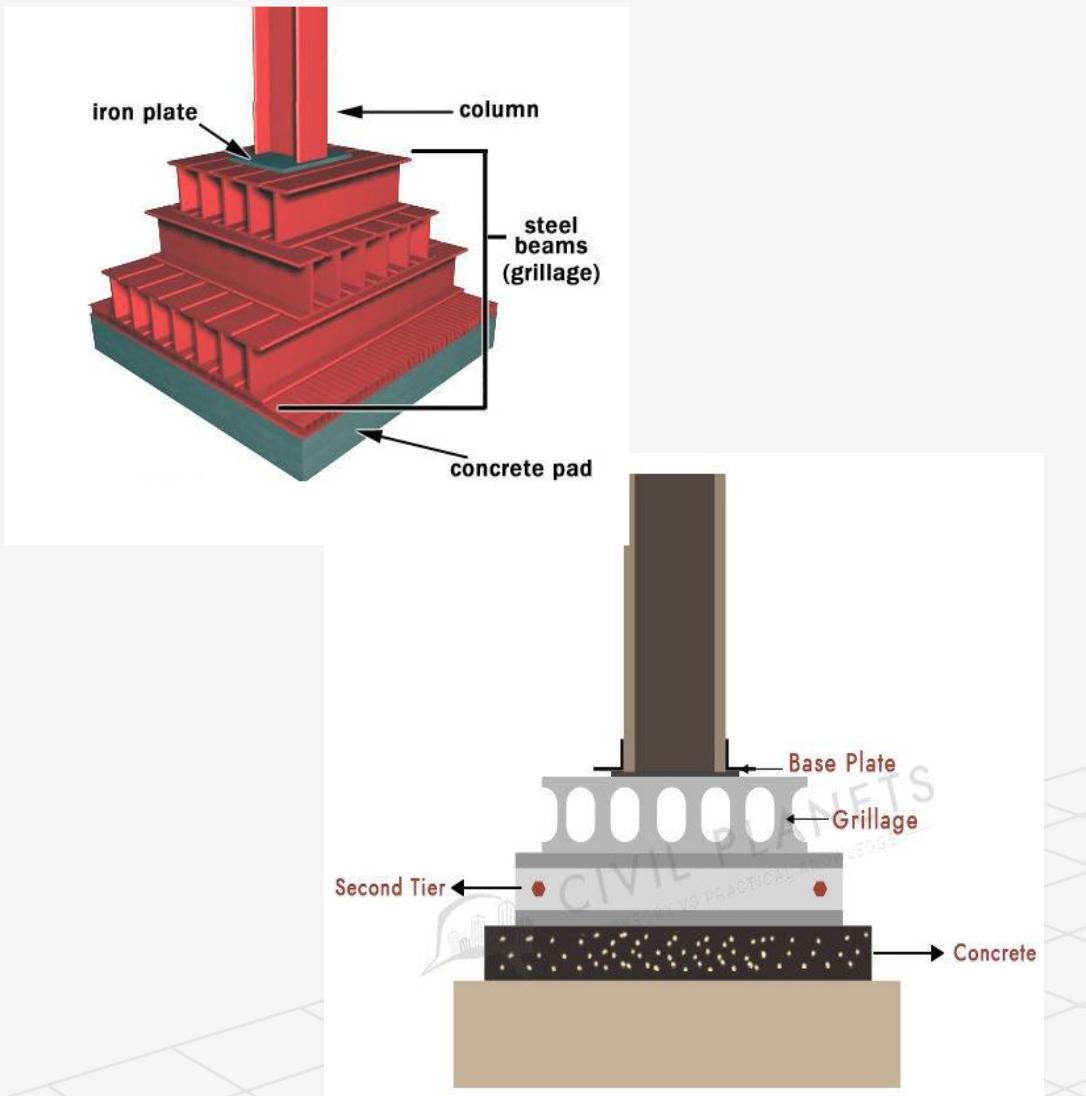


**پی‌های گسترده
(Mat Foundation)**

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

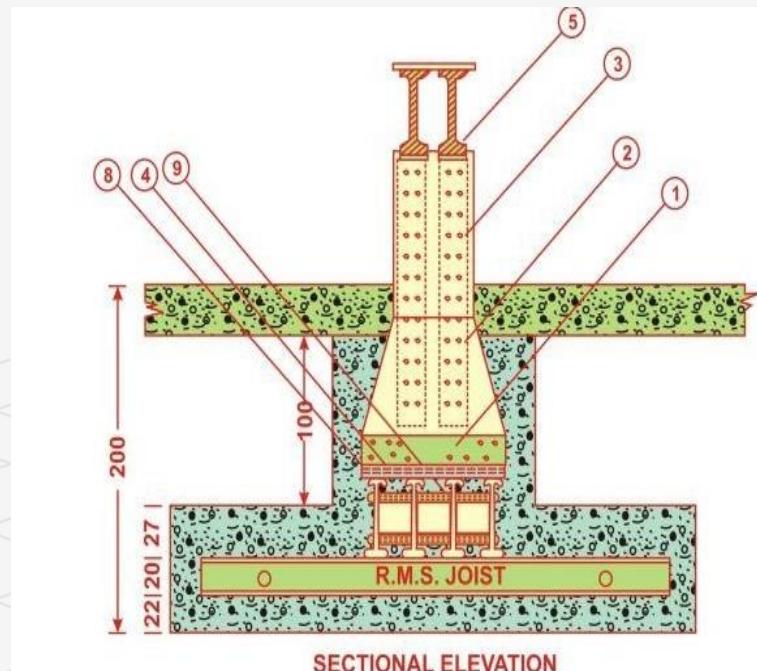
4. Foundation System Selection

۴. انتخاب سیستم فونداسیون



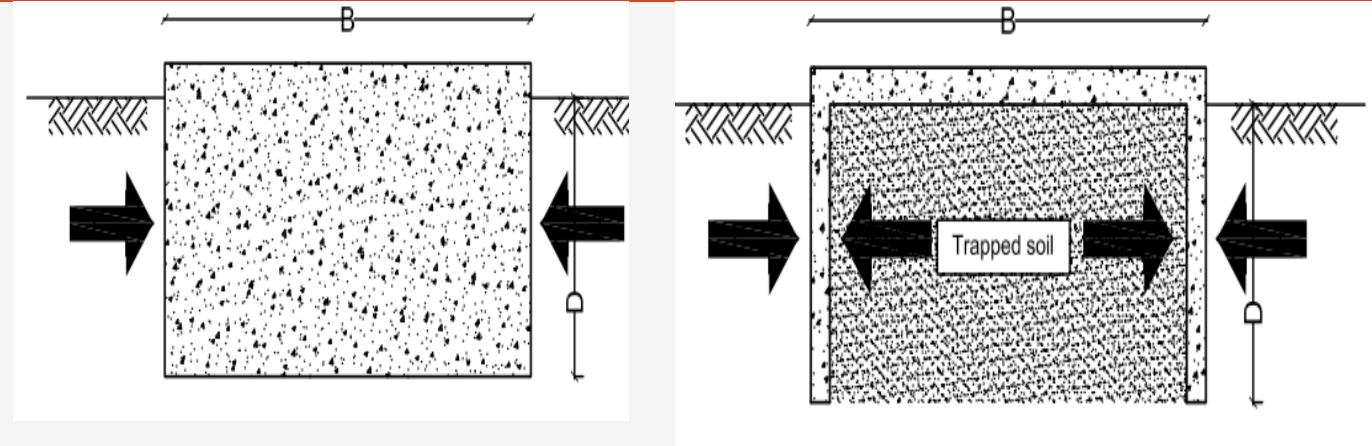
- بار روسازه سنگین،
- زمین بستر سخت،
- عدم پاسخگویی بتن مسلح.

پی‌های فولادی (Grillage Foundation)

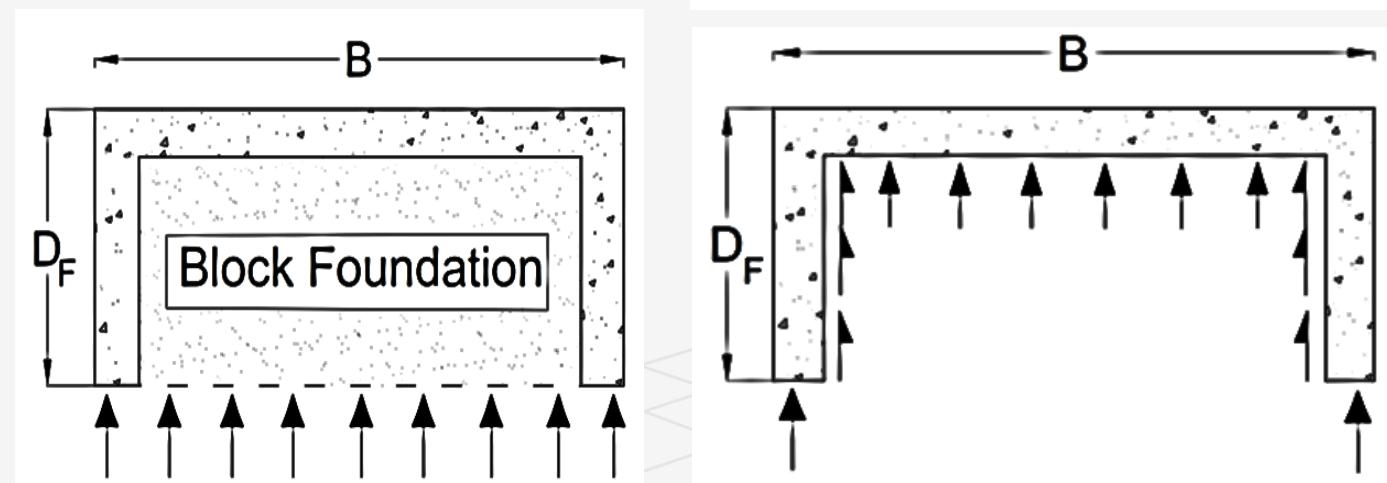


4. Foundation System Selection

۴. انتخاب سیستم فونداسیون



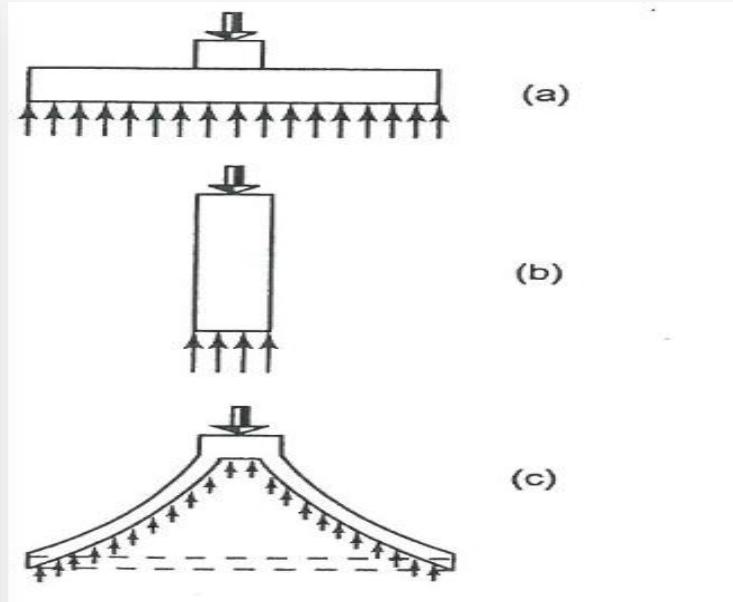
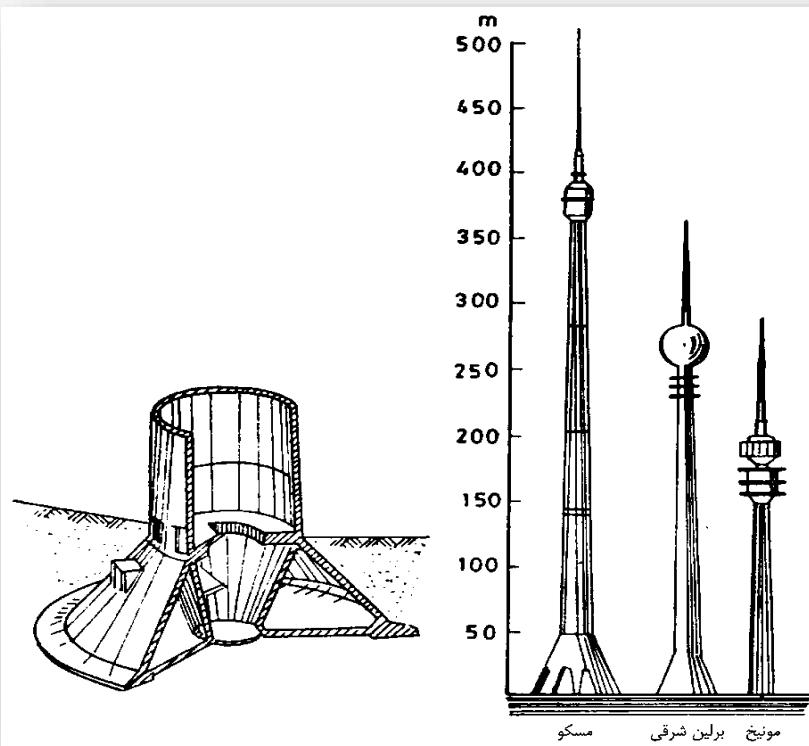
**پی‌های لبه‌دار
(Skirted Foundation)**



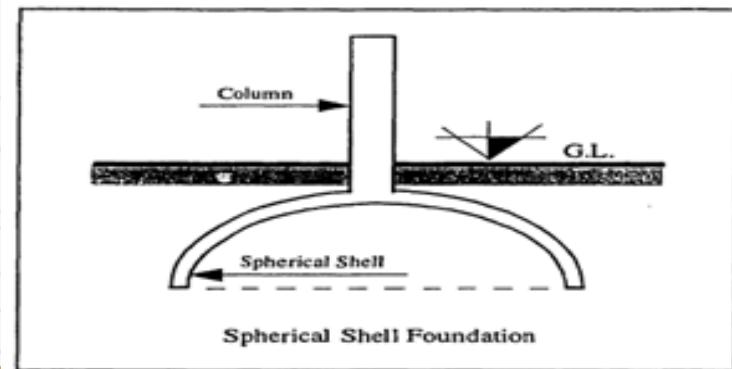
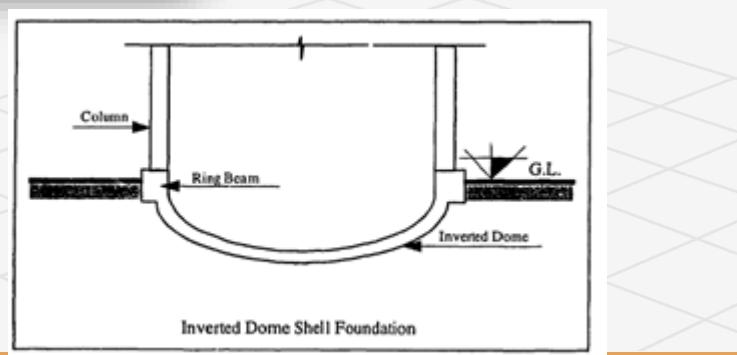
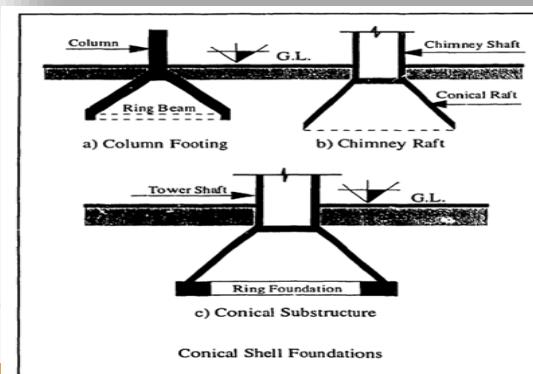
محصوریت توامان خاک و پی و تشکیل فونداسیون بلوکی
(Double Confinement)

4. Foundation System Selection

۴. انتخاب سیستم فونداسیون

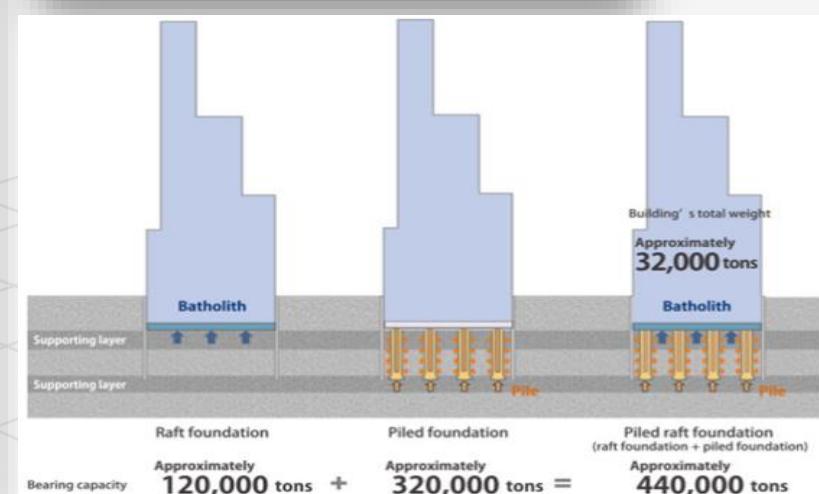
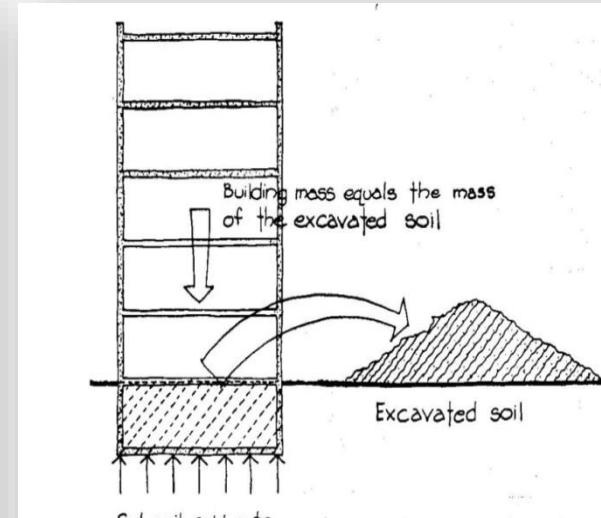
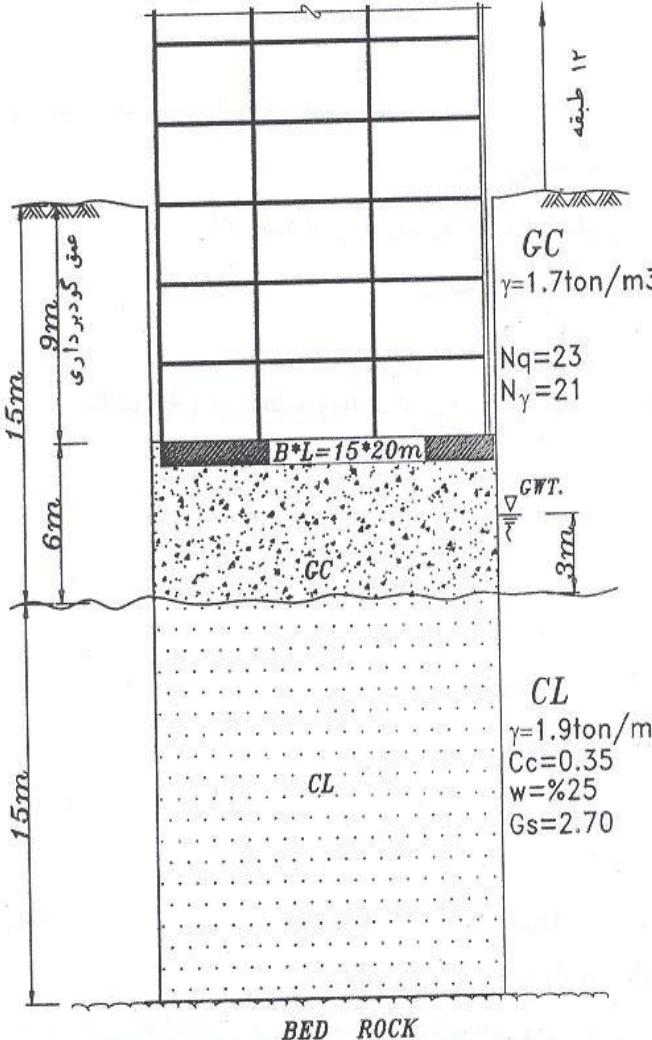


Structural Action of Foundations:
(a) Footing (flexure), (b) Pier (axial compression), (c) Shell foundation (axial forces with secondary flexure)



4. Foundation System Selection

۴. انتخاب سیستم فونداسیون

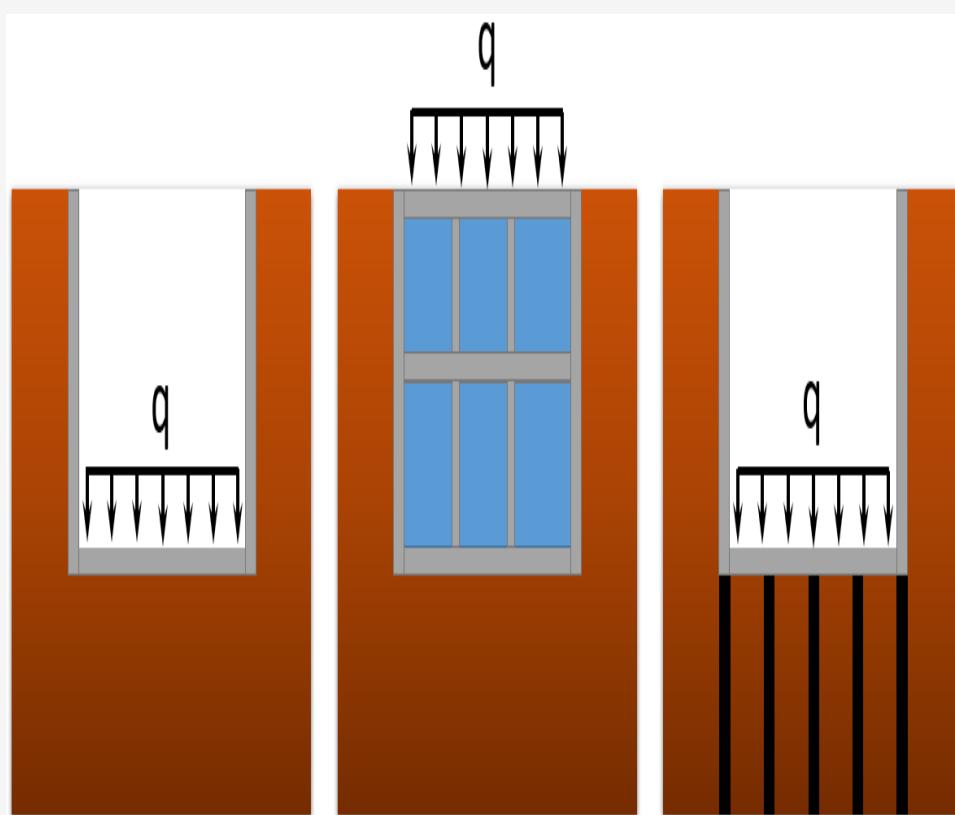


افزایش توان برابری

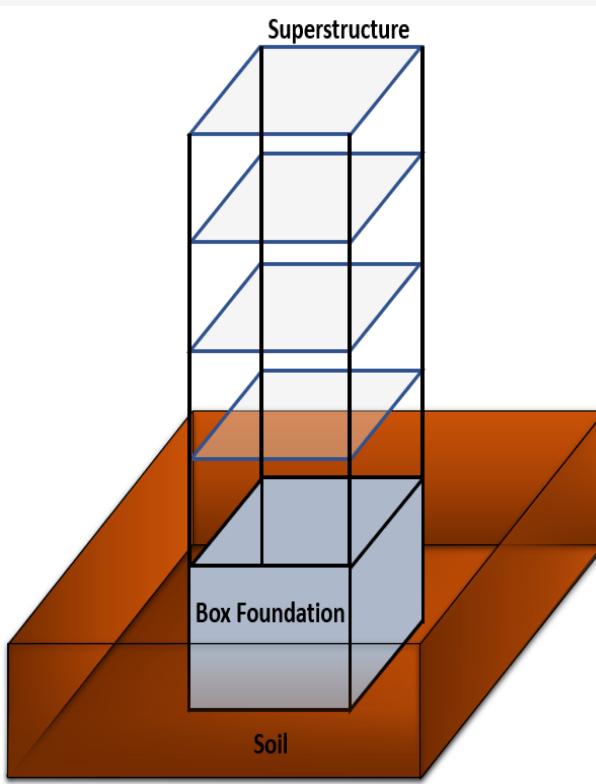
کاهش نشت

4. Foundation System Selection

۴. انتخاب سیستم فونداسیون

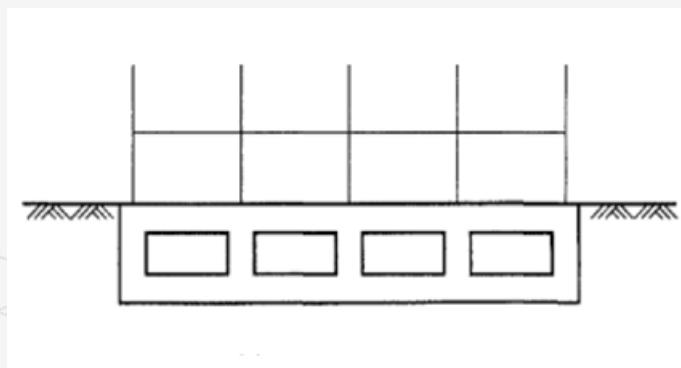


Different types of floating foundations in depth
a) simple raft,
b) box, c) piled raft



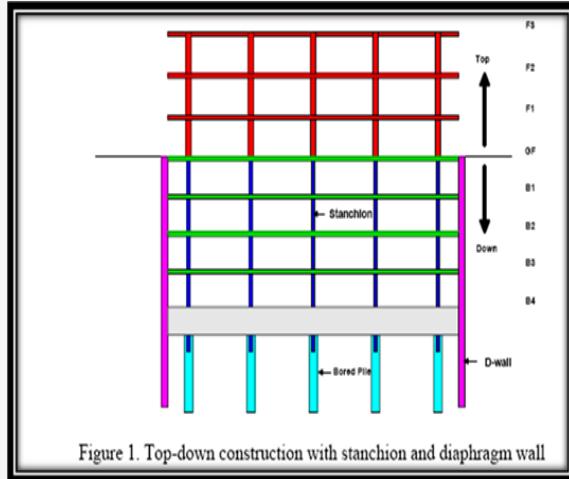
Box Foundation
پی‌های جعبه‌ای

پی‌های شناور
(Floating Foundation)



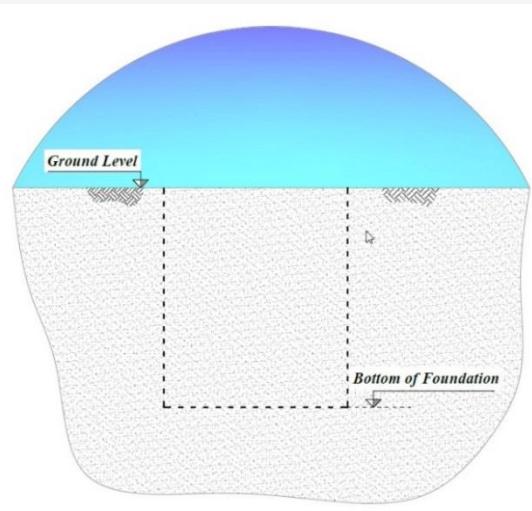
4. Foundation System Selection

۴. انتخاب سیستم فونداسیون

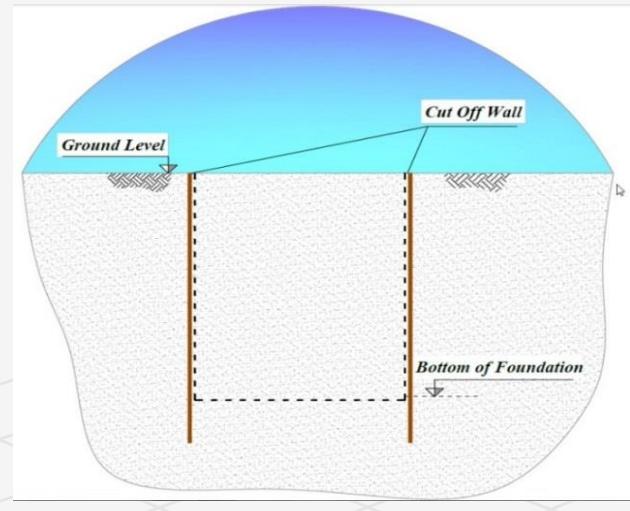


- عملکرد سیستم باکسی صلب به عنوان فونداسیون نیمه عمیق
- طراحی بهینه با تلفیق روپاره و زیرسازه (حائل زیرزمین و دیواربرشی، شمع و ستون)
- سرعت بیشتر در اجرا، ۳۰% تا ۷۰% هزینه کمتر

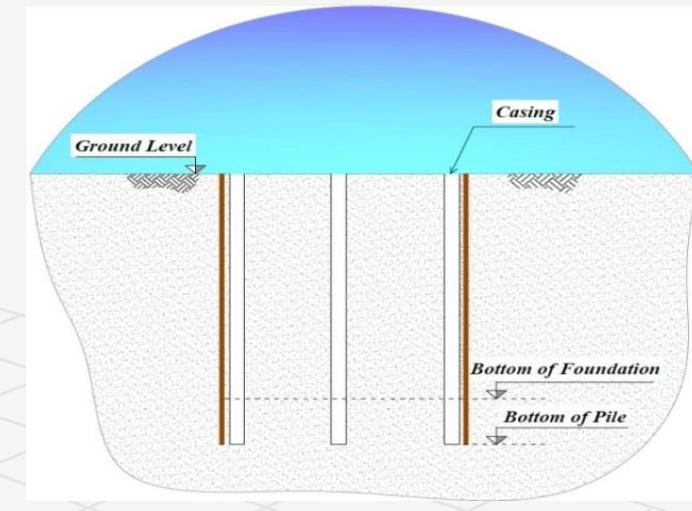
**روش همزمان
سخت روپاره و
زیرسازه
Top Down)
Construction
(Foundation**



مرحله ۱



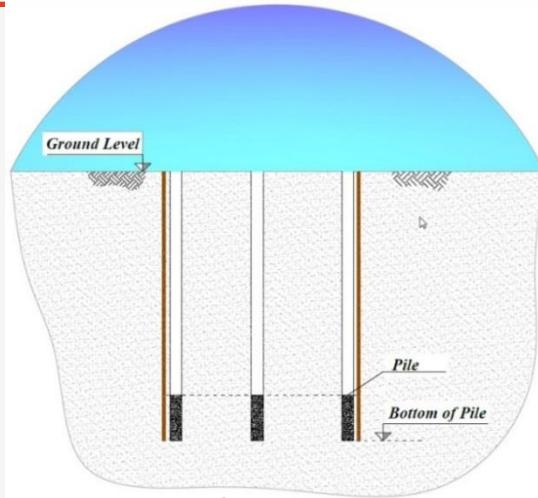
مرحله ۲



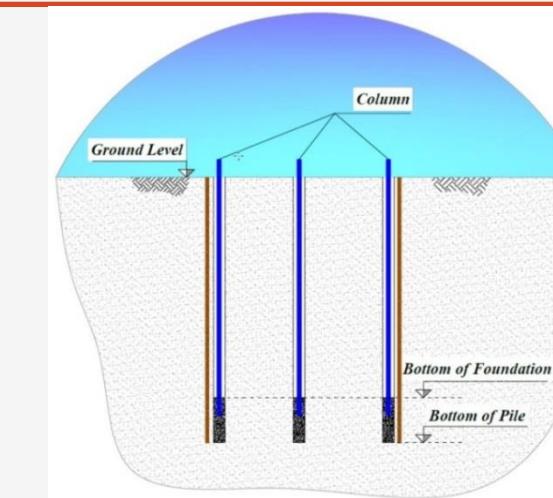
مرحله ۳

4. Foundation System Selection

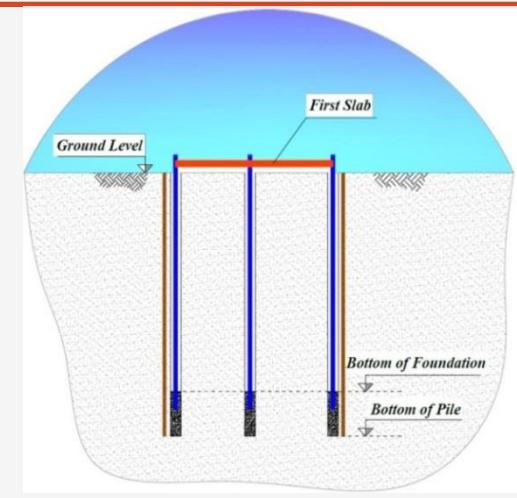
۴. انتخاب سیستم فونداسیون



مرحله ۴

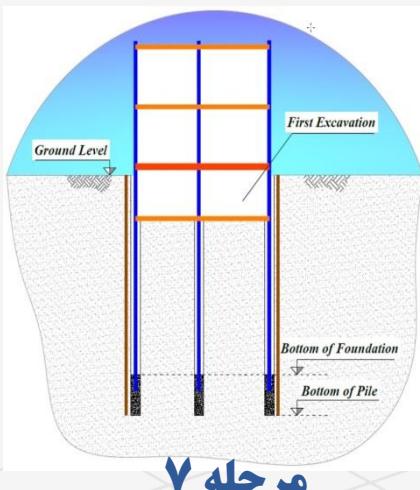


مرحله ۵

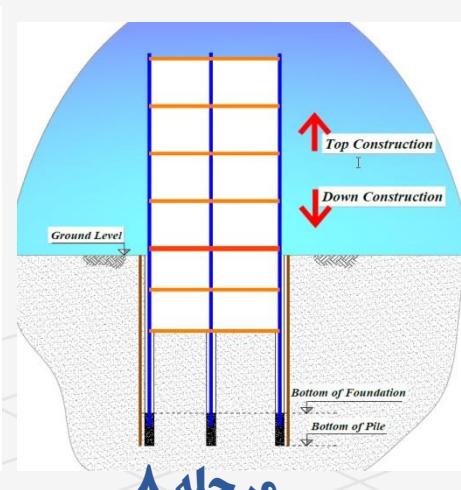


مرحله ۶

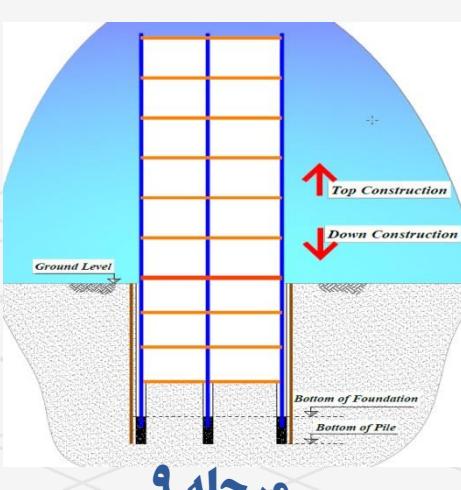
**روش همزمان
سخت رو سازه و
زیر سازه
Top Down)
Construction
(Foundation**



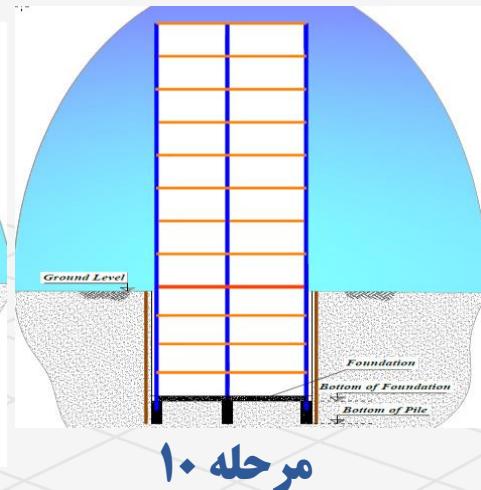
مرحله ۷



مرحله ۸



مرحله ۹



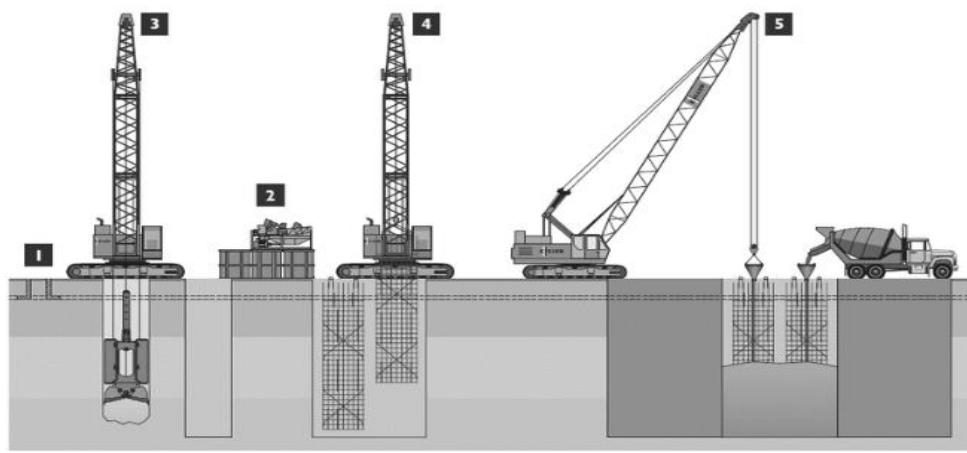
مرحله ۱۰

4. Foundation System Selection

۴. انتخاب سیستم فونداسیون



Barrette Foundations

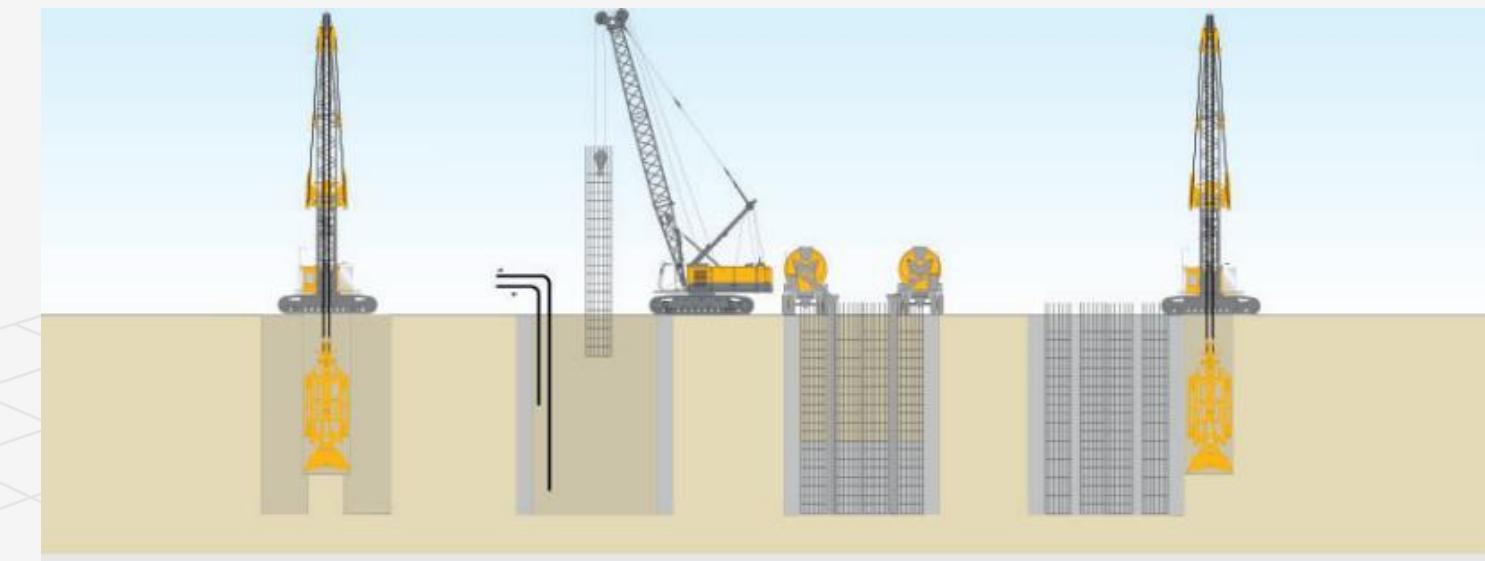


4. Foundation System Selection

۴. انتخاب سیستم فونداسیون

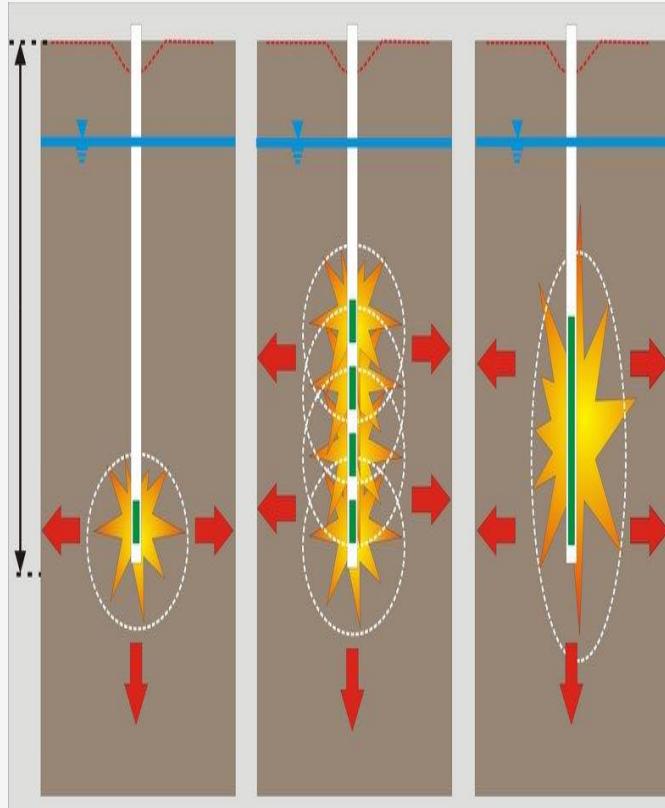


Barrette Foundations



4. Foundation System Selection

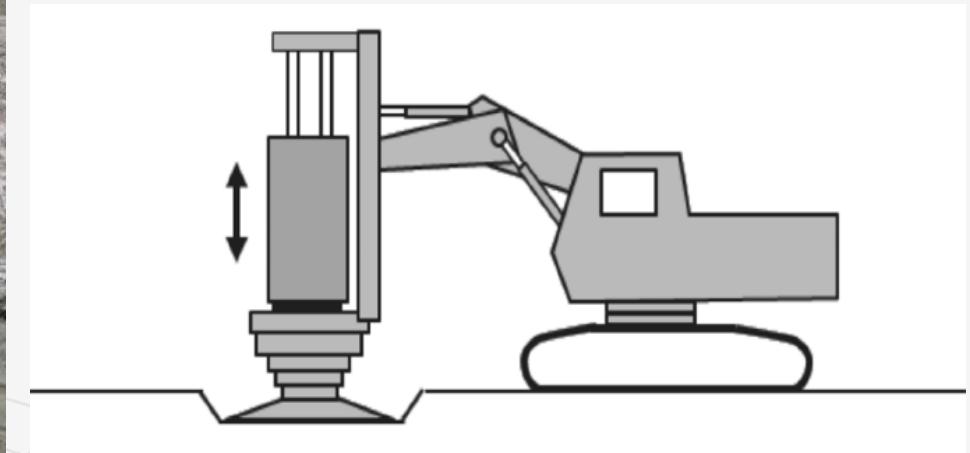
۴. انتخاب سیستم فونداسیون



تراکم انفجاری



**بهازی انبوهی
Massive)
(Foundation**

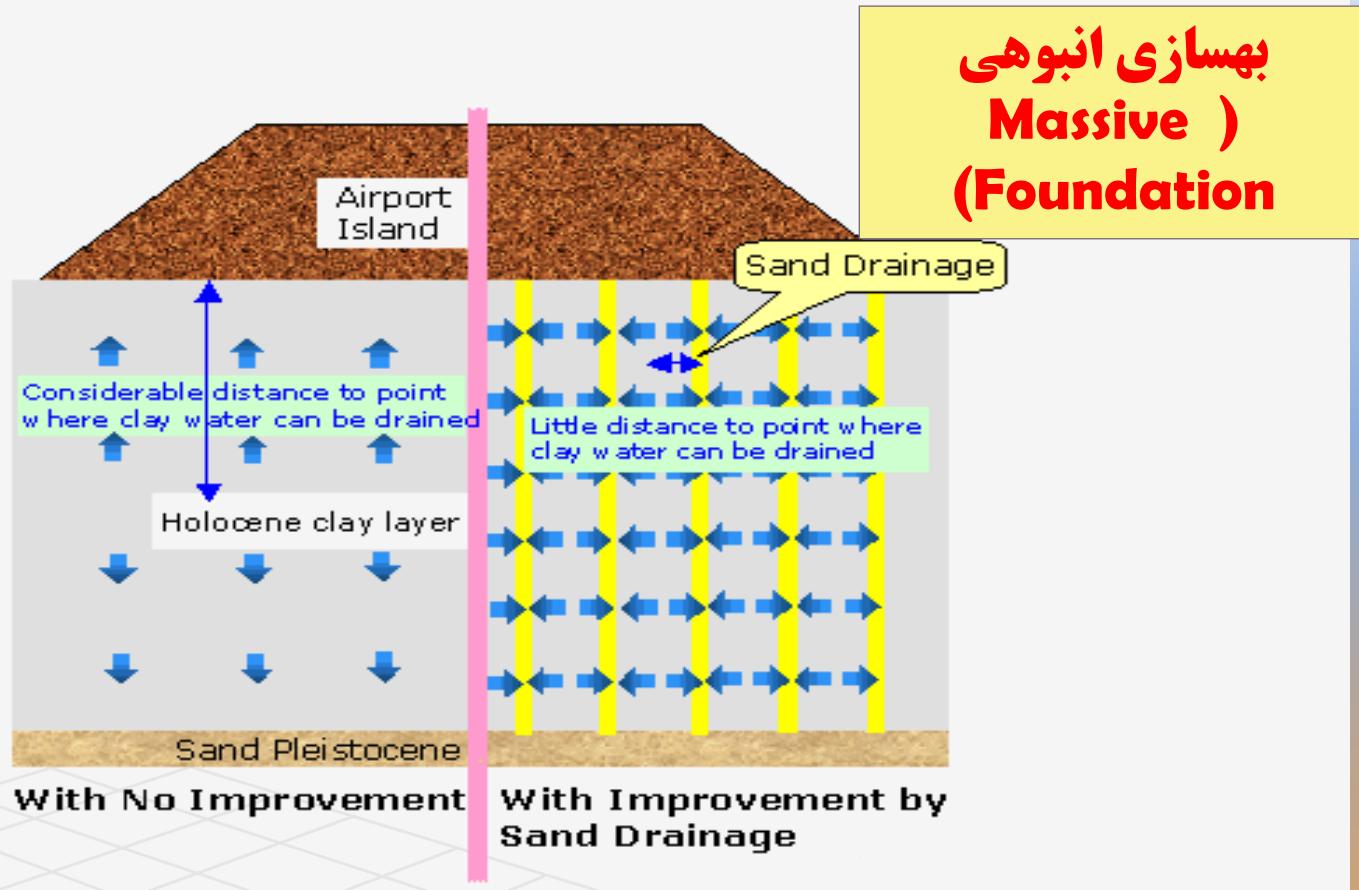


Rapid Impact Compaction

4. Foundation System Selection



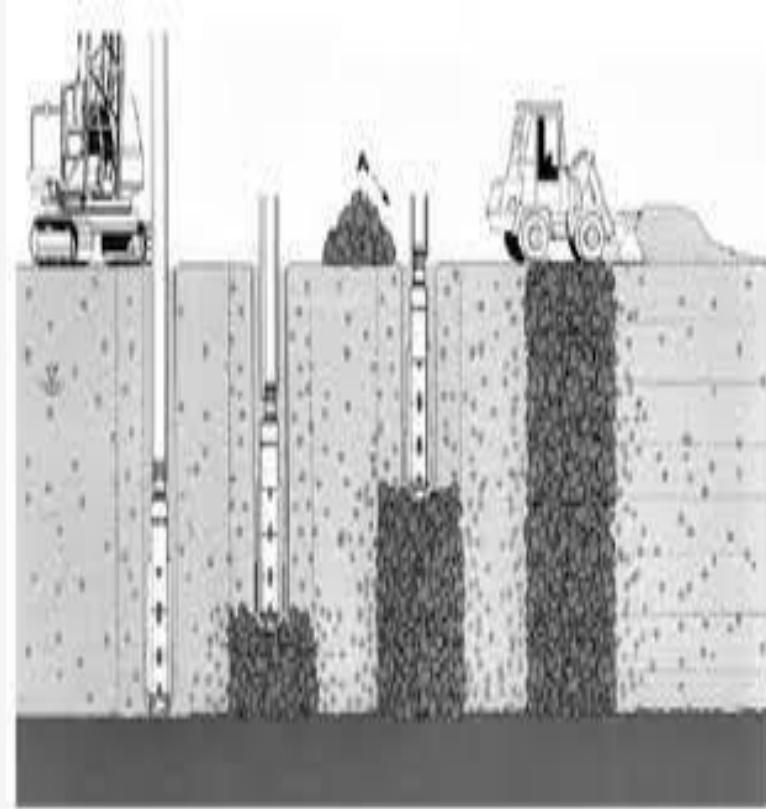
تراکم عمق دینامیک



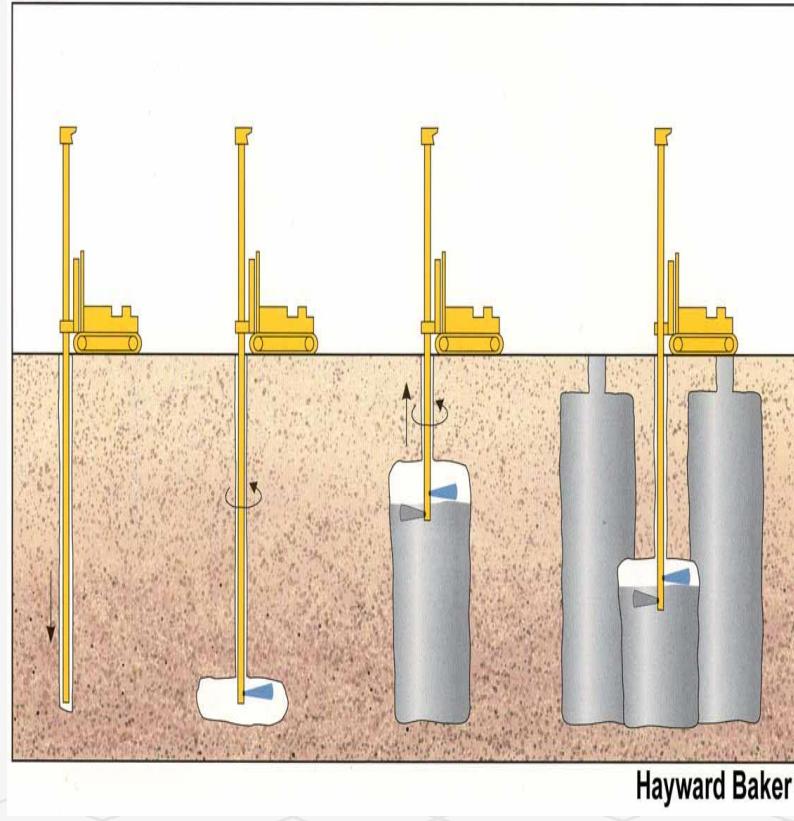
زهشکی قائم

4. Foundation System Selection

۴. انتخاب سیستم فونداسیون

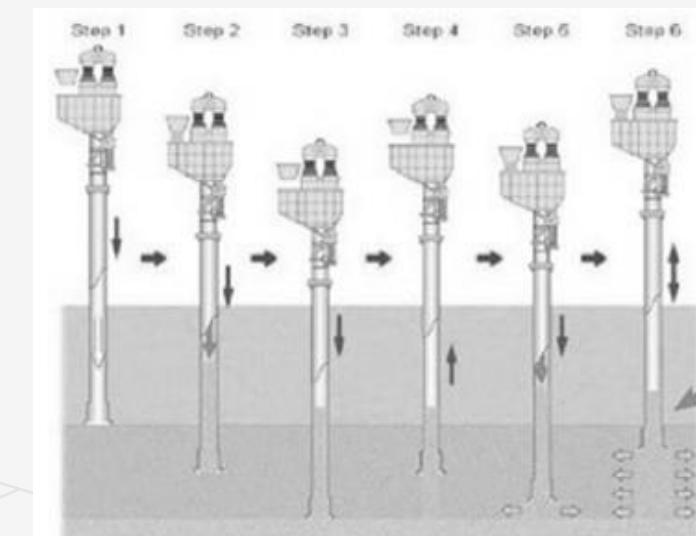


ستون‌های سنگی و آهکی سنتی



تزریق

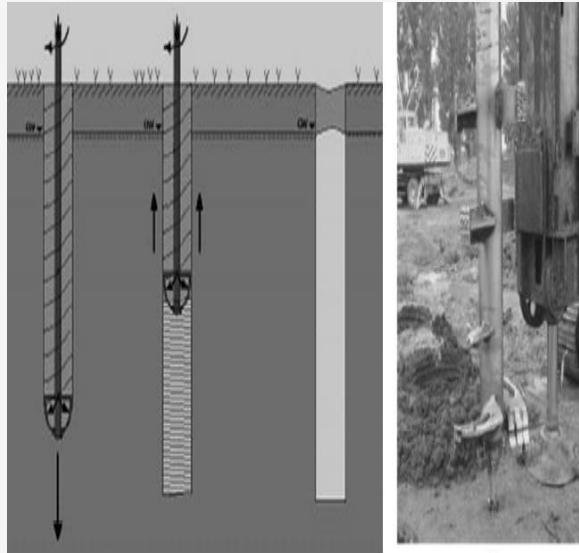
بهسازی ستونی
Columnar Ground)
(Improvement



Sand Compaction Pile (SCP)

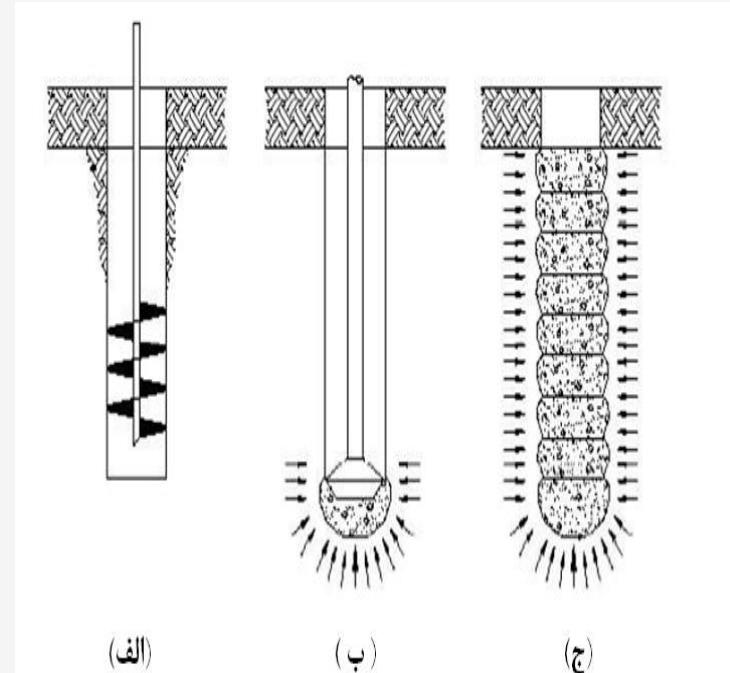
4. Foundation System Selection

۴. انتخاب سیستم فونداسیون

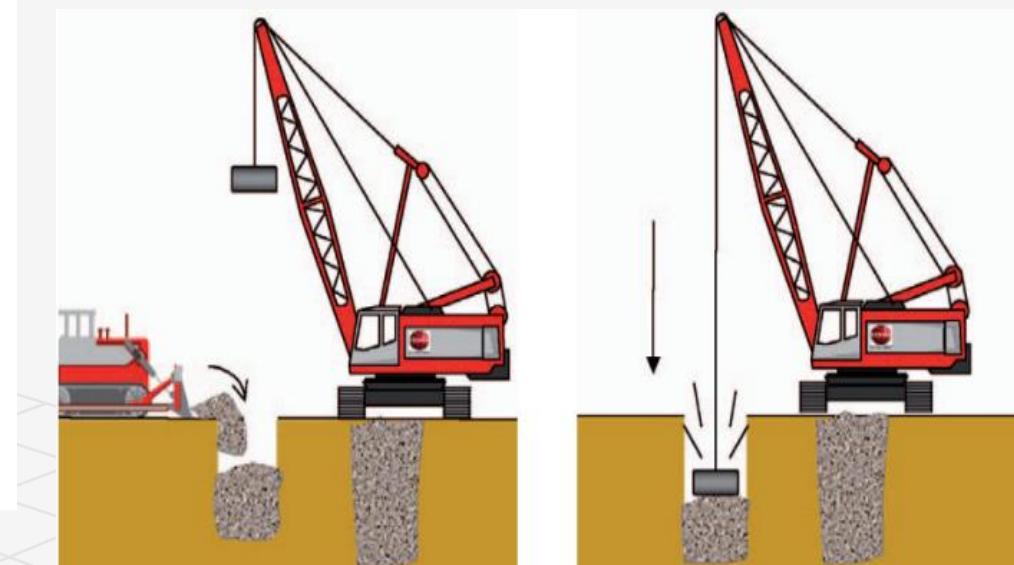


Dry deep soil mixing schematic

اختلاط خاک در عمق (DSM)



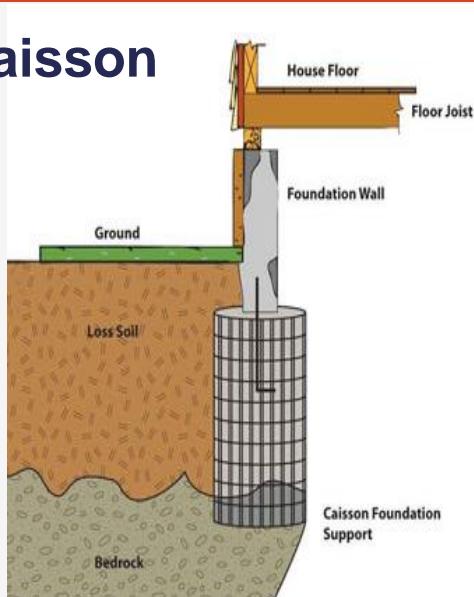
ستون‌های سنگریزهای کوبشی



پی‌های چاهی

4. Foundation System Selection

Caisson

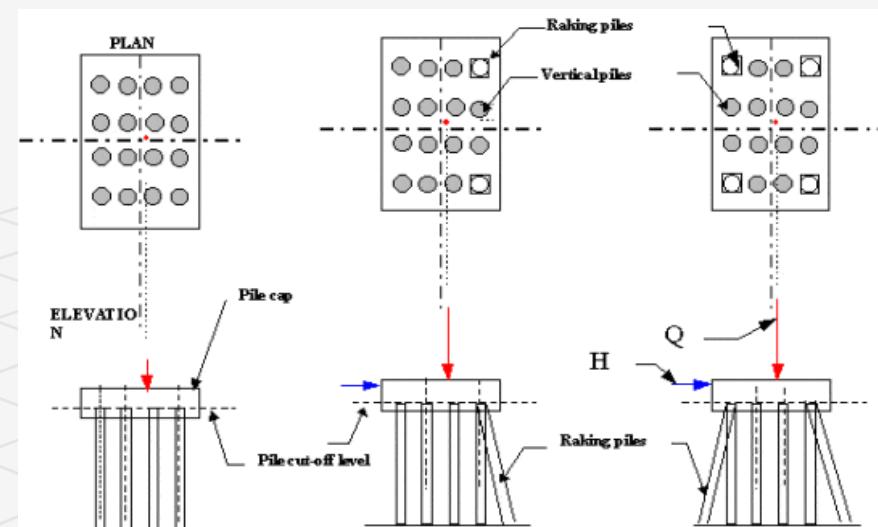


Monopile



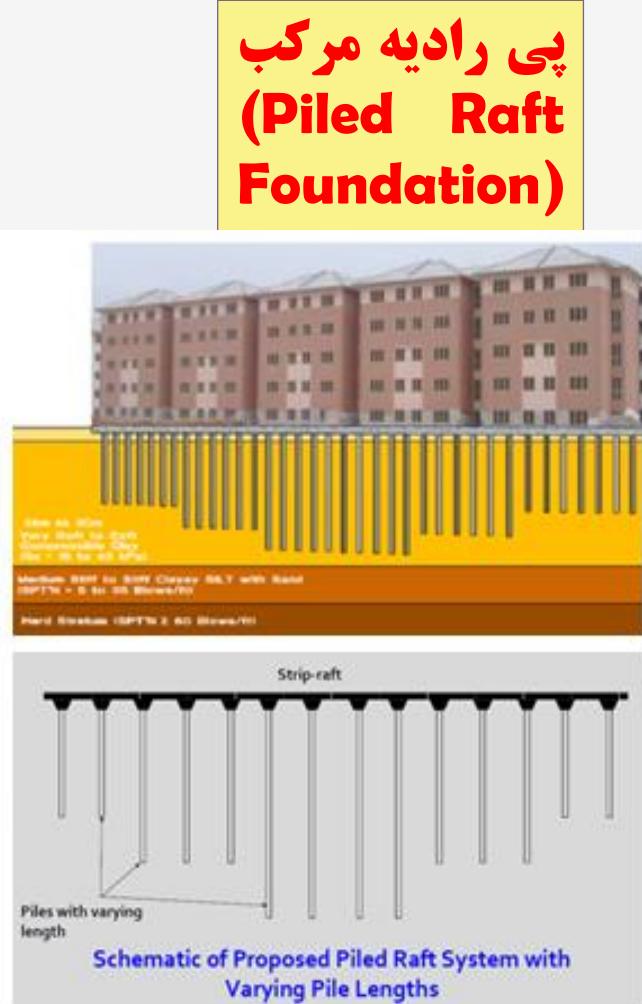
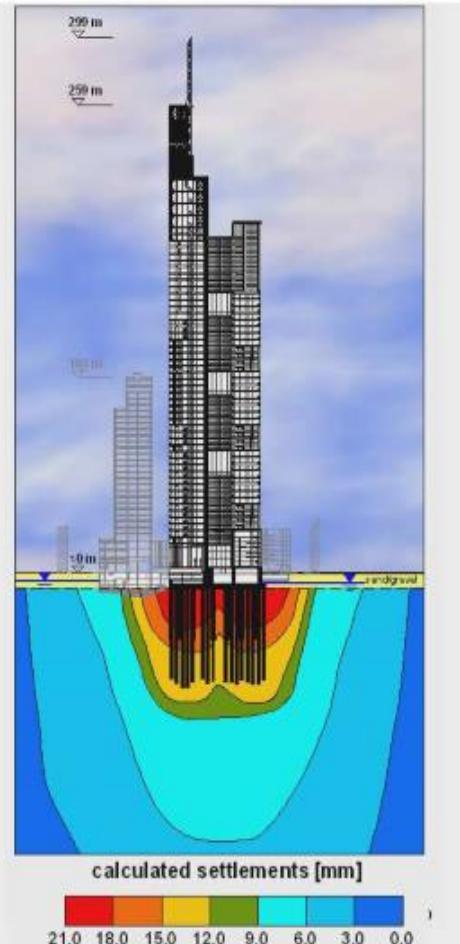
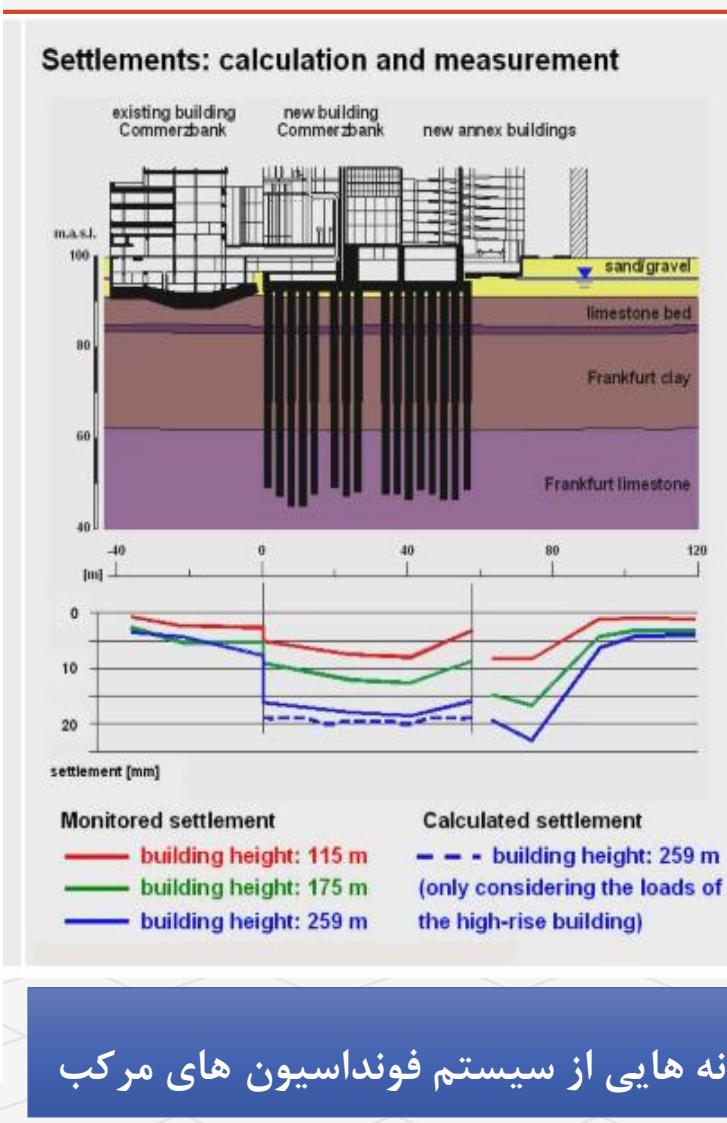
۴. انتخاب سیستم فونداسیون

**Group Pile
and Caisson**



4. Foundation System Selection

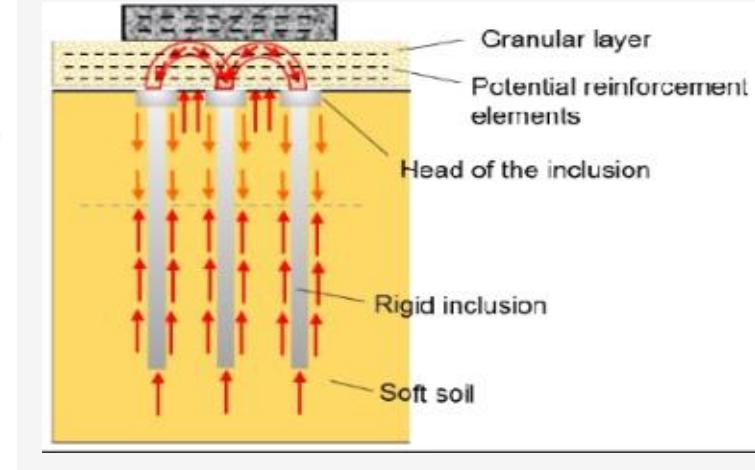
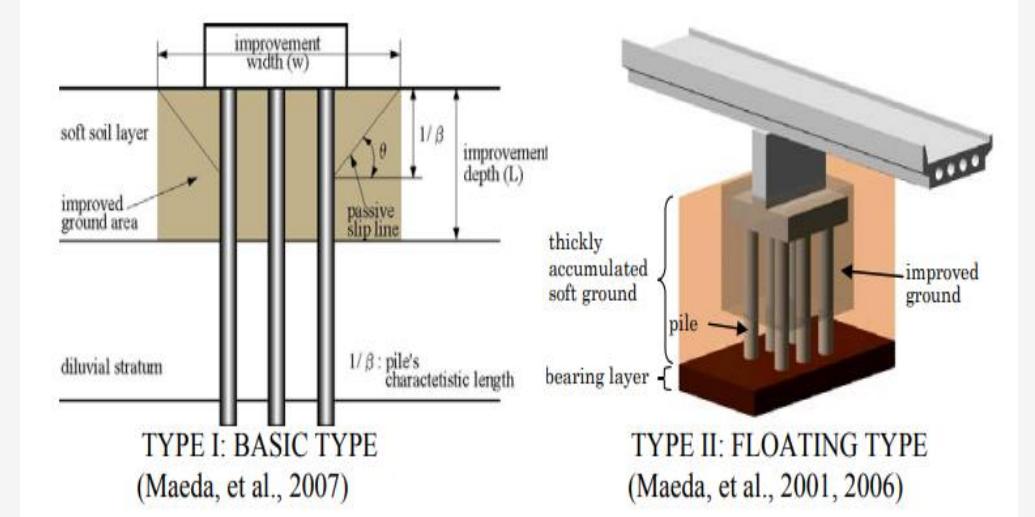
۴. انتخاب سیستم فونداسیون



(Poulos, 1998; Randolph, 2009)

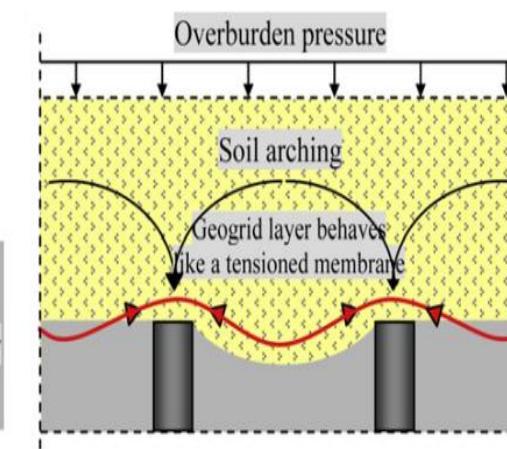
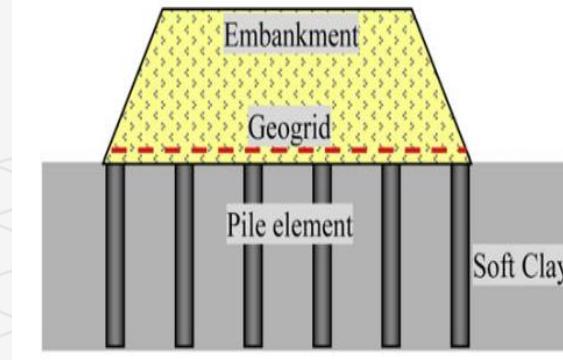
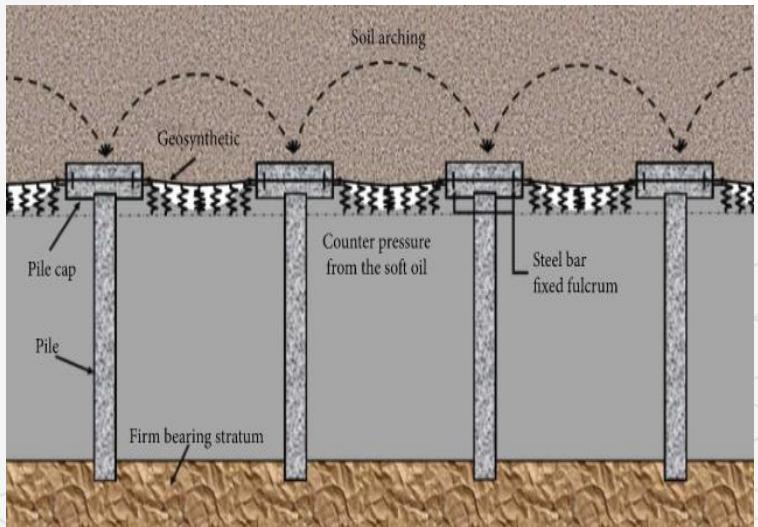
4. Foundation System Selection

۴. انتخاب سیستم فونداسیون



**سیستم‌های
هیبریدی (تلفیقی)**

تلفیق انواع پی
برای مثال
بهسازی خاک و
اجرای شمع



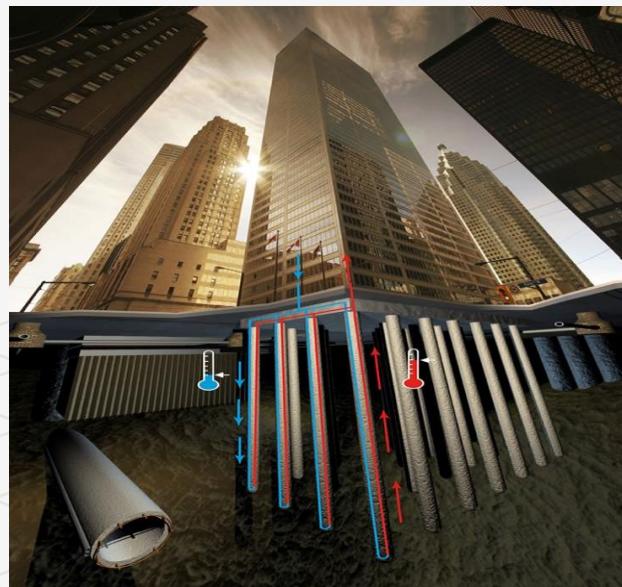
4. Foundation System Selection

۴. انتخاب سیستم فونداسیون



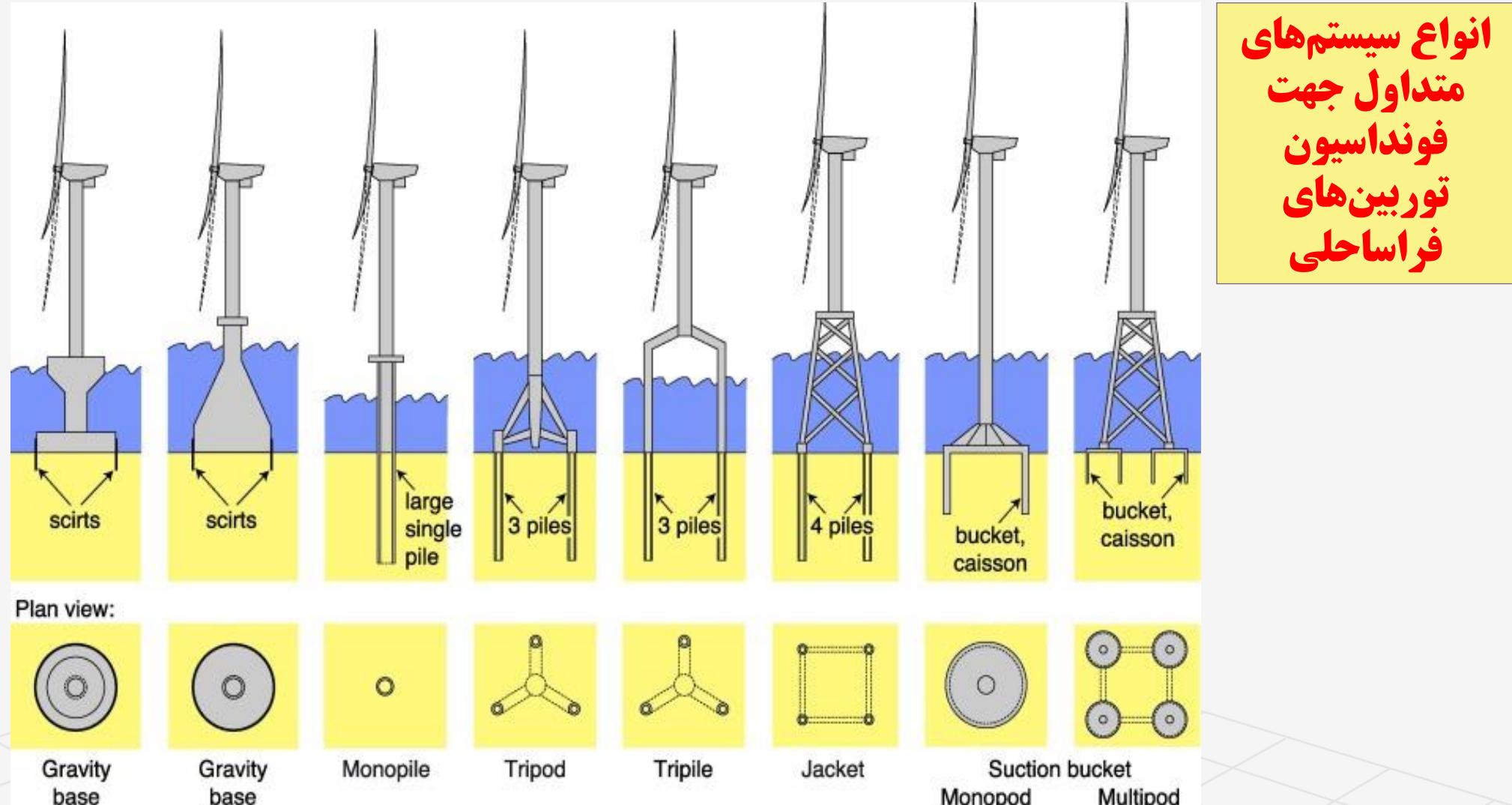
Other Functions

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



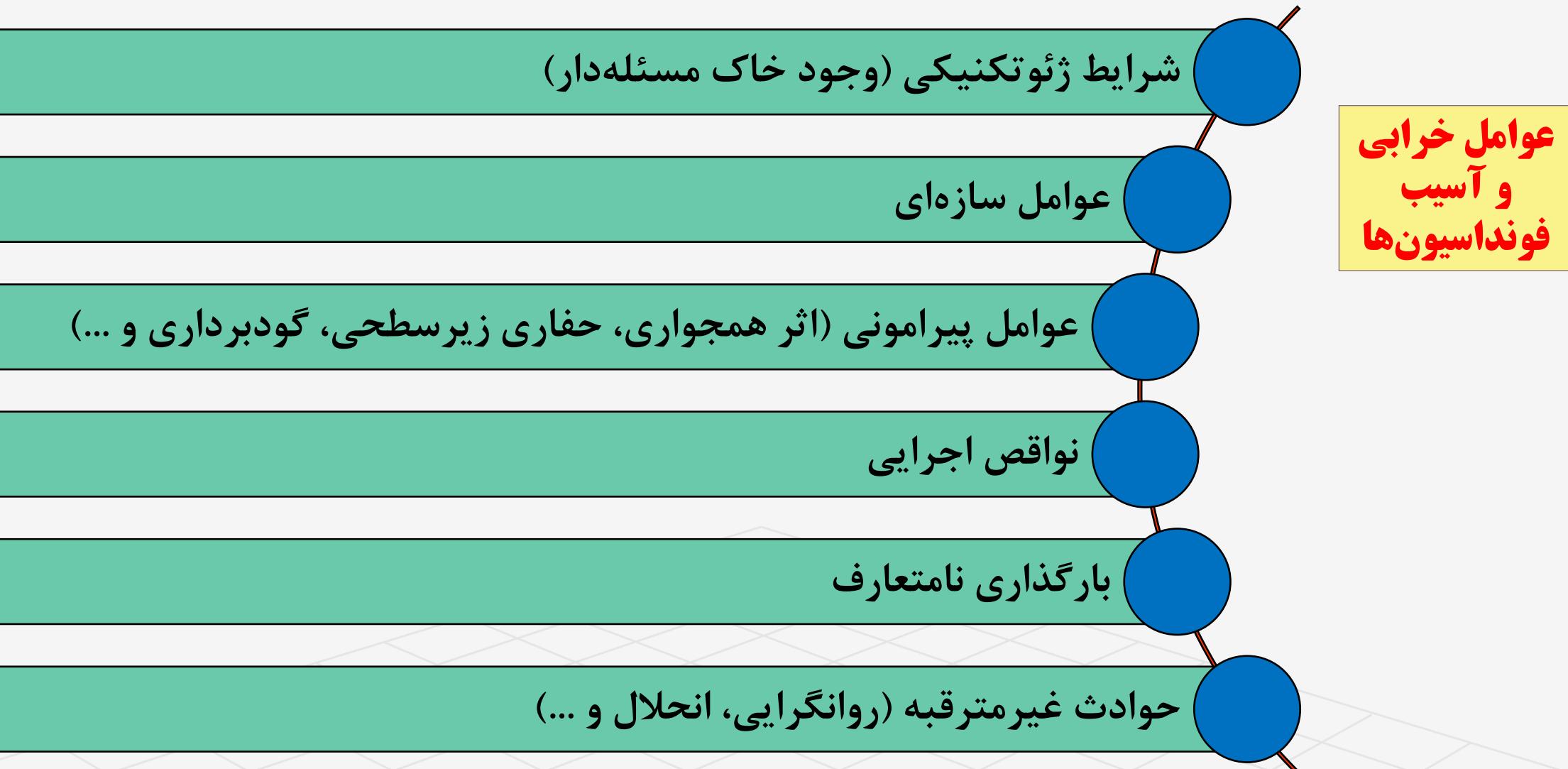
4. Foundation System Selection

۴. انتخاب سیستم فونداسیون



5. Foundation Damages

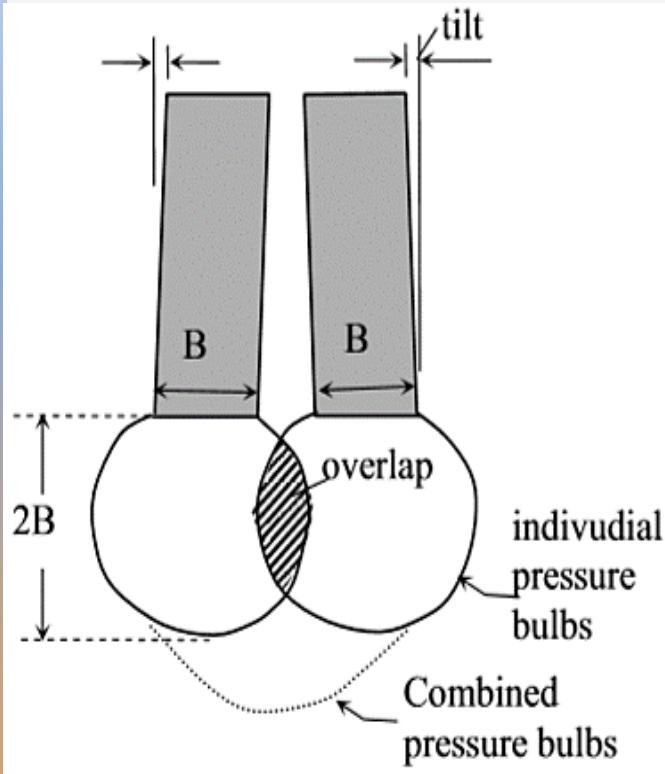
۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون



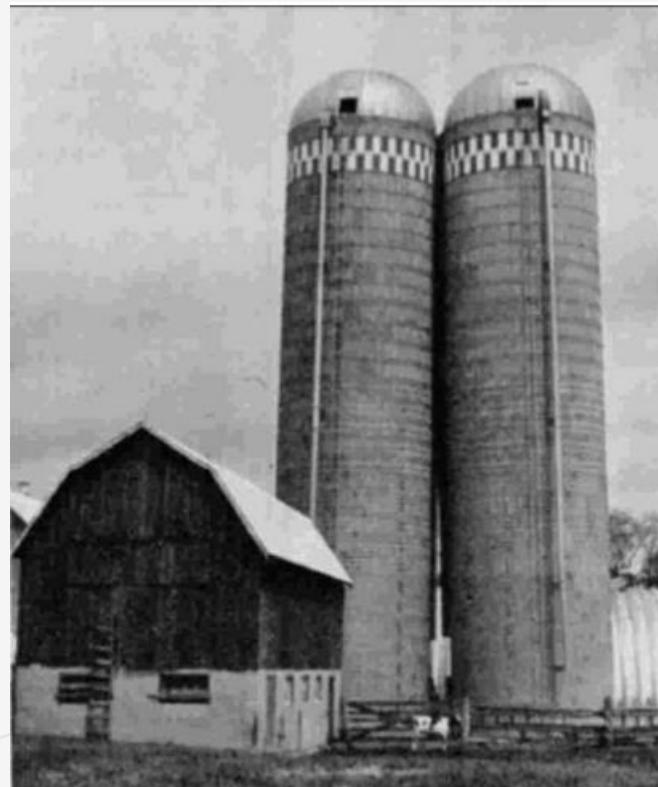
5. Foundation Damages

۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

نشست و کج شدگی سازه‌ها بر اثر همپوشانی تنش‌ها



Interference of pressure bulbs



Tilting adjacent silos

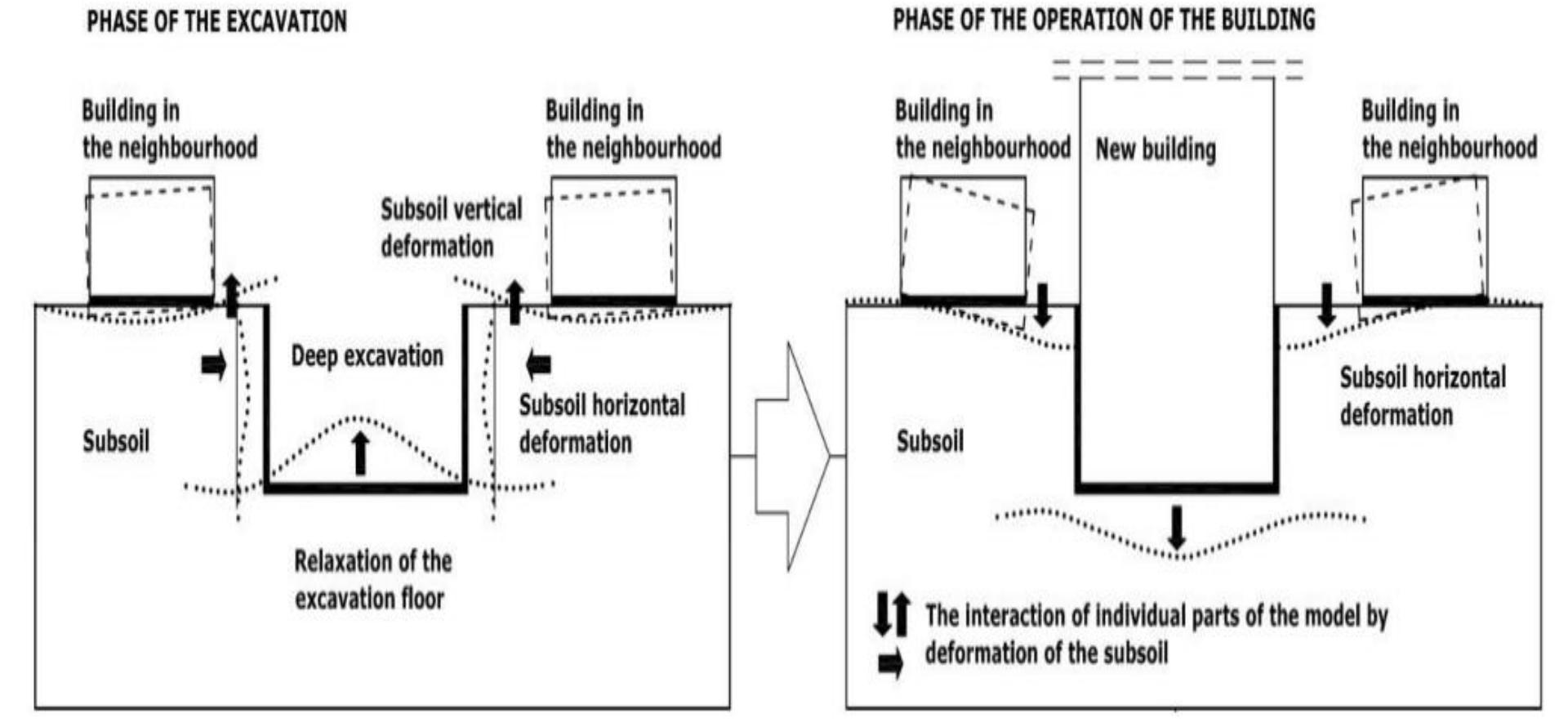


The leaning towers

اثر همچواری
سازه‌ها

5. Foundation Damages

۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون



حفاری و
گودبرداری
در مجاورت و
زیر سازه

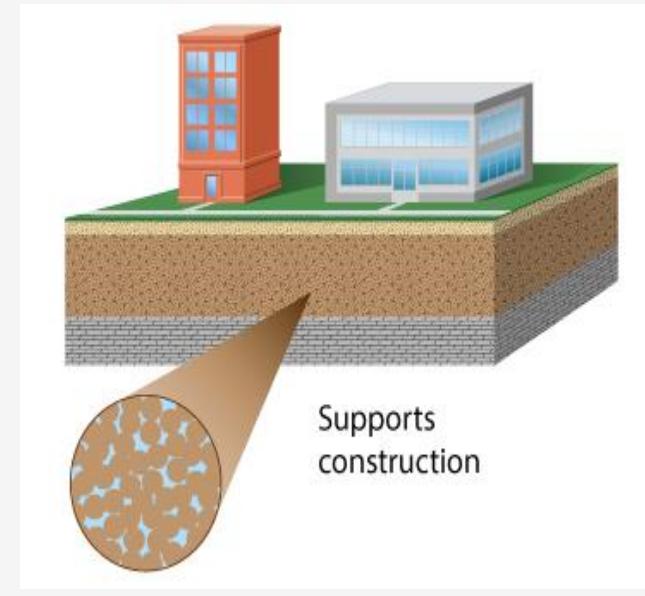
Phase of the Excavation and Operation of the Buildings

5. Foundation Damages

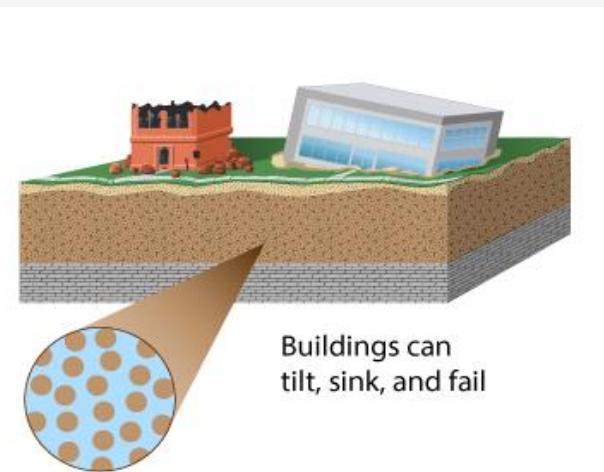
۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون



Taiwan earthquake 1999



وقوع
روانگرایی



5. Foundation Damages

۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون



5. Foundation Damages

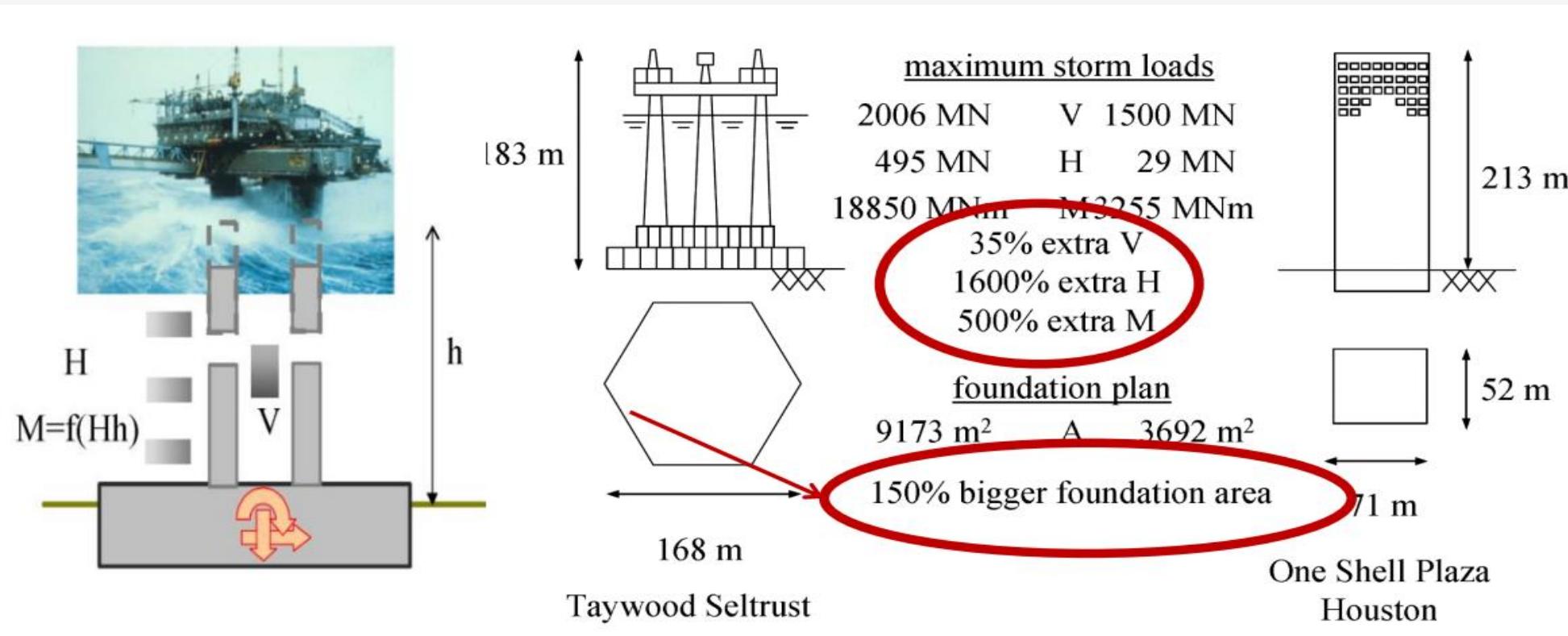
۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

ضعف پی‌های سطحی در مقابل بارهای جانبی، لنگر و برکنش

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

$$= \text{بار فونداسیون } VMH$$

معضلات ناپایداری در
سازه‌های بلندمرتبه



5. Foundation Damages

۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

Pisa Tower Tilting

مورد عملی شماره یک:

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 m^2

Type of Damages

- The inclination of the tower was 5.5° (in other words, about 10%) due to settlement of the foundation



5. Foundation Damages

۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

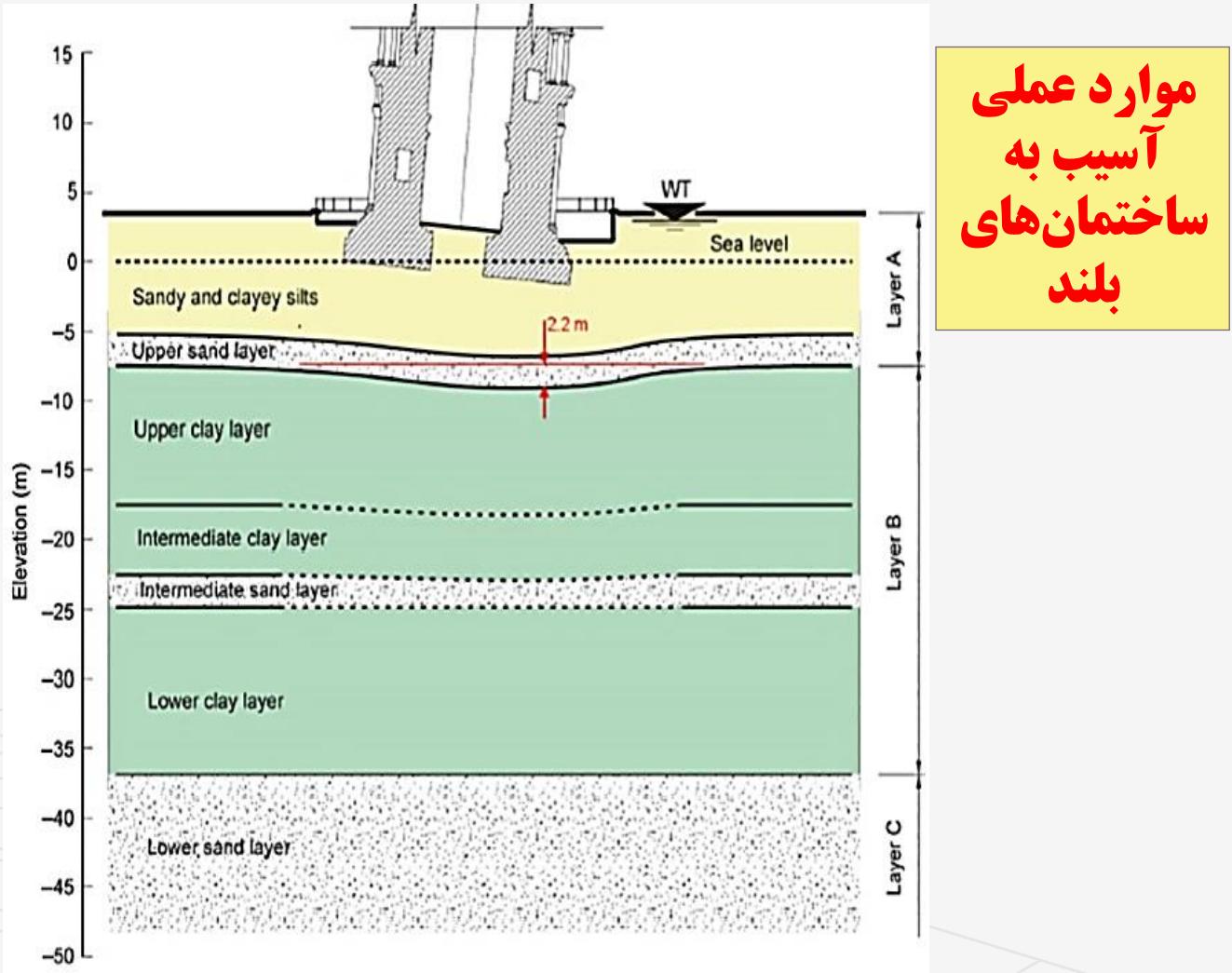
The subsoil of the Tower

- 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



5. Foundation Damages

۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

Santos Adjacent Buildings

- مورد عملی شماره دو:
- رخ دادن نشست‌های غیریکنواخت در ساختمان‌های مرتفع ساخته شده بر روی فونداسیون سطحی

موارد عملی
آسیب به
ساختمان‌های
بلند

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

Millennium Tower San Francisco مورد عملی شماره سه:

موارد عملی آسیب به ساختمان‌های بلند

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.



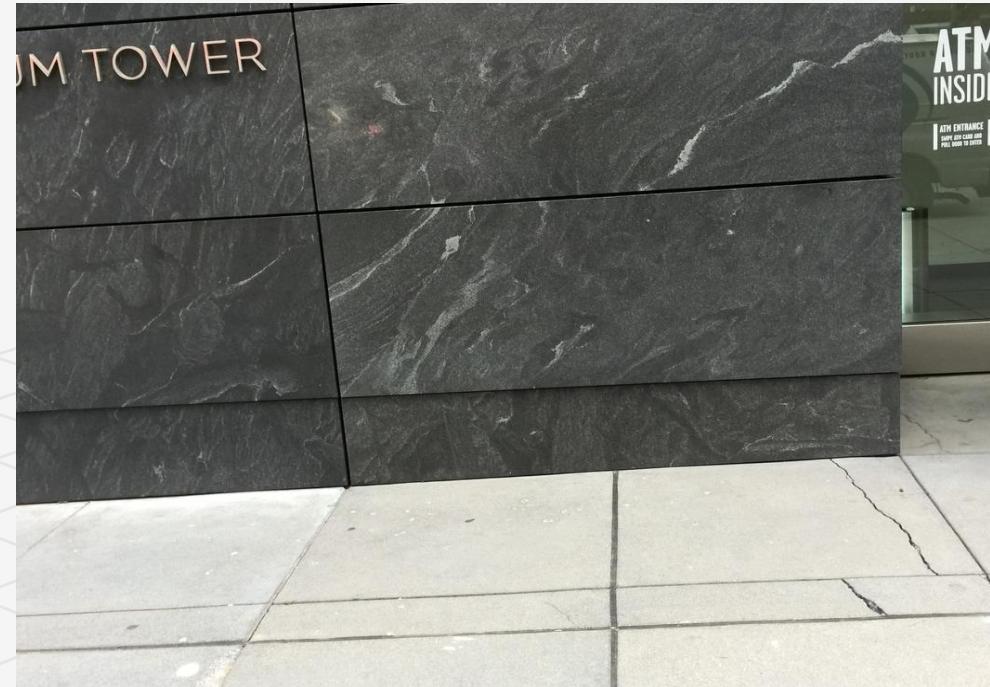
5. Foundation Damages

۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

Millennium Tower San Francisco مورد عملی شماره سه:

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**

The amount of tilt and sink of the structure until 2022

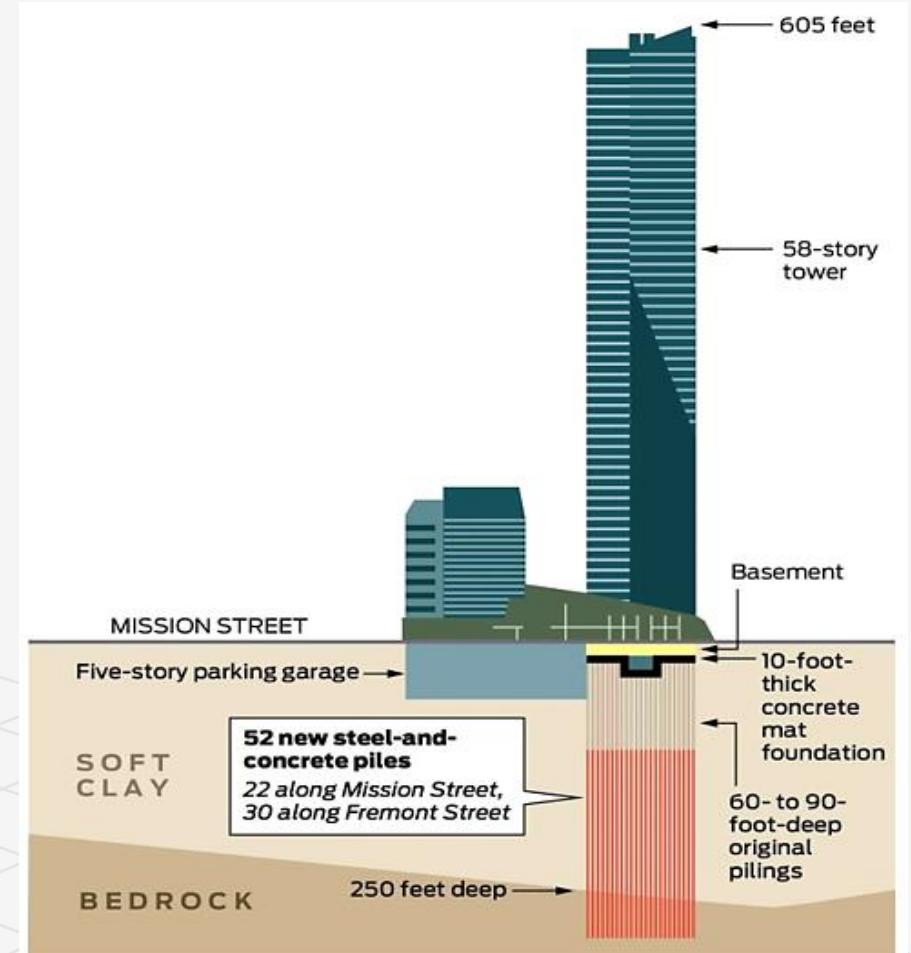
Year	Tilt (cm)	Sink (cm)
2016	15	41
2018	36	46
2022	71	*



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

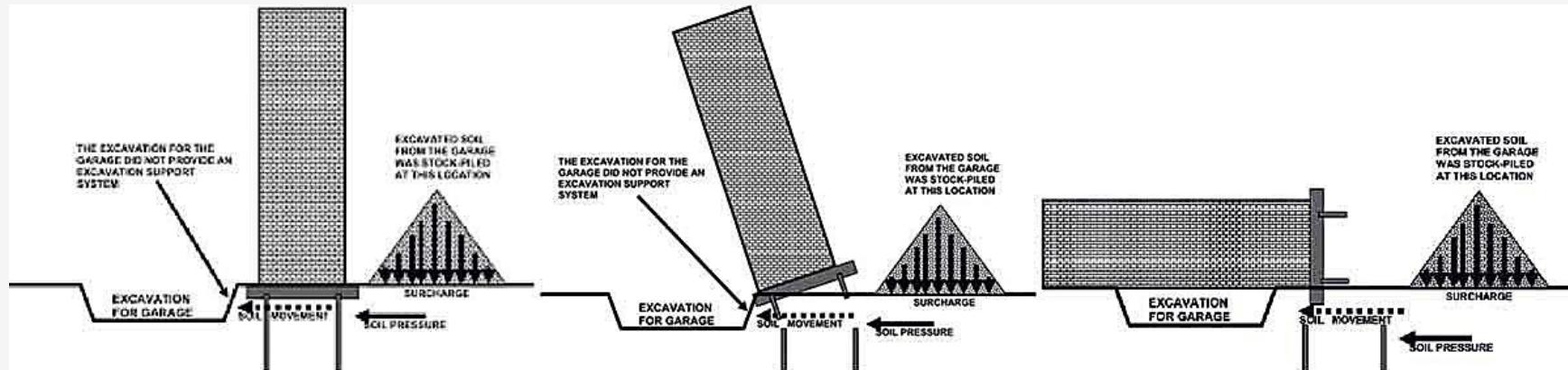
موارد عملی آسیب به ساختمان‌های بلند



5. Foundation Damages

۵. آسیب‌ها و معضلات فونداسیون

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



موارد عملی
آسیب به
ساختمان‌های
بلند

علل احتمالی ریزش ساختمان:

- اعمال سربار در ضلع شمالی و عدم اجرای سازه نگهبان برای گود
- خرابی شمع‌های فوانداسیون سازه
- خاک اشباع ضعیف زیر ساختمان

6. Case Studies

۶. موارد عملی

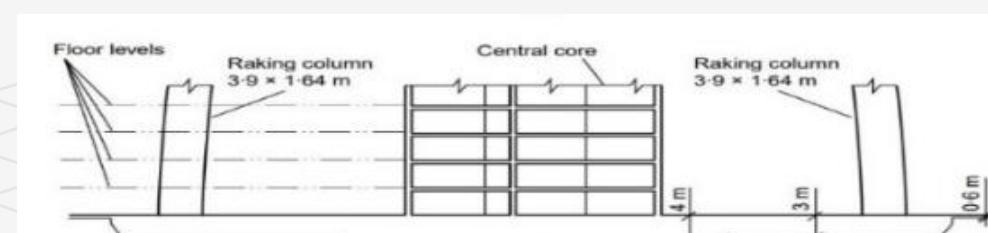
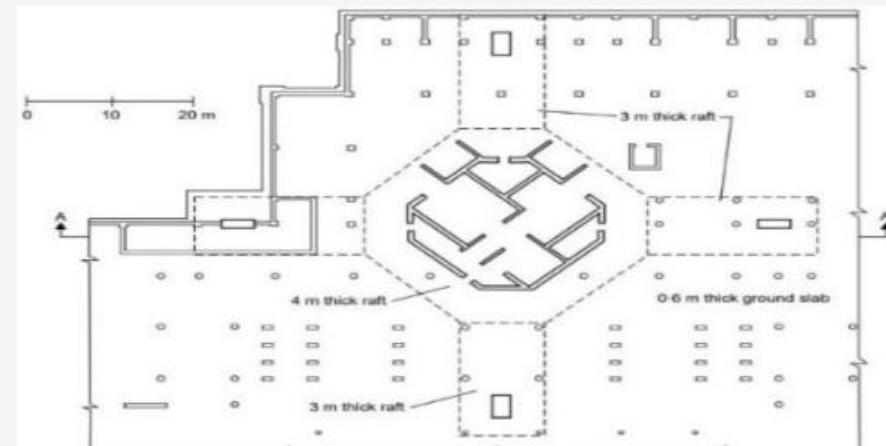
1- Al Faisaliah building, Raft

- Located in **Riyadh** center
- **40-story office tower**
- **3-4 m thick raft**
- **Area of 1600 m² and volume of 6000 m³ 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



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 m²
- **Primary use:** Office & Museum

۱- نقش مطالعات رئوتکنیک در شناخت خاک مسئله‌دار

۲- اهمیت شمع‌های انتکایی

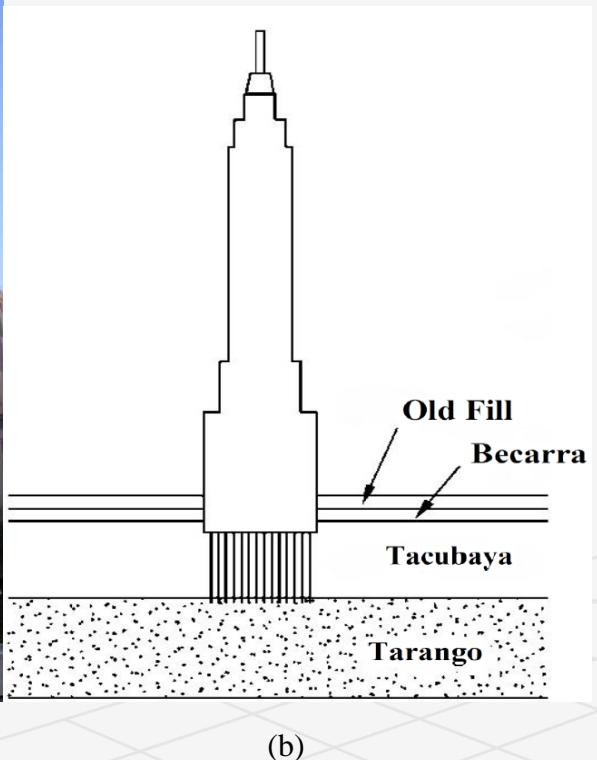
۳- نمونه موفق شناورسازی

۴- انتخاب صحیح فونداسیون جهت کنترل نشست‌ها

6. Case Studies

۶. موارد عملی

2-Torre Latino Americana, Floating foundation and piles



a) 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
Mexico City clay (MH)	7 to 10
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)

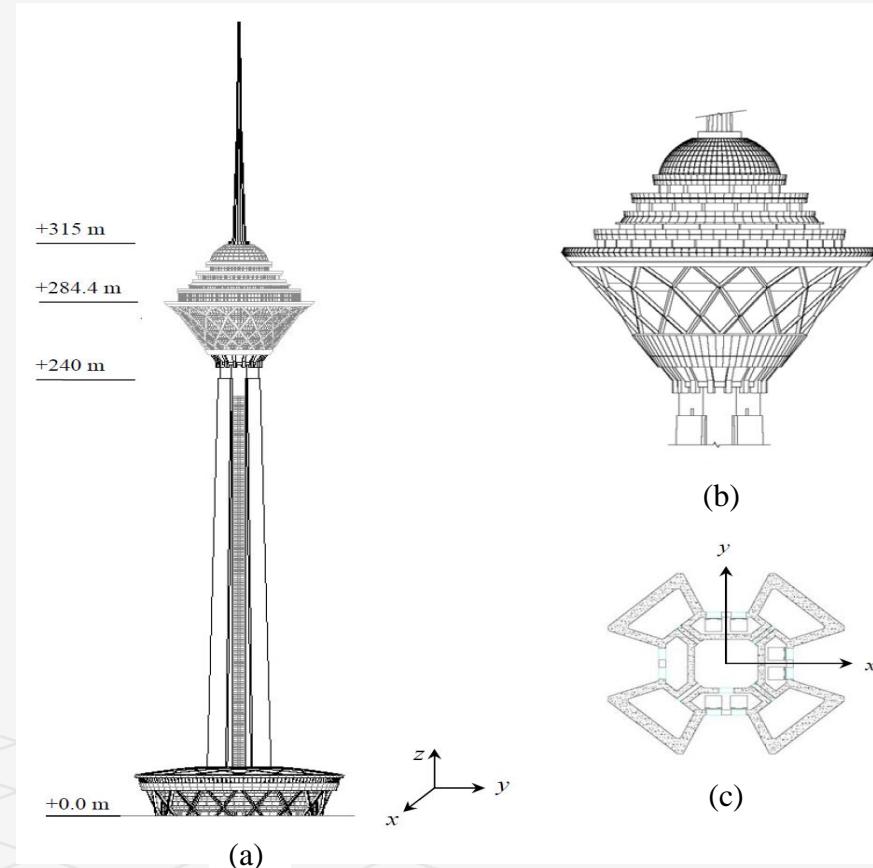
6. Case Studies

۶. موارد عملی

3- Milad Tower, Hybrid Raft

- Year of Completion: 2008
- Height: 453 m
- Gross floor area: 154,000 m²
- Primary use: Communication, Conference, Leisure

لزوم به کارگیری پی‌های عریض در سازه‌های
خاص و تحت بارهای ناپایدارکننده بزرگ

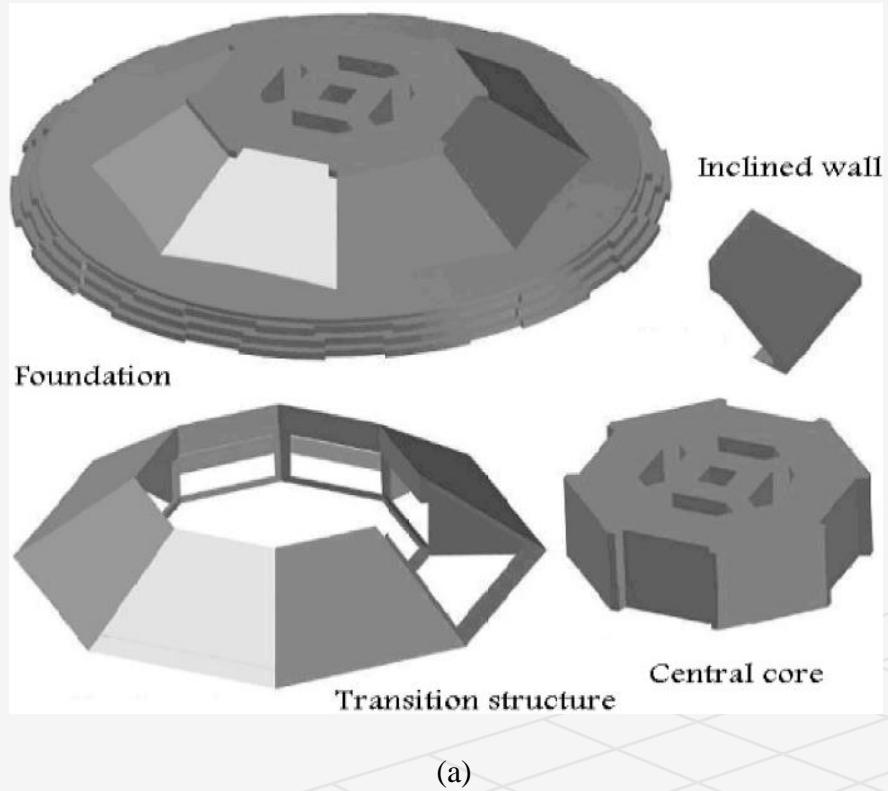


The Milad Tower: (a) completed form, (b) head structure, (c) shaft section at zero level

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

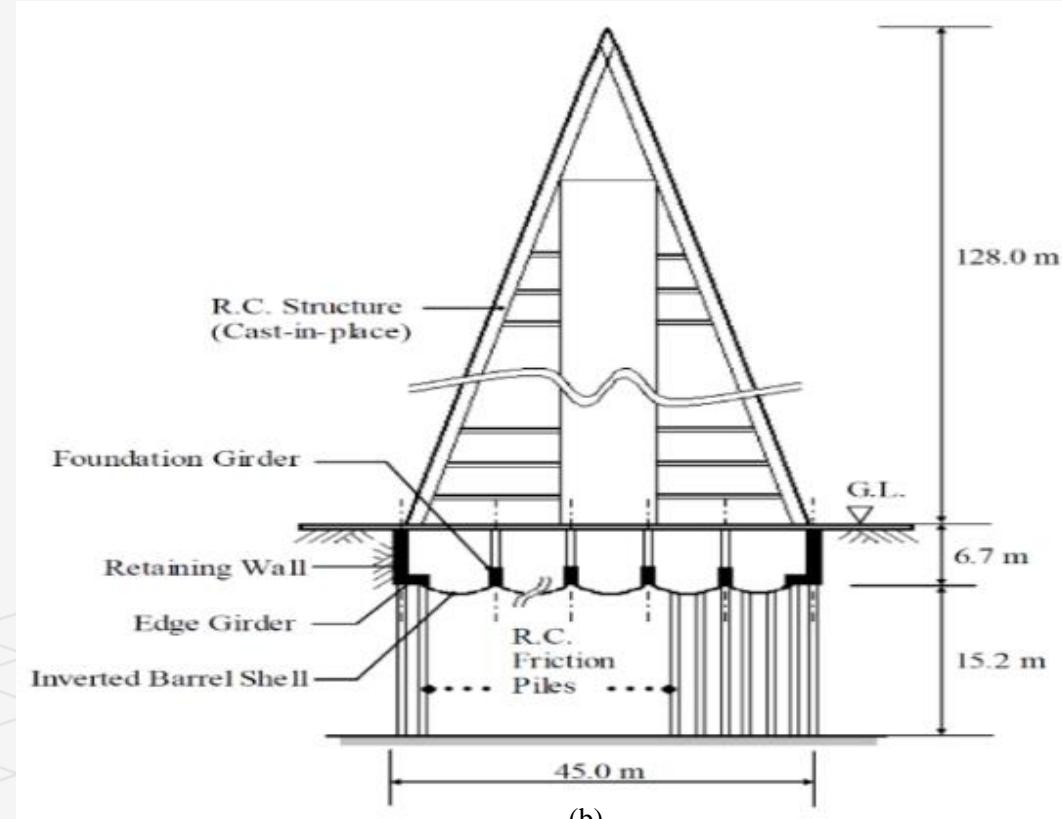
6. Case Studies

۶. موارد عملی

4-The Nonoalco Tower, Inverted barrel shell



(a)



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

6. Case Studies

۶. موارد عملی

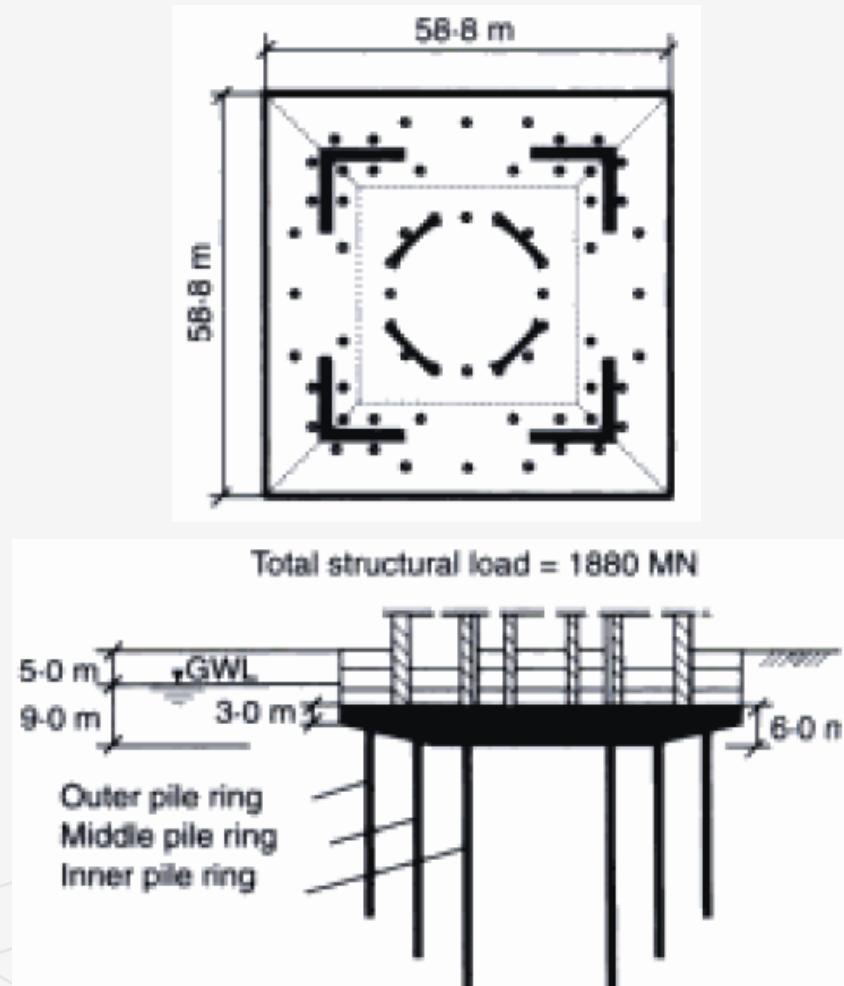
5-Meseturm Building, PRF

- **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-Messegelände Building, PRF



6. Case Studies

۶. موارد عملی

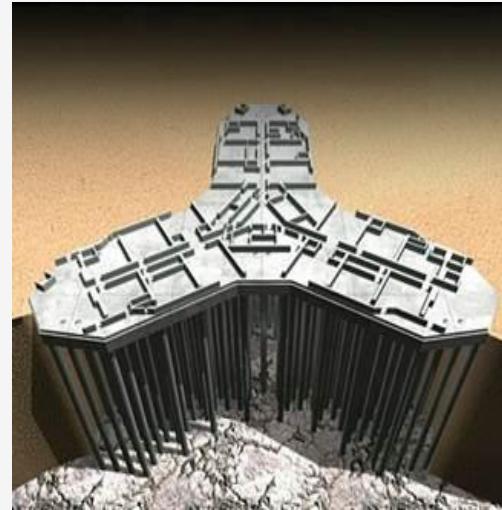
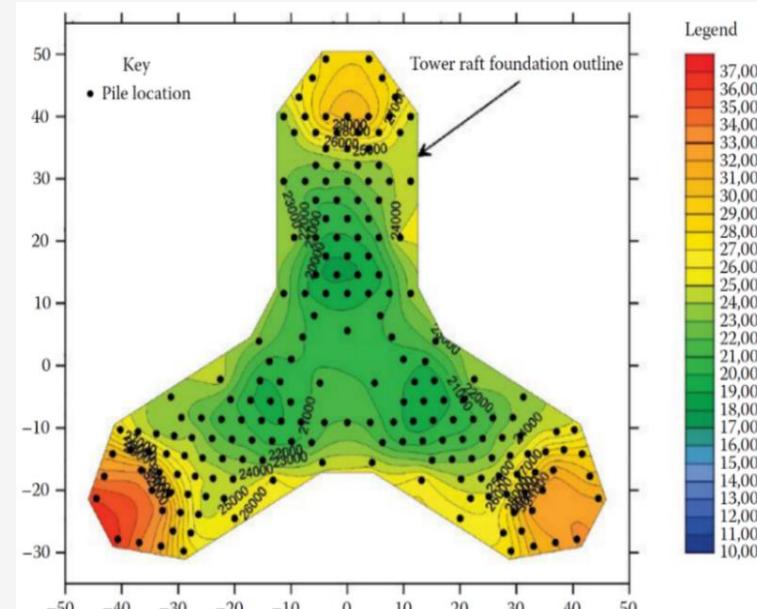
6-Burj Khalifa Tower, PRF

- 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



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

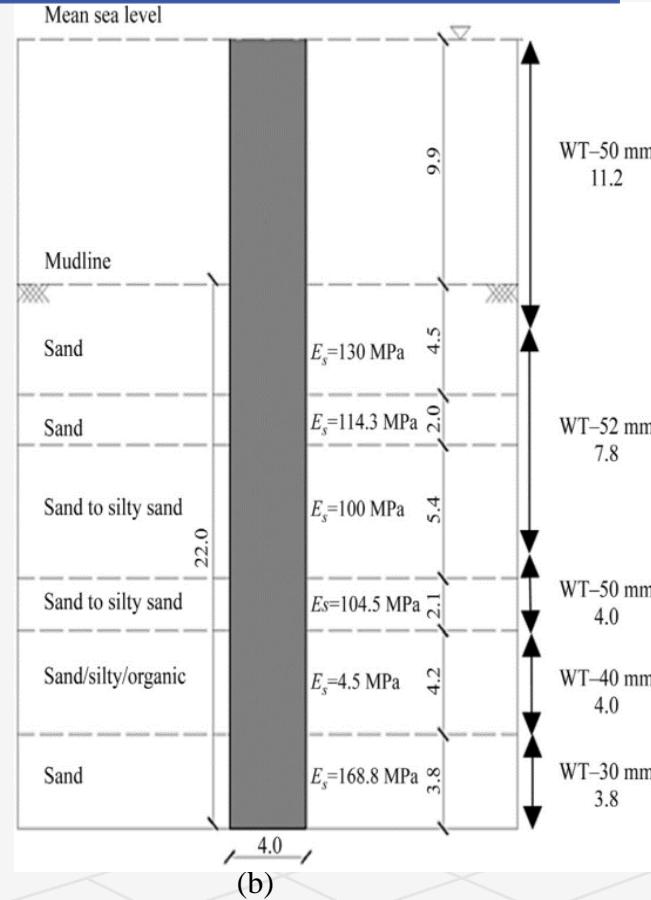
7-Horns Rev 1 Offshore Wind Farm

- 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 km²
- 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



Soil layer	Type	Depth [m]	E_s [MPa]	γ / γ' [kN/m ³]	ϕ [°]	ψ [°]	v [-]
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 monopole 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 ابراهیمی‌پور

مهندس سید سجاد شیرانی

مهندس پویا پیرامی سامانی

با سپاس از التفات شما
Thanks for your attention