

بسمه تعالی

سازمان نظام مهندسی ساختمان استان گیلان
کمیسیون تخصصی عمران

سمینار آموزشی

سیستم پی ساختمان‌ها؛
الگوهای مهندسی با رویکرد توسعه پایدار

**Buildings Foundation System;
Engineering Patterns Trend Sustainable Development**

توسط:

دکتر ابوالفضل اسلامی A. Eslami

عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)،
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست (AUT)

۱۰ اسفند ۱۴۰۲ - رشت، گیلان



سازمان نظام مهندسی ساختمان گیلان

کمیسیون تخصصی عمران سازمان نظام مهندسی ساختمان استان گیلان برگزار می کند:

سمینار آموزشی سیستم پی ساختمان ها الگوهای مهندسی با رویکرد توسعه پایدار



سخنران: دکتر ابوالفضل اسلامی

استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

هیأت علمی سابق دانشگاه گیلان

دکتری مهندسی ژئوتکنیک از دانشگاه اتاوا کانادا

سرفصل های سمینار:

۱. مبانی ژئوتکنیکی
۲. سیستم فونداسیون: فرم و عملکرد
۳. طراحی ژئوتکنیکی و سازه ای
۴. خرابی ها و خسارات پی ها
۵. ترمیم و تقویت
۶. مطالعات موردی

پنج شنبه ۱۰ اسفندماه ۱۴۰۲

ساعت ۱۰ تا ۱۴

سالن اجتماعات سازمان نظام مهندسی ساختمان گیلان

ثبت نام از طریق کارتابل مهندسی - منوی آموزش (ثبت نام در سمینار / وینار)

- ❖ **Aims & Objectives** ❖ **برنامه و هدف**
- ❖ **Geotechnical Engineering** ❖ **مهندسی ژئوتکنیک**
- ❖ **Foundation Systems: Forms & Functions** ❖ **سیستم فونداسیون: فرم و عملکرد**
- ❖ **Foundations Design Requirements** ❖ **طراحی ژئوتکنیکی و سازه‌ای پی**
- ❖ **Foundations Failures & Damages** ❖ **خرابی‌ها و خسارات پی‌ها**
- ❖ **Retrofit & Strengthening** ❖ **ترمیم و تقویت**
- ❖ **Case Histories & Practical Examples** ❖ **موارد عملی و کاربردی**
- ❖ **Summary & Prospect** ❖ **جمع‌بندی و چشم‌انداز**

دنیای ژئوتکنیک

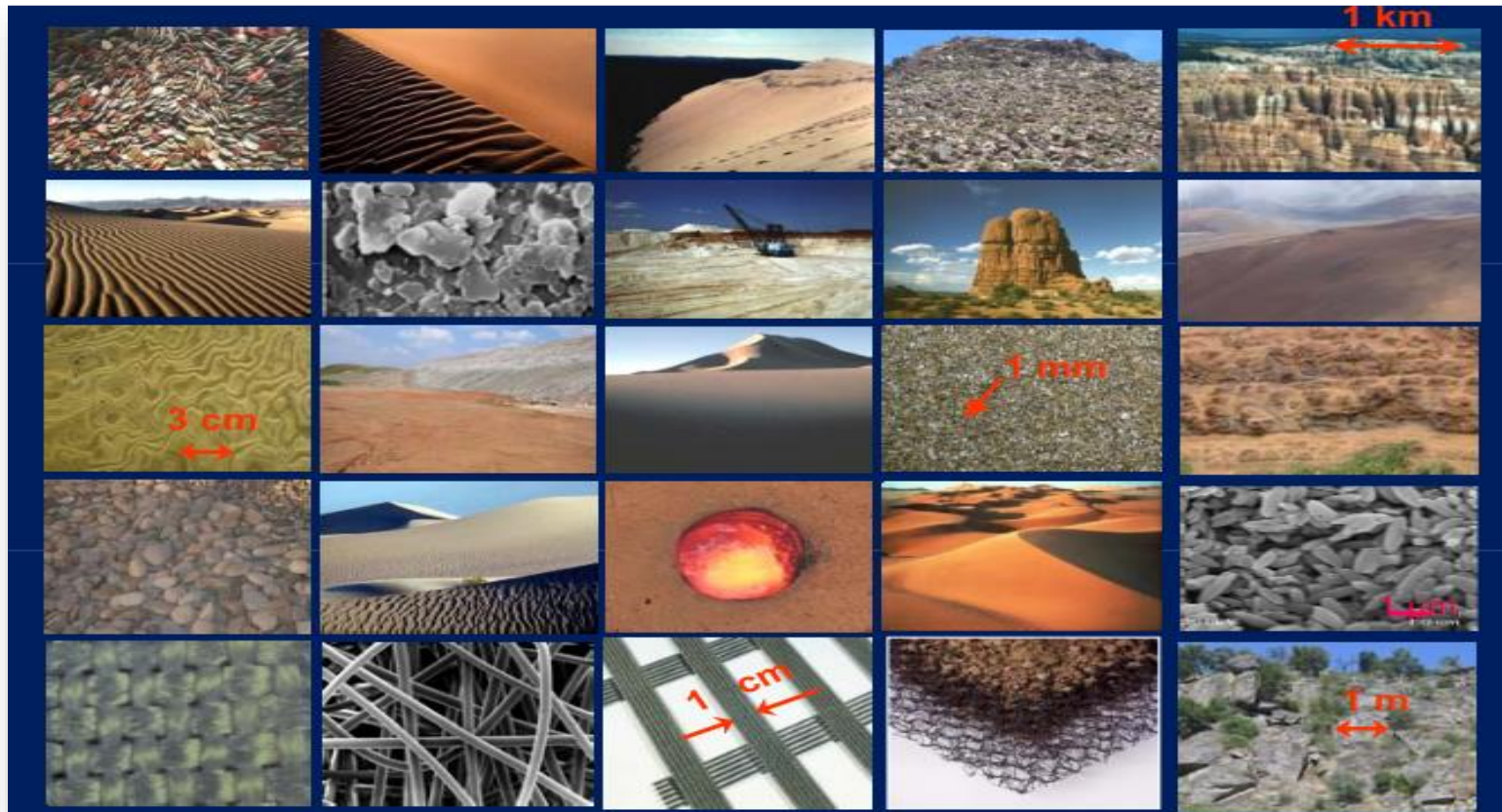
مهندسی ژئوتکنیک، شاخه‌ای از مهندسی عمران

Geomaterials: Soil, Rock, Ground Water

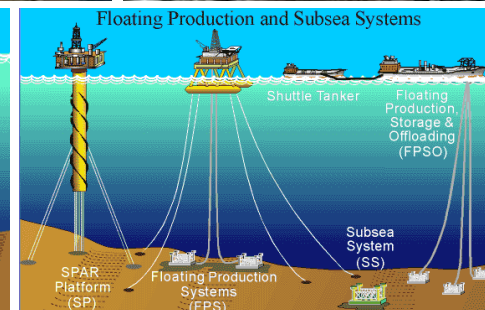
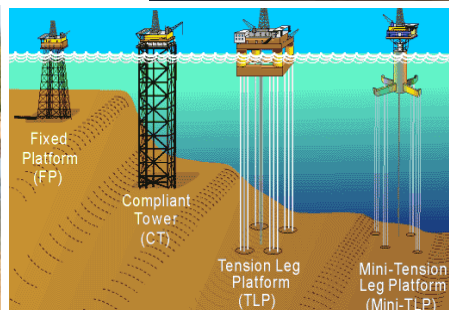
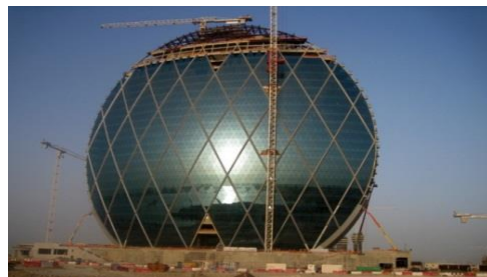
مصالح ژئوتکنیکی

Geosynthetics: Geotextile, Geogrid, Geonet, Geomembrane,...

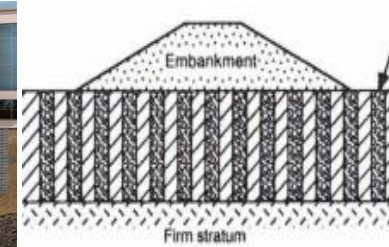
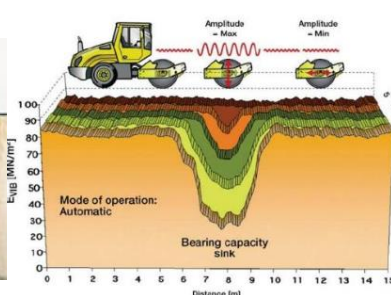
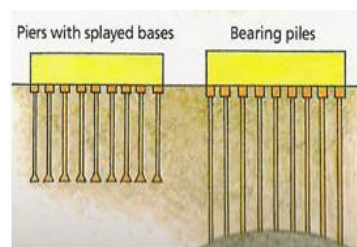
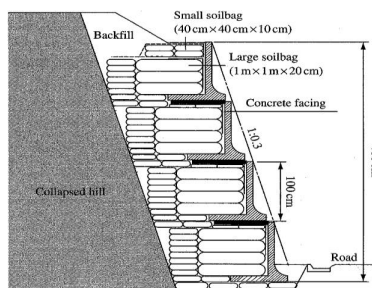
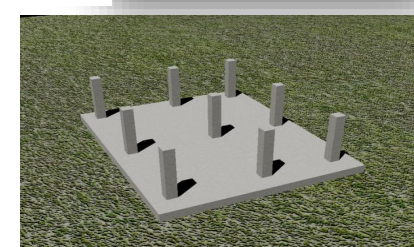
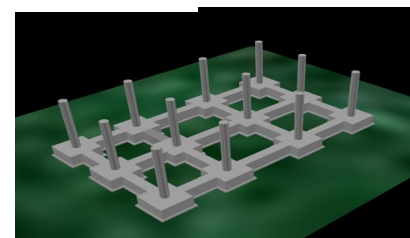
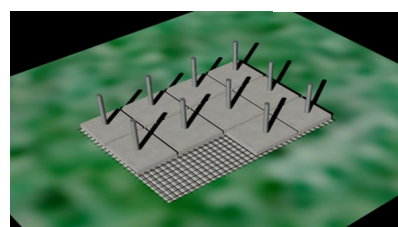
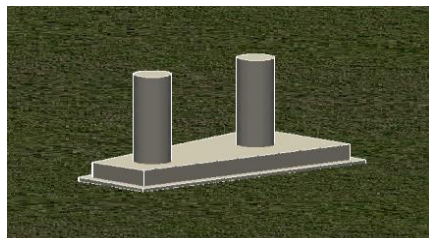
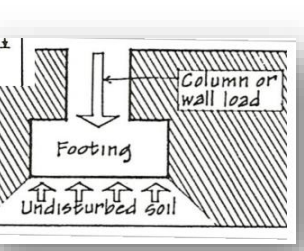
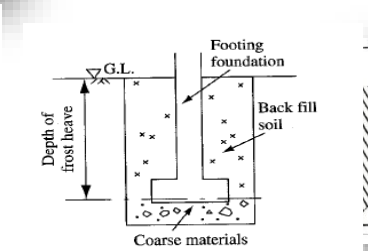
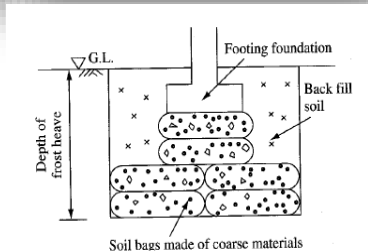
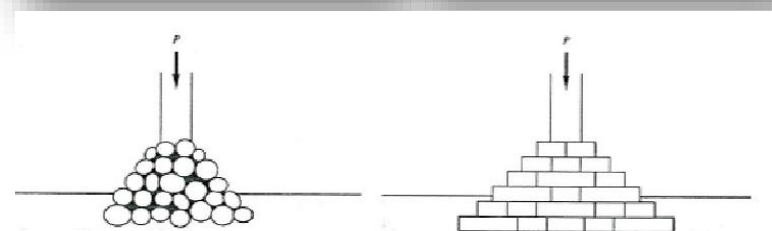
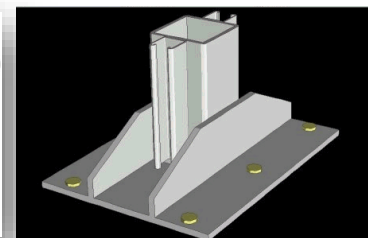
مصالح مصنوعی



سازه ها و ابنیه



پی های متداول



مهندسی پی: ژئوتکنیک، سازه و ساخت

Before you speak,
THINK...

T - Is it true?
H - Is it helpful?
I - Is it inspiring?
N - Is it necessary?
K - Is it kind?

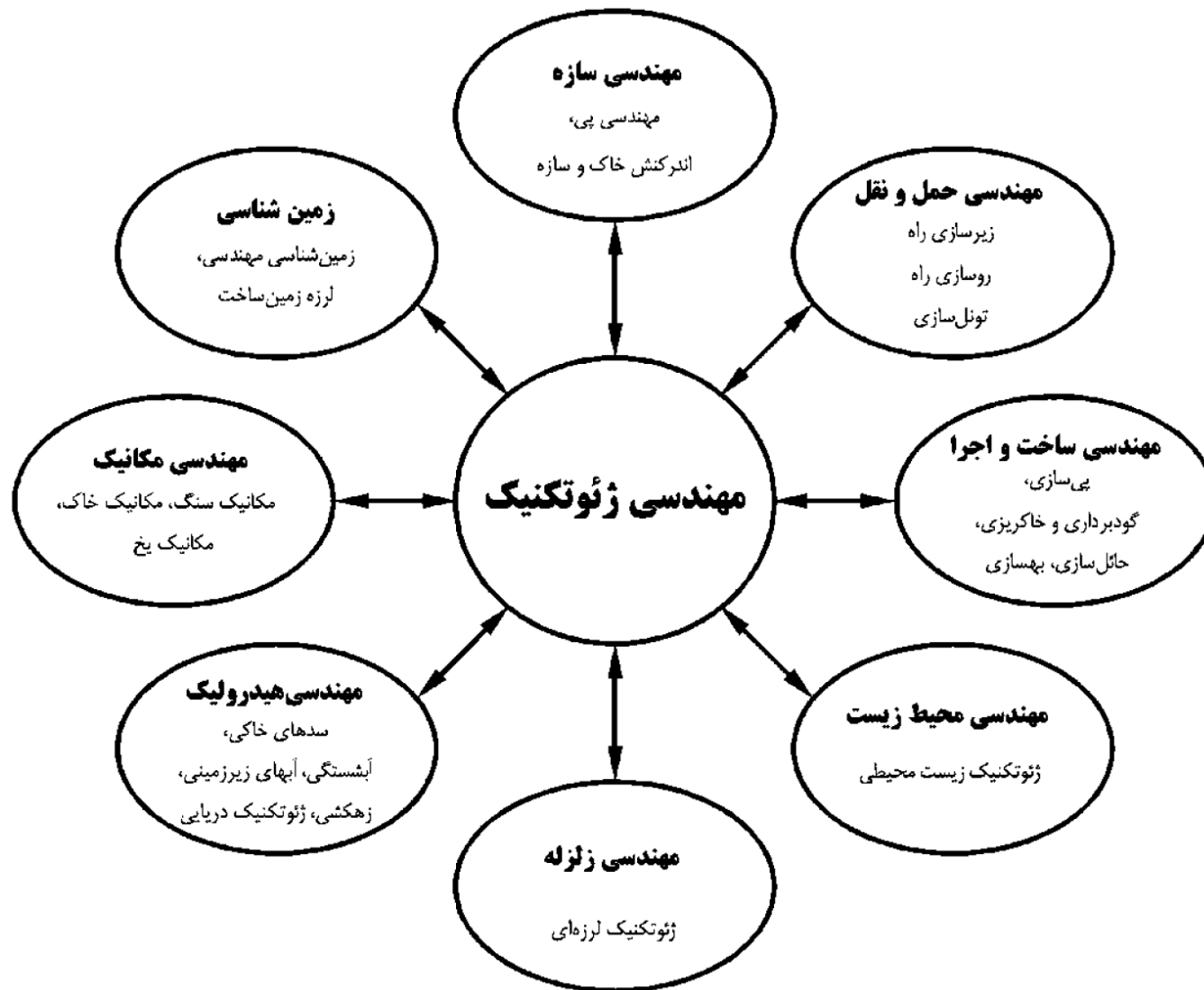
THINKING MINDS



۱. مهندسی ژئوتکنیک

1. Geotechnical Engineering

همپوشانی مهندسی ژئوتکنیک و سایر گرایش‌های مهندسی



اهداف و کاربرد مطالعات ژئوتکنیک

- شناسایی مصالح طبیعی به عنوان منابع قرضه
- تعیین مقاومت خاک و سنگ بستر
- تخمین سطح آب زیرزمینی
- تعیین خصوصیات سختی خاک و سنگ محل (ویژگی‌های تراکم‌پذیری و فشردگی)
- تصمیم‌گیری در خصوص نوع پی‌های حادثه (سطحی، نیمه‌عمیق، عمیق و یا بهسازی)
- بررسی پتانسیل مشکلات زمین از جنبه‌های مختلف ناپایداری و چگونگی مقابله
- شناخت مشکلات ژئوزیست محیطی و ارائه راهکارهای مناسب جهت رفع آن‌ها
- و در نهایت طراحی فنی، اجرایی و اقتصادی (بهینه) بخش‌های مختلف پروژه

گام‌های انجام مطالعات ژئوتکنیک

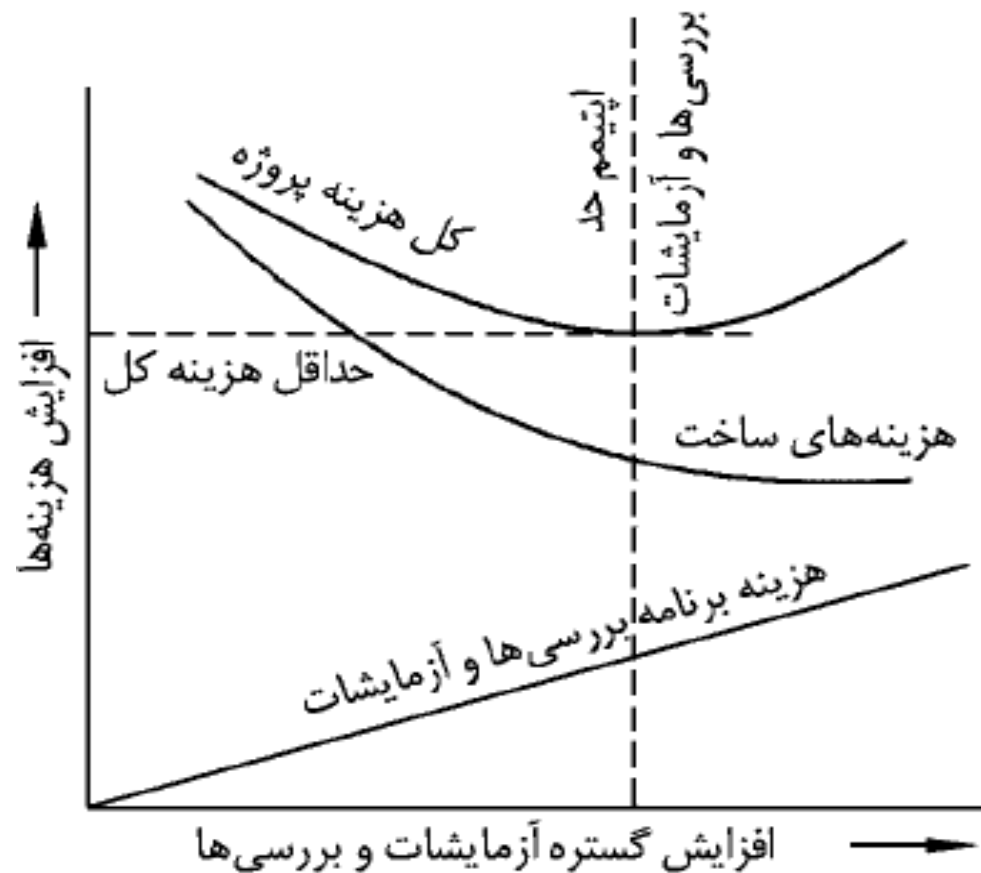
- ۱- جمع‌آوری اطلاعات اولیه (Data Collection)
- ۲- بازدید از سایت و انجام آزمایش‌های غیرمخرب (Site Visit & NDT)
- ۳- عملیات حفاری، نمونه‌گیری و آزمایش‌های درجا (Drilling Operations & In-Situ Testing)
- ۴- تست‌های آزمایشگاهی (Laboratory Tests)
- ۵- سنتز اطلاعات و گزارش ژئوتکنیکی (Information Process & Geotechnical Report)
- ۶- ابزارگذاری و پایش (Instrumentation & Monitoring)

داده‌های ویژه مهندسی پی:

Geomaterial Strength & Stiffness Parameters

پارامترهای مقاومت و سختی

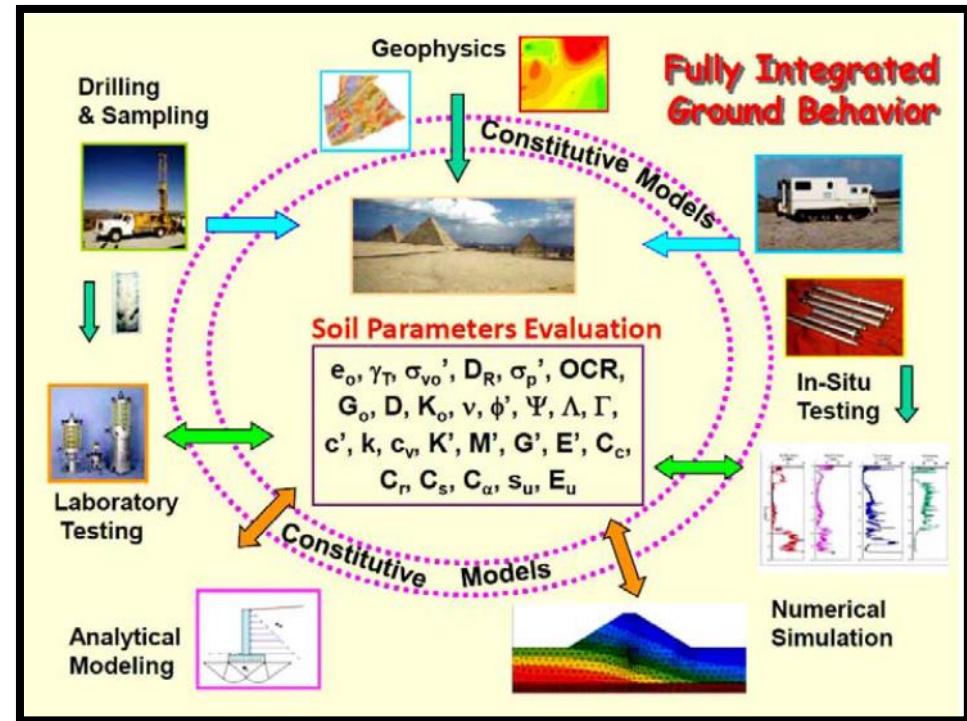
اهمیت مطالعات ژئوتکنیک



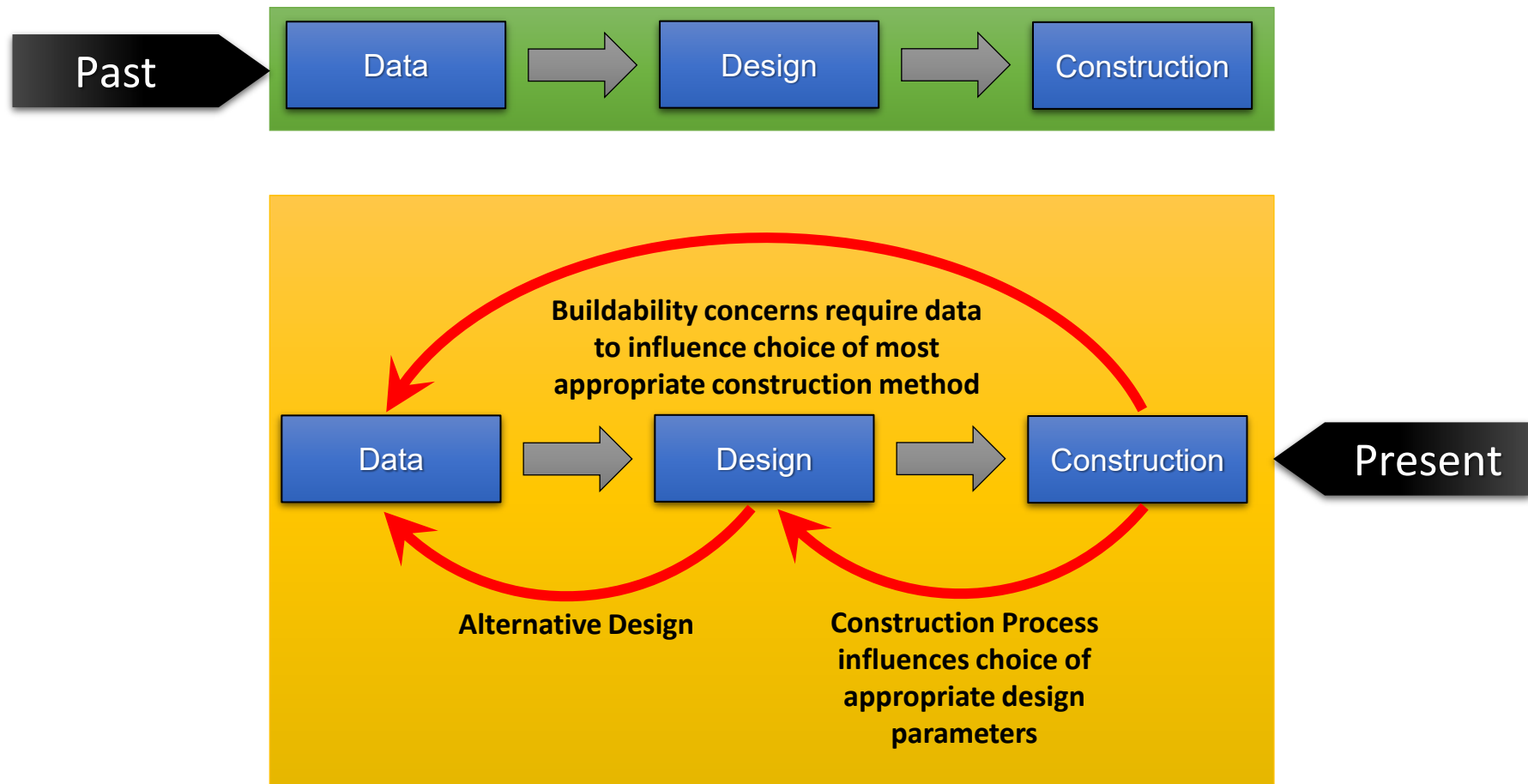
تأثیر هزینه مطالعات ژئوتکنیک بر بهینه‌سازی ساخت و اجرای پروژه

منابع داده در مهندسی ژئوتکنیک

1. Maps
2. Site Visit
3. Drilling, Boring, and Sampling
4. Geophysical Tests (Non-destructive)
5. On-situ Tests
6. In-situ Tests
7. Laboratory Element Testing
8. Laboratory Physical Modeling
9. Full-scale Testing
10. Instrumentation and Monitoring



روند طراحی، اجرا و عملکرد



(ICE, Manual Geotechnics, 2012)

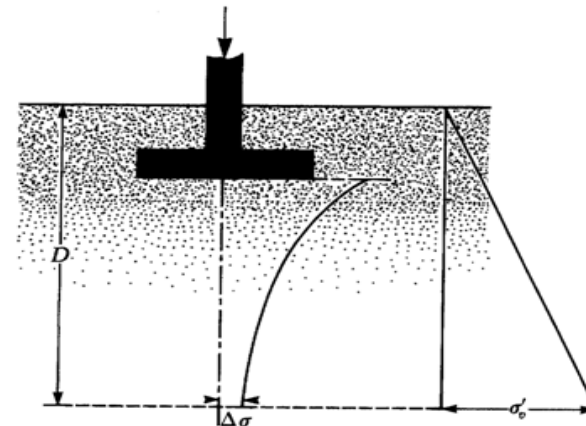
گستره مطالعات ژئوتکنیک

- طبق توصیه CFEM, 1992 در ساختمان‌های با پلان بزرگتر از ۲۵۰ مترمربع و کمتر از ۱۰۰۰ مترمربع، حداقل ۴ گمانه یا چاه لازم است.
 - اگر زمین مسطح و شرایط خاک عادی باشد و دو گمانه اول شرایط عادی را نشان دهند، ممکن است به سه مورد نیز اکتفا نمود.
 - عموماً پنج گمانه یا چاه به صورت یک مورد در مرکز و چهار مورد در گوشه‌ها ترجیح داده می‌شود، به خصوص هنگامی که سایت مسطح نیست.
 - در ساختمان‌های با پلان کمتر از ۲۵۰ مترمربع معمولاً سه چاه یا گمانه لازم می‌باشد.
- جدول حداقل تعداد گمانه (مبحث ۷ مقررات ملی ساختمان-۱۴۰۰)

مساحت	اهمیت ساختمان	تعداد حداقل گمانه
یک ساختمان منفرد با سطح اشغال کمتر از ۳۰۰ مترمربع	خیلی زیاد و زیاد	۳
	متوسط	۲
	کم	۱
یک ساختمان منفرد با سطح اشغال ۳۰۰ الی ۱۰۰۰ مترمربع	خیلی زیاد و زیاد	۴
	متوسط	۳
	کم	۲

عمق مطالعات ژئوتکنیک

- حداقل عمق چاه و یا گمانه مطالعاتی، عمقی است که افزایش تنش خالص حاصل از بار روسازه در خاک به کمتر از یکی از دو معیار، ۱۰٪ مقدار تنش تماسی وارده از کف پی به زمین و یا ۵٪ میزان تنش مؤثر در خاک، در آن عمق برسد.
- کاهش در عمق شناسایی حاصل از معیارهای فوق وقتی که به سنگ بستر و یا خاک متراکم و سخت برخورد شود می‌تواند مورد ملاحظه قرار گیرد.



- پی مربعی - ۲ تا ۳ برابر عرض پی
- پی نواری - ۳ تا ۴ برابر عرض پی
- پی گسترده - ۱/۵ برابر عرض پی

بر پایه معیار ۱۰٪ مقدار تنش

عمق مطالعات ژئوتکنیک

- اگر خاک بستر از نوع رس تحکیم عادی و نشست‌پذیر باشد ممکن است تغییر حفاری‌ها و بررسی‌های عمیق‌تر بیش از قواعد مربوط به تقلیل تنش تحمیلی به ۱۰٪ و یا برابری آن با ۵٪ تنش مؤثر مدنظر قرار گیرد.
- چاه‌ها و گمانه‌ها باید تا اعماق پایین‌تر از نهشته‌هایی که نامناسب جهت اهداف پی‌سازی هستند مثل خاکریزها و لایه‌های ضعیف تراکم‌پذیر، ادامه یابند.
- حداقل عمق چاه و یا گمانه در پایین‌ترین قسمت مربوط به سطح پی‌سازی نباید کمتر از ۶ متر باشد، مگر اینکه به سنگ بستر و یا زمین متراکم در اعماق سطحی‌تر برخورد شود. اگر به سنگ بستر برخورد شود بیش از یک چاه و یا گمانه باید حداقل ۳ متر در آن نفوذ نموده تا اطمینان حاصل شود که سنگ حاصل، از نوع تخته‌سنگ و یا پاره‌سنگ نیست.

دستورالعمل کلی جهت تعیین تعداد و عمق گمانه‌ها (Sowers, 1970)

شرایط زیر سطحی	سطح زیر پی جهت حفاری یک گمانه m^2	* عمق حداقل حفاری
ضعیف و متددار	100-300	$6S^{0.7} + D_f$
متوسط	200-400	$5S^{0.7} + D_f$
مناسب و خوب	300-1000	$3S^{0.7} + D_f$

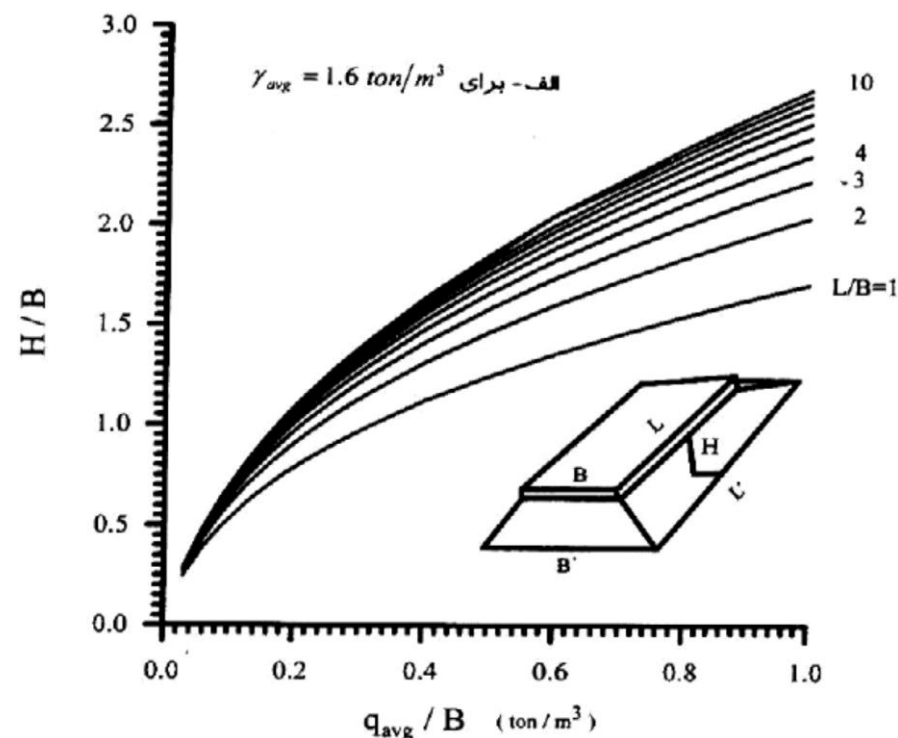
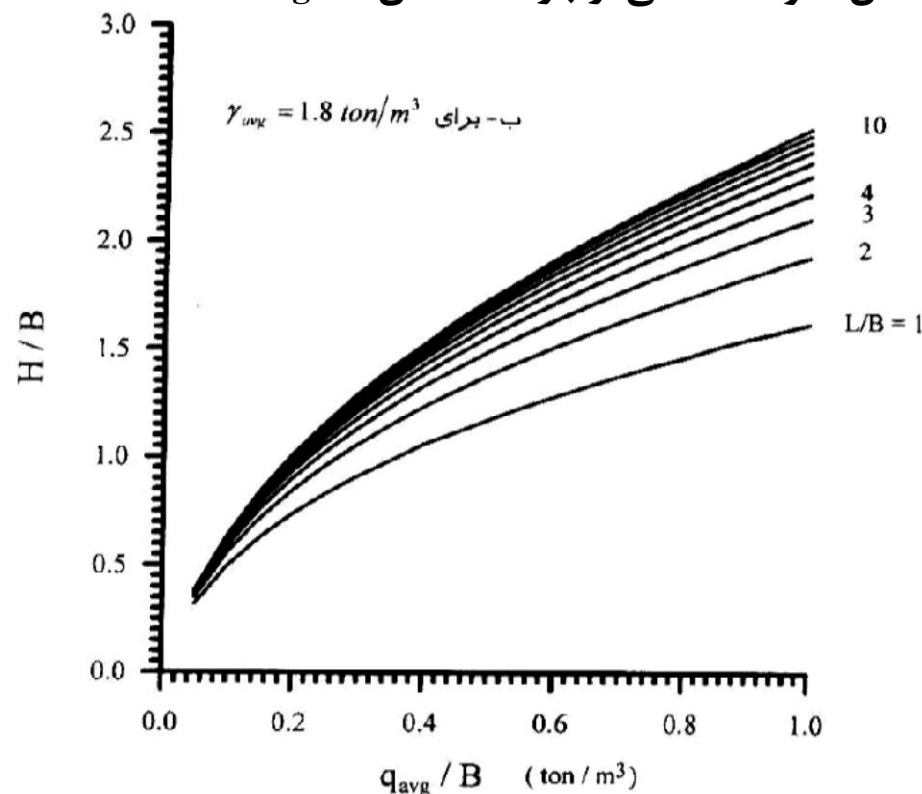
* S تعداد طبقات ساختمان و D_f عمق پیش بینی شده استقرار پی

عمق مطالعات ژئوتکنیک

H = عمق گمانه

B = بعد ساختمان

q_{avg} = تنش متوسط ناشی از بار ساختمان



الف- مقادیر عمق اکتشافی (H) بر اساس برابری تنش حاصل از روسازه با ۵٪ تنش مؤثر

اسلامی (۱۳۹۲)

ب- مقادیر عمق اکتشافی (H) بر اساس برابری تنش حاصل از روسازه با ۵٪ تنش مؤثر

طبقه‌بندی کلی خاک‌ها

طبقه‌بندی معمول:

- شن (Gravel)
 - ماسه (Sand)
- } درشت‌دانه

- لای (Silt)
 - رس (Clay)
- } ریزدانه

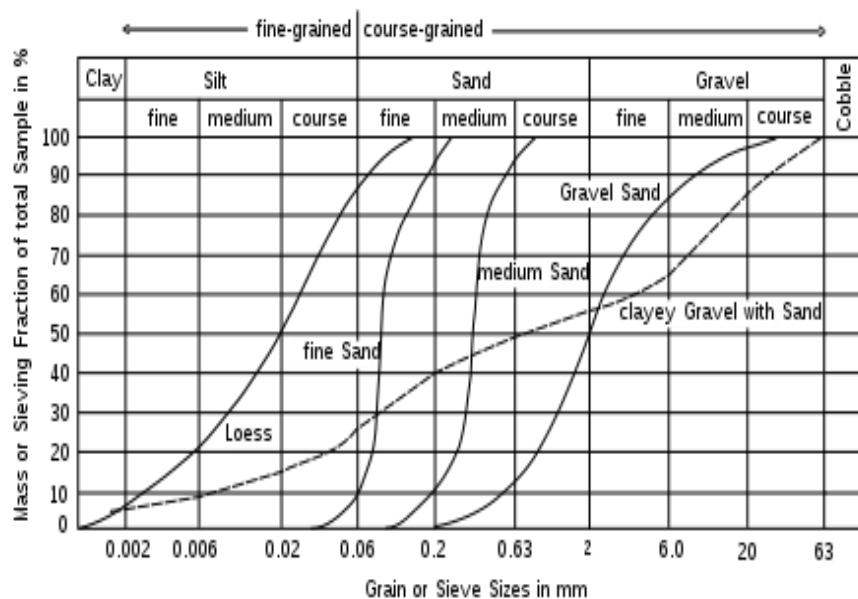
طبقه‌بندی اخیر:

- رس‌ها (Clays)
- دانه‌ای (Granular)
- چسبنده-اصطکاکی (IGM)

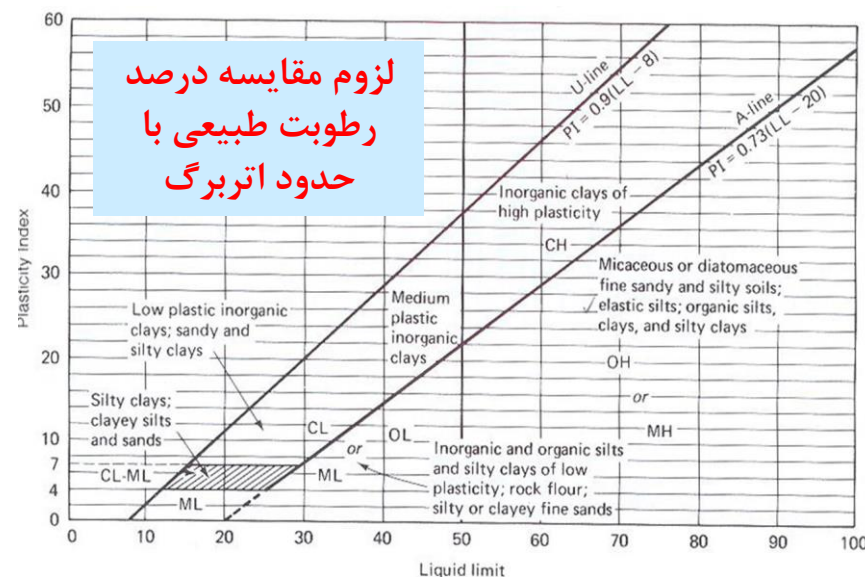
خصوصیات کلی خاک های درشت دانه و ریزدانه

• **خاک های درشت دانه:** ظرفیت باربری زیاد، تغییر شکل پذیری کم، نفوذپذیری و در نتیجه زهکشی زیاد، عدم وابستگی شدید مقاومت و تغییر حجم به تغییر رطوبت

• **خاک های ریزدانه:** ظرفیت باربری کم، تغییر شکل پذیری زیاد، نفوذپذیری و در نتیجه زهکشی کم، وابستگی مقاومت و تغییر حجم به تغییر رطوبت



منحنی توزیع دانه بندی



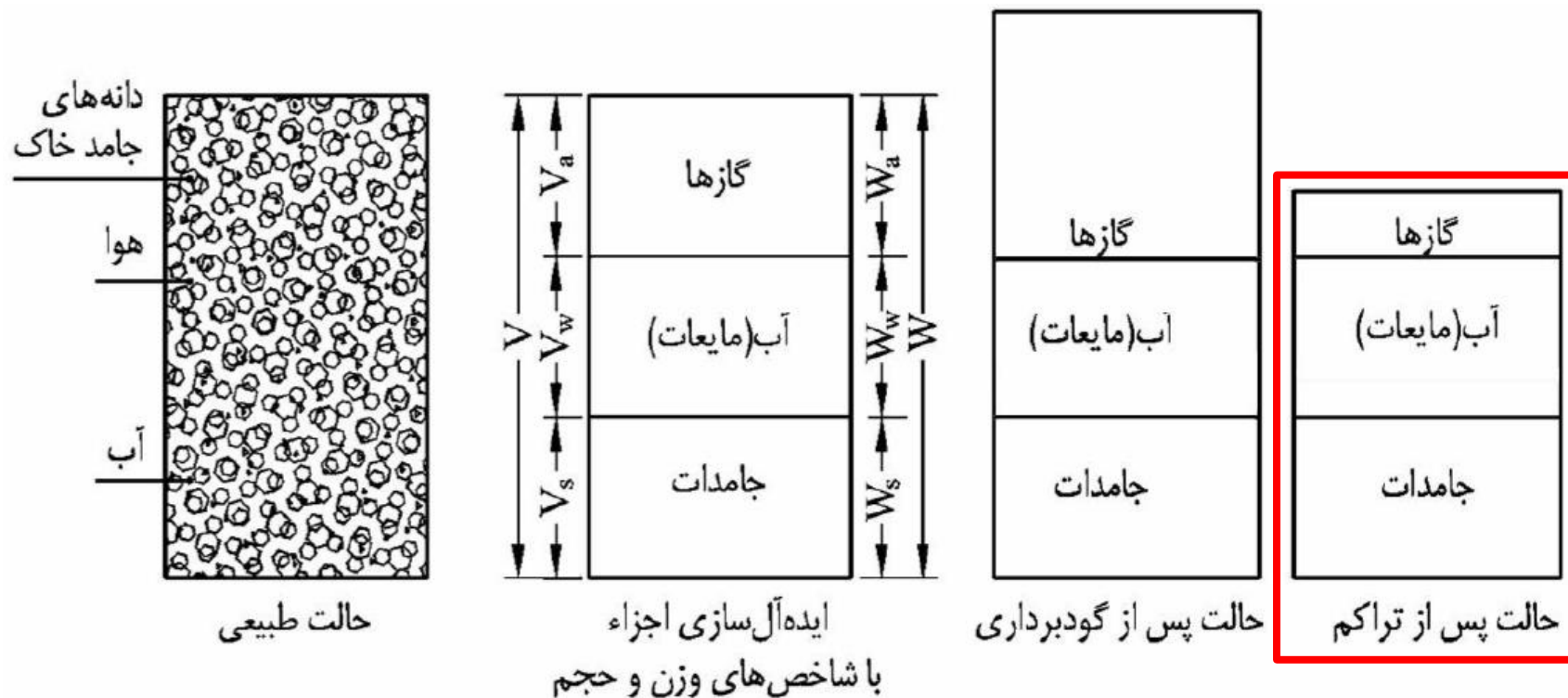
چارت پلاستیسیته کاساگراندر مورد استفاده برای طبقه بندی انواع خاک

برآورد تراکم و سفتی در محل

طبقه‌بندی خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه بر اساس تراکم و سفتی در محل (French, 2000)

نوع خاک	شرح چگونگی سفتی و متراکمی
شن و ماسه	شل: کندن آن با بیل امکان پذیر است و می‌توان یک میخ چوبی به قطر ۵۰mm را در آن کوبید.
	متراکم: برای کندن آن کلنگ لازم و میخ چوبی به قطر ۵۰ mm رابه سختی می‌توان در آن کوبید.
	کمی سیمانی شده: با کلنگ به صورت کلوخه‌هایی که می‌توان آن را خراش داد، کنده می‌شود.
لای‌ها (سیلت‌ها)	نرم یا سست: به سادگی با انگشتان فرم داده شده و یا خرد می‌گردند.
	سفت یا متراکم: می‌توان آن را با فشار قوی بین انگشتان فرم داد و یا خرد کرد.
رس‌ها	خیلی نرم: چنانچه در دست بسته فشار داده شود از بین انگشتان بیرون می‌زند.
	نرم: با فشار کم انگشتان فرم می‌گیرد.
	سفت: با فشار زیاد انگشتان می‌توان آن را فرم داد.
	سخت: نمی‌توان با انگشتان آن را فرم داد و به وسیله شست می‌توان در آن شیار ایجاد نمود.
	خیلی سخت: به سختی با ناخن شست می‌توان آن را دندان‌دار و در آن شیار ایجاد نمود.
خاکهای آلی، نباتی	سفت: فیبرها از قبل درهم فشرده شده اند.
	اسفنجی: خیلی فشار پذیر و دارای ساختاری باز و متخلخل می‌باشند.
	پلاستیک: در دست فرم داده شده و آثار آن بر انگشتان می‌ماند.

روابط وزنی - حجمی



فازهای مختلف یک توده خاک با مقادیر وزنی و حجمی

روابط وزنی - حجمی

NO.	Soil Physical Parameters		Definition	Current Range of Variation
1	Void Ratio	تخلخل	$e = V_v/V_s$	0.1 – 1.5
2	Porosity	درجه پوکی	$n = V_v/V = e/1+e$	9-60 %
3	Water Content	در صد رطوبت	$\omega = W_w/W_s \times 100$	3-70 %
4	Degree of Saturation	درجه اشباع	$S_r = V_w/V_v \times 100$	2-100 %
5	Specific Gravity	چگالی ویژه	$G_s = W_s/V_s \cdot \gamma_w$	2.6 – 2.8
6	Wet Density	وزن مخصوص مرطوب	$\gamma_{wet} = \gamma = W/V$	1.1 – 2.1 ton/m ³
7	Dry Density	وزن مخصوص خشک	$\gamma_d = \gamma_{dry}/V$	1 – 1.9 ton/m ³
8	Saturated Density	وزن مخصوص اشباع	$\gamma_{sat} = \gamma_{sat}/V$	1.2 – 2.3
9	Submerged Density	وزن مخصوص غوطه‌ور	$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$	0.4 – 1.1
10	Air Content	درصد هوا	$A = V_a/V \times 100$	5 - 30

شاخص‌های کمی و کیفی انواع خاک‌ها بر اساس تجارب و عملکرد (Holtz et al., 2023)

Major Divisions (1) (2)		Symbol			Name (6)	Value as Subgrade When not Subject to Frost Action (7)	Value as Subbase When not Subject to Frost Action (8)	Value as Base When not Subject to Frost Action (9)
		Letter (3)	Hatching (4)	Color (5)				
COARSE- GRAINED SOILS	GRAVEL AND GRAVELLY SOILS	GW		Red	Well-graded gravels or gravel-sand mixtures, little or no fines	Excellent	Excellent	Good
		GP			Poorly graded gravels or gravel-sand mixtures, little or no fines	Good to excellent	Good	Fair to good
		GM _d		Yellow	Silty gravels, gravel-sand-silt mixtures	Good to excellent	Good	Fair to good
		GM _u				Good	Fair	Poor to not Suitable
		GC				Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures	Good	Fair
	SAND AND SANDY SOILS	SW		Red	Well-graded sands or gravelly sands, little or no fines	Good	Fair to good	Poor
		SP			Poorly graded gravels or gravelly sands, little or no fines	Fair to good	Fair	Poor to not Suitable
		SM _d		Yellow	Silty gravels, sand-silt mixtures	Fair to good	Fair to good	Poor
		SM _u				Fair	Poor to fair	Not suitable
		SC				Clayey sands, sand-clay mixtures	Poor to fair	Poor
FINE- GRAINED SOILS	SILTS AND CLAYS LL IS LESS THAN 50	ML		Green	Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands or clayey silts with slight plasticity	Poor to fair	Not suitable	Not suitable
		CL			Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays	Poor to fair	Not suitable	Not suitable
		OL			Organic silts and organic silt-clays of low plasticity	Poor	Not suitable	Not suitable
	SILTS AND CLAYS LL IS GREATER THAN 50	MH		Blue	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, clastic silts	Poor	Not suitable	Not suitable
		CH			Inorganic clays of high plasticity, fat clays	Poor to fair	Not suitable	Not suitable
		OH			Organic clays of medium to high plasticity, organic silts	Poor to very poor	Not suitable	Not suitable
		HIGHLY ORGANIC SOILS			Pt		Orange	Peat and other highly organic soils

شاخص‌های کمی و کیفی انواع خاک‌ها بر اساس تجارب و عملکرد (Holtz et al., 2023)

Potential Frost Action (10)	Compressibility and Expansion (11)	Drainage Characteristics (12)	Compaction Equipmen (13)	Unit Dry Densities		Typical Design Values	
				1bf/ft ³ (14)	kg/m ³ (15)	CBR (16)	Subgrade Modulus K (1bf/in. ³) (17)
None to very slight	Almost none	Excellent	Crawler-type tractor, rubber-tired roller, steel-wheeled roller	125–140	2000–2240	40–80	300–500
None to very slight	Almost none	Excellent	Crawler-type tractor, rubber-tired roller, steel-wheeled roller	110–140	1760–2240	30–60	300–500
Slight to medium	Very slight	Fair to poor	Rubber-tired roller, sheepsfoot roller, close control of moisture	125–145	2000–2320	40–60	300–500
Slight to medium	Slight	Poor to practically impervious	Rubber-tired roller, sheepsfoot roller	115–135	1840–2160	20–30	200–500
Slight to medium	Slight	Poor to practically impervious	Rubber-tired roller, sheepsfoot roller	130–145	2080–2320	20–40	200–500
None to very slight	Almost none	Excellent	Crawler-type tractor, rubber-tired roller	110–130	1760–2080	20–40	200–400
None to very slight	Almost none	Excellent	Crawler-type tractor, rubber-tired roller	105–135	1680–2160	10–40	150–400
Slight to high	Very slight	Fair to poor	Rubber-tired roller, sheepsfoot roller, close control of moisture	120–135	1920–2160	15–40	150–400
Slight to high	Slight to medium	Poor to practically impervious	Rubber-tired roller, sheepsfoot roller	100–130	1600–2080	10–20	100–300
Slight to high	Slight to medium	Poor to practically impervious	Rubber-tired roller, sheepsfoot roller	100–135	1600–2160	5–20	100–300
Medium to very high	Slight to medium	Fair to poor	Rubber-tired roller, sheepsfoot roller, close control of moisture	90–130	1440–2080	15 or less	100–200
Medium to high	Medium	Practically impervious	Rubber-tired roller, sheepsfoot roller	90–130	1440–2080	15 or less	50–150
Medium to high	Medium to high	Poor	Rubber-tired roller, sheepsfoot roller	90–105	1440–1680	5 or less	50–100
Medium to very high	High	Fair to poor	Sheepsfoot roller, rubber-tired roller	80–105	1280–1680	10 or less	50–100
Medium	High	Practically impervious	Sheepsfoot roller, rubber-tired roller	90–115	1440–1840	15 or less	50–150
Medium	High	Practically impervious	Sheepsfoot roller, rubber-tired roller	80–110	1280–1760	5 or less	25–100
Slight	Very high	Fair to poor	Compaction not practical				

تنش در خاک

منشا تنش در خاک

$$\sigma_t = \sum_{i=1}^n \gamma \cdot Z_i$$

$$u_i = \gamma_w \cdot Z_w$$

$$\sigma' = \sigma_t - u \begin{cases} u_h \\ u_e \end{cases}$$

• ژئواستاتیکی

• تحمیلی

• تنش‌های ژئواستاتیکی (Geostatic Stresses): در نتیجه نیروی جاذبه ایجاد شده

و متاثر از وزن مخصوص و ضخامت لایه‌ها

• تنش‌های تحمیلی (Induced Stresses): به سبب بارهای خارجی و بارگذاری از

طریق پی‌ها و پایه‌ها

جریان آب در خاک

Darcy (1856):

$$v = ki$$

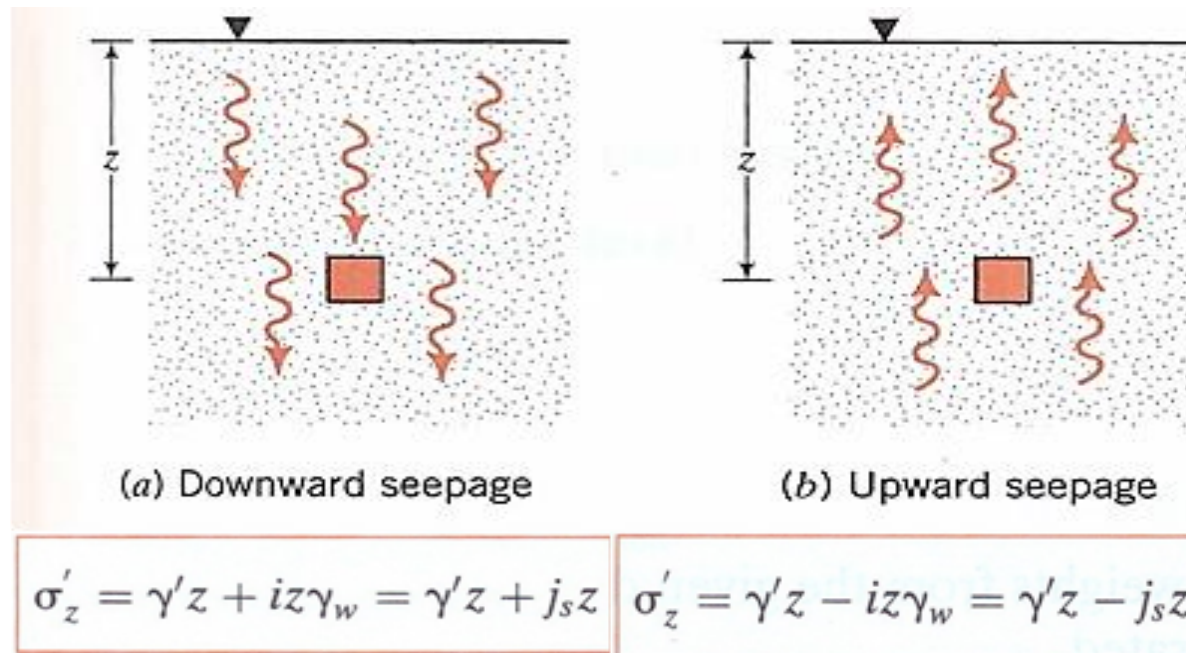
v = Flow Velocity

k = Permeability Coefficient

i = Hydraulic Gradient

تأثیر تراوش بر تنش موثر توده خاک

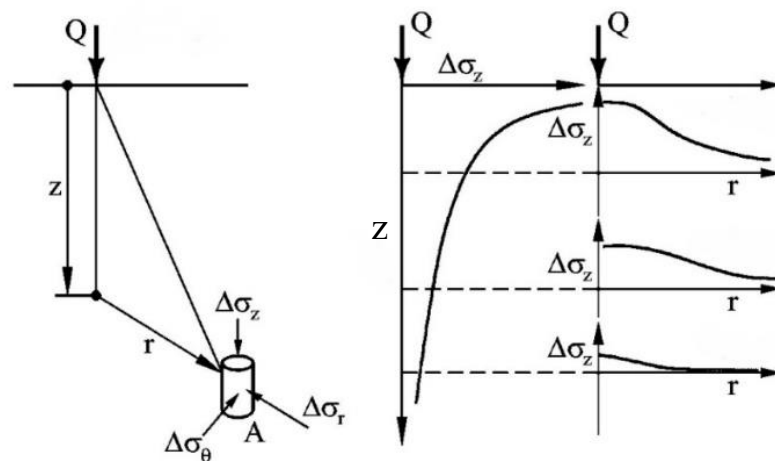
$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_{water}} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$



توزیع تنش در خاک

- تنش‌های اضافی یا تحمیلی مواردی را در بر می‌گیرند که مربوط به بارهای خارجی از قبیل فونداسیون سازه‌ها و بارگذاری می‌باشند.
- در نتیجه اعمال بار بر روی زمین، لازم است محدوده تأثیر، مقدار و عکس‌العمل زمین درمقابل آن‌ها تعیین گردد.
- تعیین مقدار این پارامترها در محاسبات نشست، تداخل تنش‌ها، حفاری‌های آبی و طراحی دیوارهای حائل نقش مهمی دارد.

$$\sigma_z = \frac{q_o \times B \times L}{(B + Z)(L + Z)}$$



Distribution of stress at different depths

مقاومت برشی

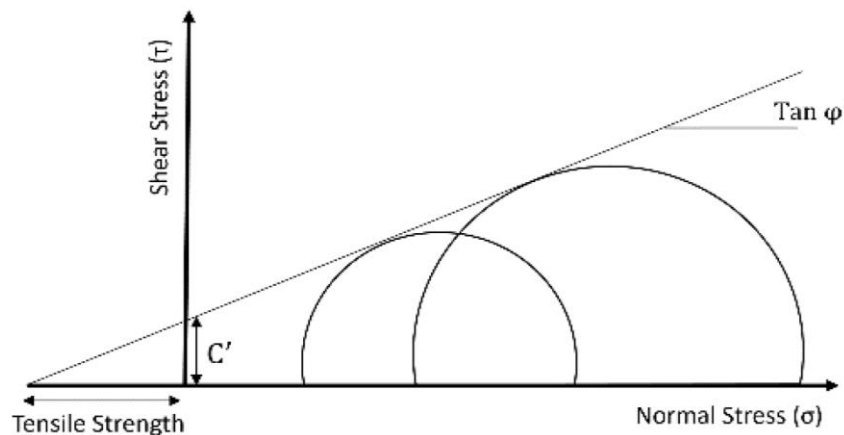
$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi$$

τ = shear strength,

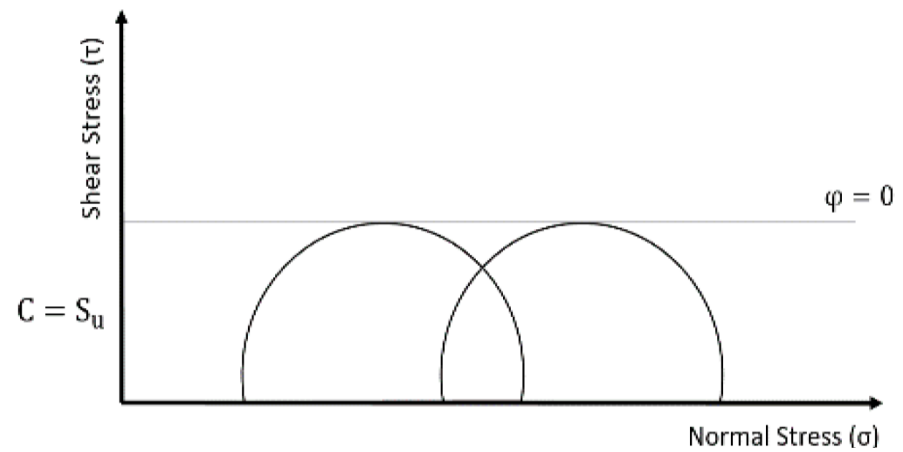
c = effective or total cohesion,

φ = effective or total friction angle,

σ' = effective or mean confining stress acting on the shear surface.



Drained

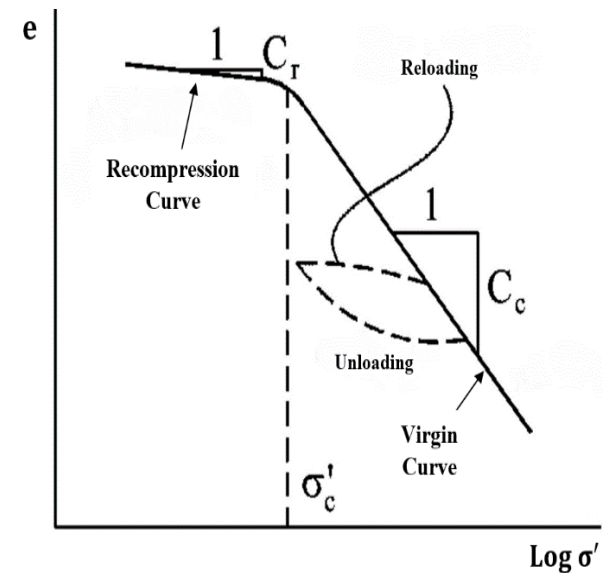
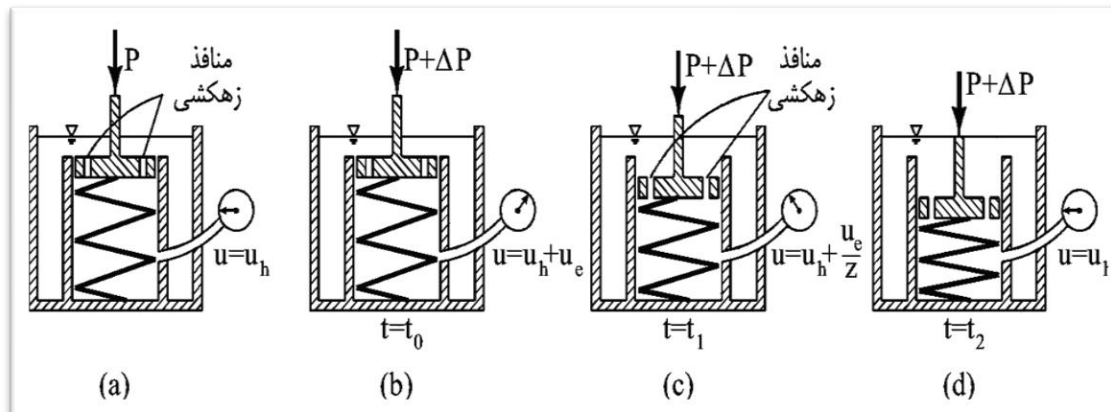


Undrained

تحکیم و فشردگی

خروج آب منفذی و متعاقباً کاهش حجم و نشست

$$\begin{aligned} t = 0 &\Rightarrow u_e = \Delta\sigma_{\text{Load}} \quad , \quad \Delta\sigma' = 0 \\ t = \infty &\Rightarrow u_e = 0 \quad , \quad \Delta\sigma' = \Delta\sigma_{\text{Load}} \end{aligned}$$

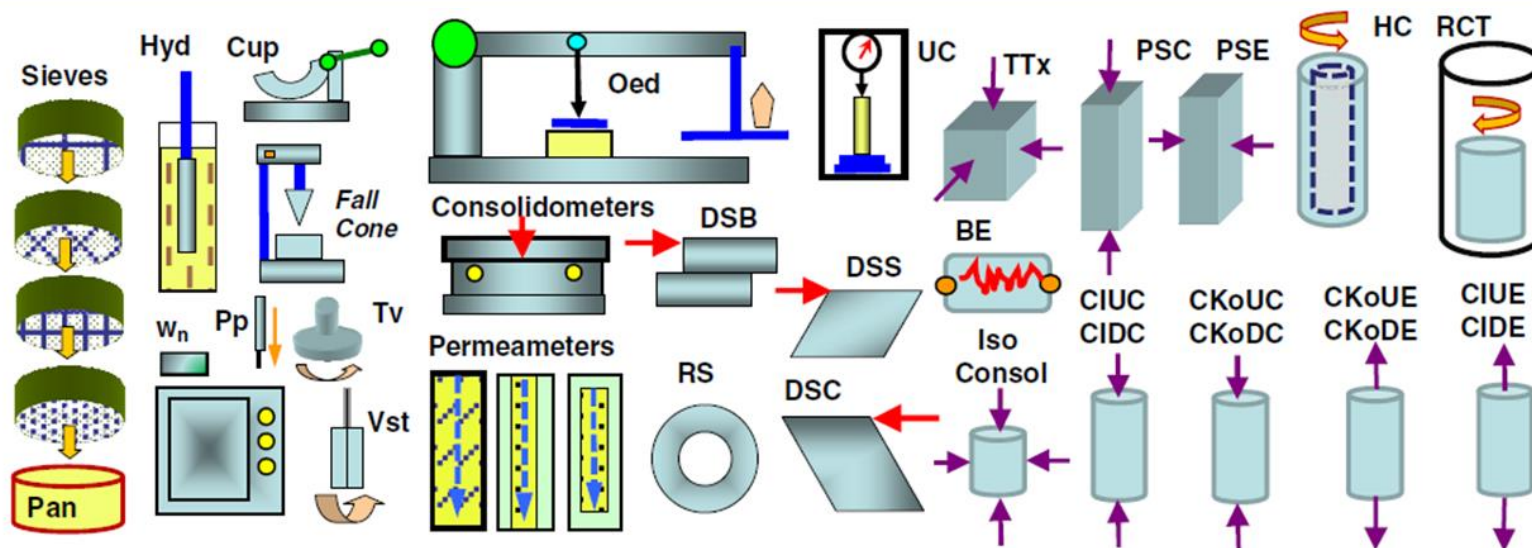


e- log σ' formulation of the soil stress- strain curve

تقسیم‌بندی تست‌های آزمایشگاهی متناسب با کاربرد

- **آزمایش‌های شناسایی و اندکس:** مثل درصد رطوبت، توزیع دانه‌ها یا دانه‌بندی (آنالیز الک و یا هیدرومتری) حدود اتربرگ، وزن مخصوص
- **آزمایش‌های تغییرات حجمی:** تراکم، تحکیم، رمبندگی، CBR و تورم
- **آزمایش‌های آب در خاک:** نفوذپذیری، تحکیم، تورم، جوشش ماسه‌ای
- **آزمایش‌های شیمیایی و خوردگی:** مثل تعیین یون‌های سولفات، کلراید، pH آب
- **آزمایش‌های تعیین پارامترهای مقاومت برشی:** تک‌محوری، برش، سه‌محوری
- **آزمایش‌های دینامیکی:** مثل سه‌محوری سیکلی، ستون تشدید، برش سیکلی

تست‌های آزمایشگاهی



Grain size analyses

Hydrometer

Water content by oven

Liquid limit cup

Plastic limit thread

Fall cone device

Pocket penetrometer

Torvane

Unconfined compression

Miniature vane

Digital image analysis

Mechanical oedometer

Consolidometer

Constant rate of shear (CRS)

Falling-head permeameter

Constant-head permeameter

Flow permeameter

Direct shear box

Ring shear

Unconsolidated undrained Tx

Simple shear

Directional shear cell

Triaxial apparatus (iso-consols, CIUC, CKoUC, CAUC, CIUE, CAUE, CKoUE, stress path, CIDC, CKoDC, CIDE, CKoDE, constant P')

Plane strain apparatus (PSC, PSE)

True triaxial (cuboidal)

Hollow cylinder

Torsional Shear

Resonant Column Test device

Non-resonant column

Bender elements

پارامترهای ژئوتکنیکی

CONDUCTIVITY

- Hydraulic: k_v, k_h
- Thermal: k_e
- Electrical: Ω, ζ
- Chemical: D_f
- Transmissivity
- Permittivity

COMPRESSIBILITY

- Recompression, C_r
- Yield Stress, σ_y' (and YSR)
- Preconsolidation, σ_p' (and OCR)
- Coef. of Consolidation, c_v
- Virgin Compression, C_c
- Swelling index, C_s

RHEOLOGICAL

- Creep, $C_{\alpha\epsilon}$
- Strain rate, $\delta\epsilon/\delta t$
- Age (T)
- Creep rate
- Time to creep rupture, t_{cr}

STIFFNESS

- Stiffness: $G_0 = G_{max}$
- Shear Modulus, G' and G_u
- Elastic Modulus, E' and E_u
- Bulk Modulus, K'
- Constrained Modulus, D'
- Tensile Stiffness, K_T
- Poisson's Ratio, ν
- Effects of Anisotropy
- Nonlinearity (G/G_{max} vs γ_s)

STRENGTH

- Drained and Undrained τ_{max}
- Peak (s_u, c', ϕ')
- Post-peak
- Remolded/Softened/CS
- Residual
- Cyclic Behavior
- Geosynthetics: tensile strength, pullout resistance, interface shear strength.

(Mayne, 2009)

پارامترهای ژئوتکنیکی

اندیس فشردگی (C_c) در خاک‌های مختلف

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)	4 and up
Peats (Pt)	10 to 15
Organic silt and clayey silts (ML-MH)	1.5 to 4.0
San Francisco Bay mud (CL)	0.4 to 1.2
San Francisco Old Bay clays (CH)	0.7 to 0.9
Bangkok clay (CH)	0.4

پارامترهای ژئوتکنیکی

زاویه اصطکاک داخلی خاک و عوامل موثر بر آن

Factor	Effect
Void ratio, e	$e \uparrow, \phi \downarrow$
Angularity, A	$A \uparrow, \phi \uparrow$
Grain-size distribution	$C_u \uparrow, \phi \uparrow$
Surface roughness, R	$R \uparrow, \phi \uparrow$
Water content, w	$w \uparrow, \phi \downarrow$ slightly
Intermediate principal stress	$\phi_{ps} \geq \phi_{tx}$ (see Sec. 13.11)
Particle size, S	No effect (with constant e)
Overconsolidation or prestress	Little effect

تست های ژئوفیزیکی

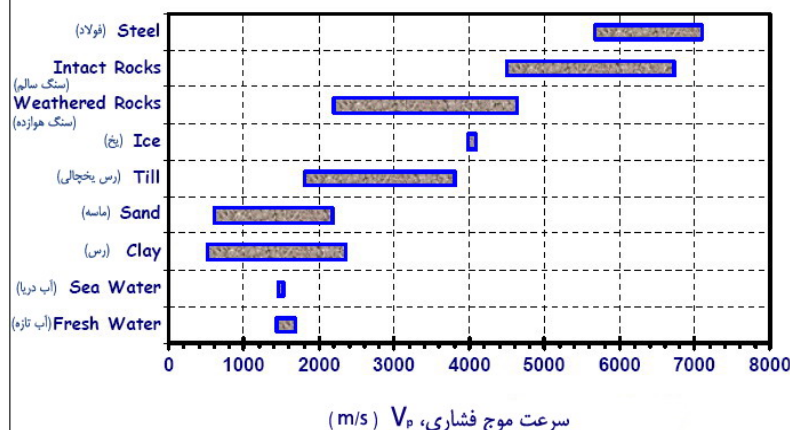
مزایای آزمایش های ژئوفیزیکی

- غیرمخرب
- سریع و اقتصادی
- تفسیر نتایج بر پایه تئوری
- قابل انجام در خاک و سنگ

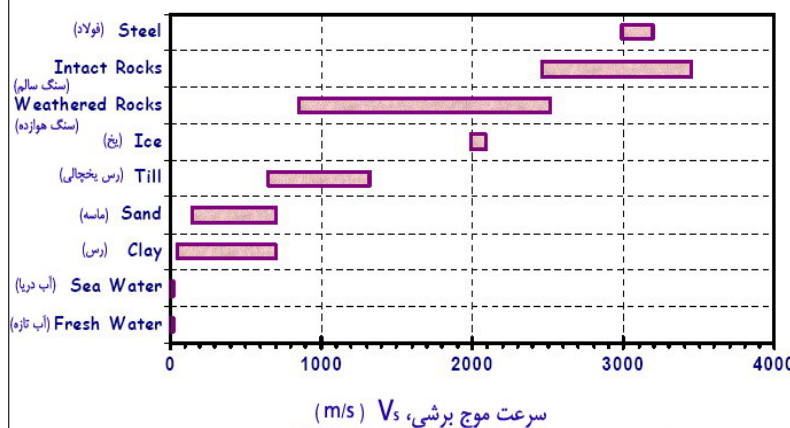
محدودیت های آزمایش های ژئوفیزیکی

- عدم نمونه گیری و یا نفوذ فیزیکی سیستم
- استفاده از مدل در تفسیر
- تحت تاثیر لایه های سیمانته
- نتایج تحت تاثیر آب، رس و عمق

سرعت امواج P

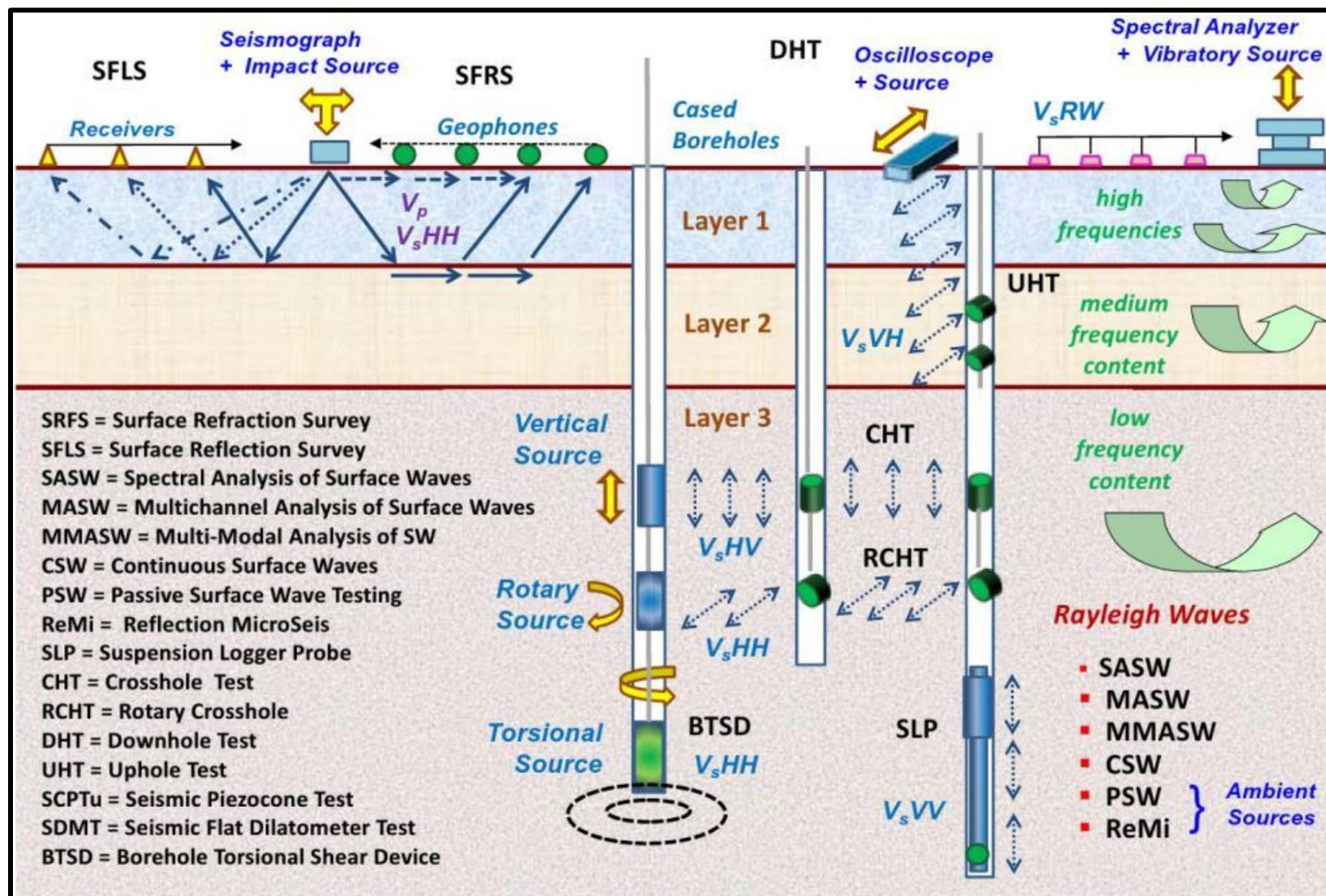


سرعت امواج S

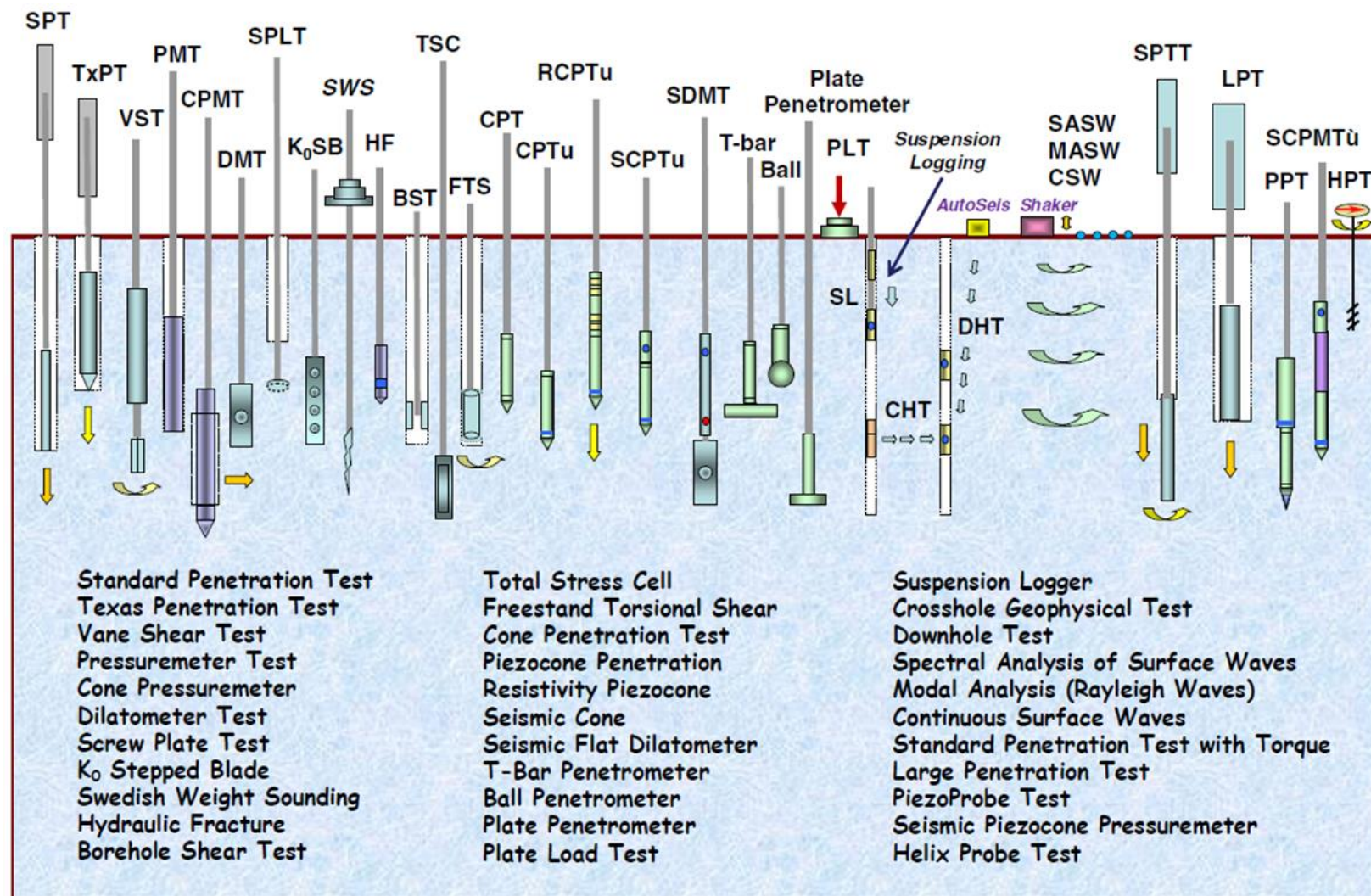


نمونه سرعت های موج برشی و فشاری انواع مصالح خاکی و سنگی

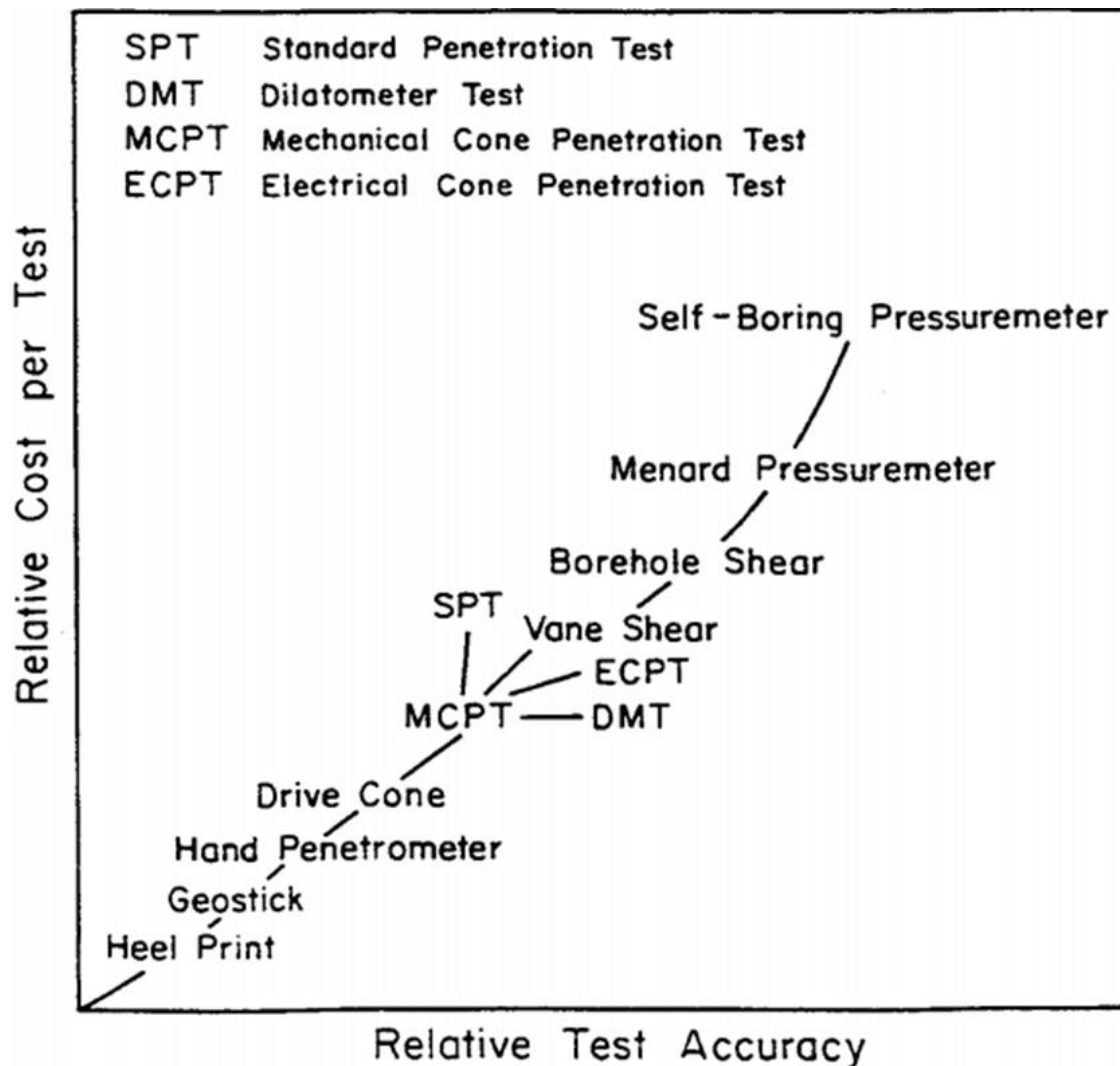
تست‌های ژئوفیزیکی



تست‌های درجا



مقایسه هزینه و دقت انواع تست‌های درجا



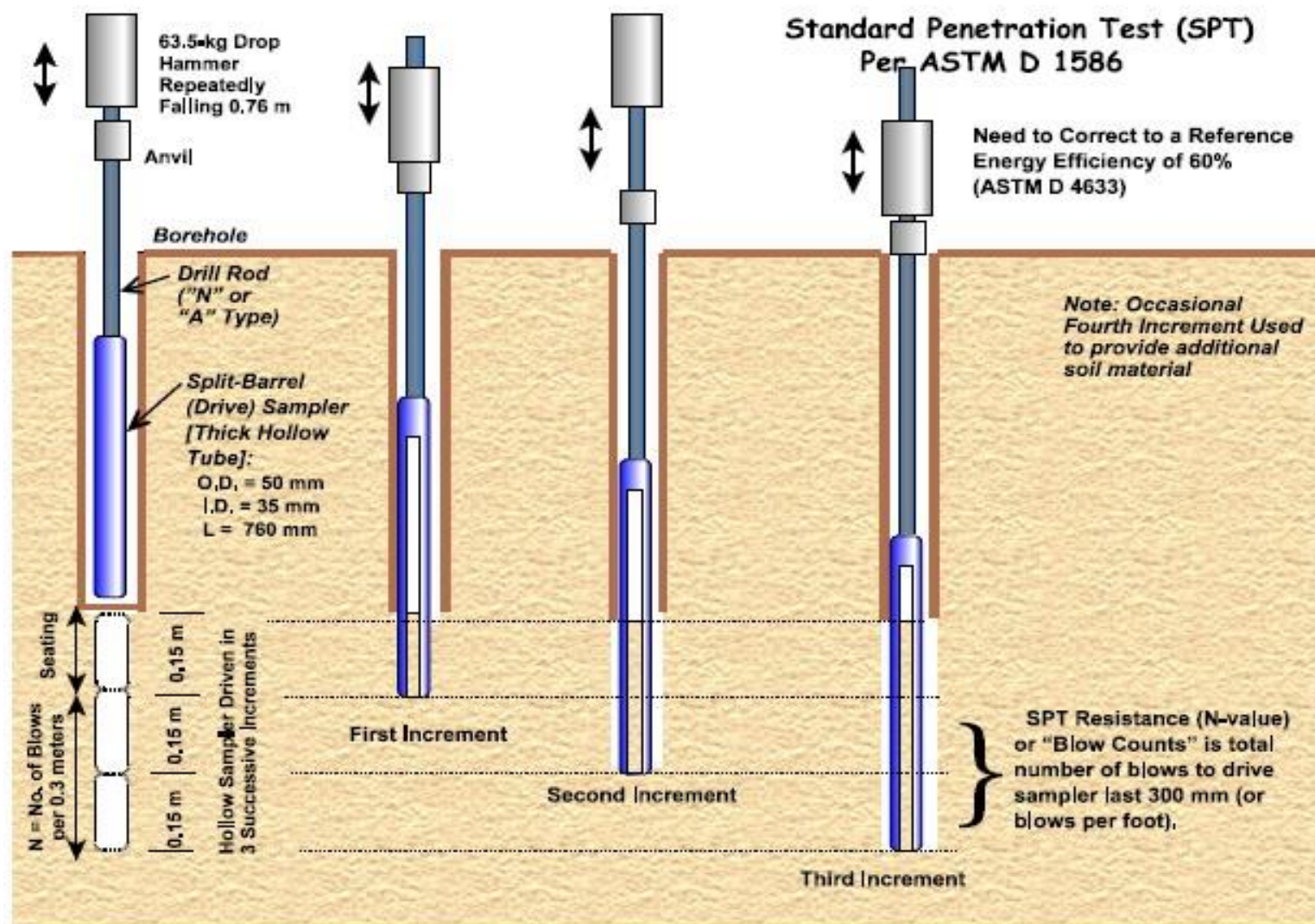
مقایسه و کاربرد انواع تست‌های درجا

Group	Device	Soil Parameters												
		Soil type	Profile	u	* ϕ'	S _u	I _D	m _v	c _v	k	G ₀	δ_h	OCR	δ - ϵ
Penetrometers	Dynamic	C	B	-	C	C	C	-	-	-	C	-	C	-
	Mechanical	B	A/B	-	C	C	B	C	-	-	C	C	C	-
	Electric(CPT)	B	A	-	C	B	A/B	C	-	-	B	B/C	B	-
	Peizocone(CPTU)	A	A	A	B	B	A/B	B	A/B	B	B	B/C	B	C
	Seismic(SCPT/SCPTU)	A	A	A	B	A/B	A/B	B	A/B	B	A	B	B	B
	Flat dilatometer(DMT)	B	A	C	B	B	C	B	-	-	B	B	B	C
	Standard penetration test(SPT)	A	B	-	C	C	B	-	-	-	C	-	C	-
	Resistivity probe	B	B	-	B	C	A	C	-	-	-	-	-	-
Pressuremeters	Pre-bored(PBP)	B	B	-	C	B	C	B	C	-	B	C	C	C
	Self boring (SBP)	B	B	A ₍₁₎	B	B	B	B	A ₍₁₎	B	A ₍₂₎	A/B	B	A/B ₍₂₎
	Full displacement(FDP)	B	B	-	C	B	C	C	C	-	A ₍₂₎	C	C	C
Others	Vane	B	C	-	-	A	-	-	-	-	-	-	B/C	B
	Plate load	C	-	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B
	Screw plate	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	-
	Borehole permeability	C	-	A	-	-	-	-	B	A	-	-	-	-
	Hydraulic fracture	-	-	B	-	-	-	-	C	C	-	B	-	-
	Crosshole/downhole/surface seismic	C	C	-	-	-	-	-	-	-	A	-	B	-

Applicability: A, high; B, moderate; C = low; —, none.

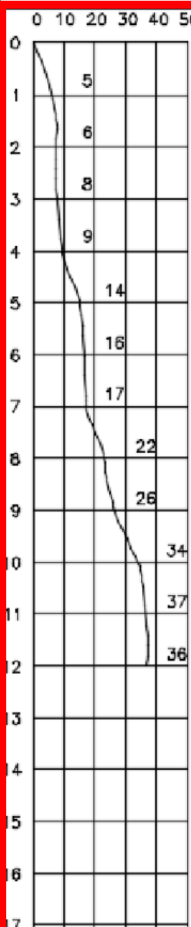
* ϕ , Will depend on soil type; (1), Only when pore pressure sensor fitted; (2), Only when displacement sensor fitted.

آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)



آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)

نمونه از نتایج
SPT

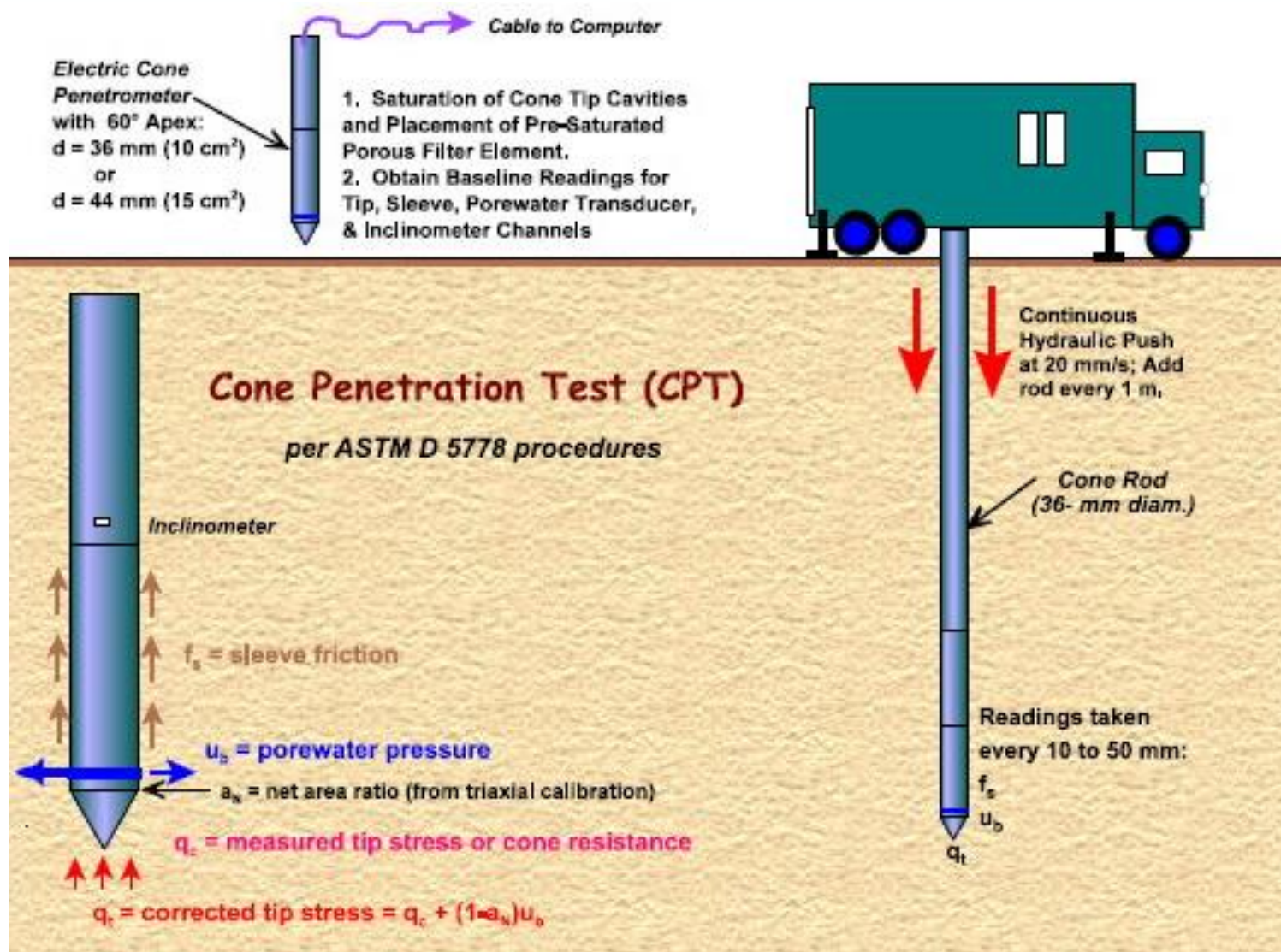
SITE:		NZP001VV – NAZARÉ PAULISTA / SP					
Project Location		ROD. DOM PEDRO I, KM 49, S/N (SP 65)					
Borehole:		SP 01					
Consistency	Depth layer (M)	Elevation (M)	PENETRATION RESISTANCE		Description of Strata		
			"N" Values	Graphic			
SOFT	0,00	100,00	$\frac{2}{15}$	$\frac{2}{15}$	$\frac{3}{15}$		Reddish sandy clay
Medium Stiff		$\frac{3}{15}$	$\frac{3}{15}$	$\frac{3}{15}$			
		$\frac{3}{15}$	$\frac{3}{15}$	$\frac{5}{15}$			
		$\frac{4}{15}$	$\frac{4}{15}$	$\frac{5}{15}$			
		$\frac{5}{15}$	$\frac{7}{15}$	$\frac{7}{15}$			
Stiff		$\frac{7}{15}$	$\frac{7}{15}$	$\frac{9}{15}$			
		$\frac{6}{15}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{9}{15}$			
		$\frac{9}{15}$	$\frac{9}{15}$	$\frac{13}{15}$			
		$\frac{10}{15}$	$\frac{12}{15}$	$\frac{14}{15}$			
Very Stiff		90,00	$\frac{15}{15}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{18}{15}$		
	$\frac{15}{15}$	$\frac{17}{15}$	$\frac{19}{15}$				
Hard	10,30	85,00	$\frac{16}{15}$	$\frac{17}{15}$	$\frac{20}{15}$	- 12,45 – End of Borehole	
	$\frac{15}{15}$		$\frac{17}{15}$	$\frac{19}{15}$			
	12,45					There was no detectable presence of water	
		90,00					

محدوده تغییرات نتایج SPT برای خاک‌های مختلف

Material	Description	SPT (N Value)	Corrected SPT ((No)60)
Clay	Very Soft	≤ 2	-
	Soft	2 - 5	-
	Firm	5 - 10	-
	Stiff	10 - 20	-
	Very Stiff	20 - 40	-
	Hard	> 40	-
Clean sand	Very Loose	≤ 4	≤ 3
	Loose	4 - 10	3 - 8
	Medium Dense	10 - 30	8 - 25
	Dense	30 - 50	25 - 42
	Very Dense	> 50	> 42
Fine sand	Very Loose	-	≤ 3
	Loose	-	3 - 7
	Medium Dense	-	7 - 23
	Dense	-	23 - 40
	Very Dense	-	> 40
Medium Sand	Very Loose	-	≤ 3
	Loose	-	3 - 8
	Medium Dense	-	8 - 25
	Dense	-	25 - 43
	Very Dense	-	> 43
Coarse sand	Very Loose	-	≤ 3
	Loose	-	3 - 8
	Medium Dense	-	8 - 27
	Dense	-	27 - 47
	Very Dense	-	> 47

(Look, 2007)

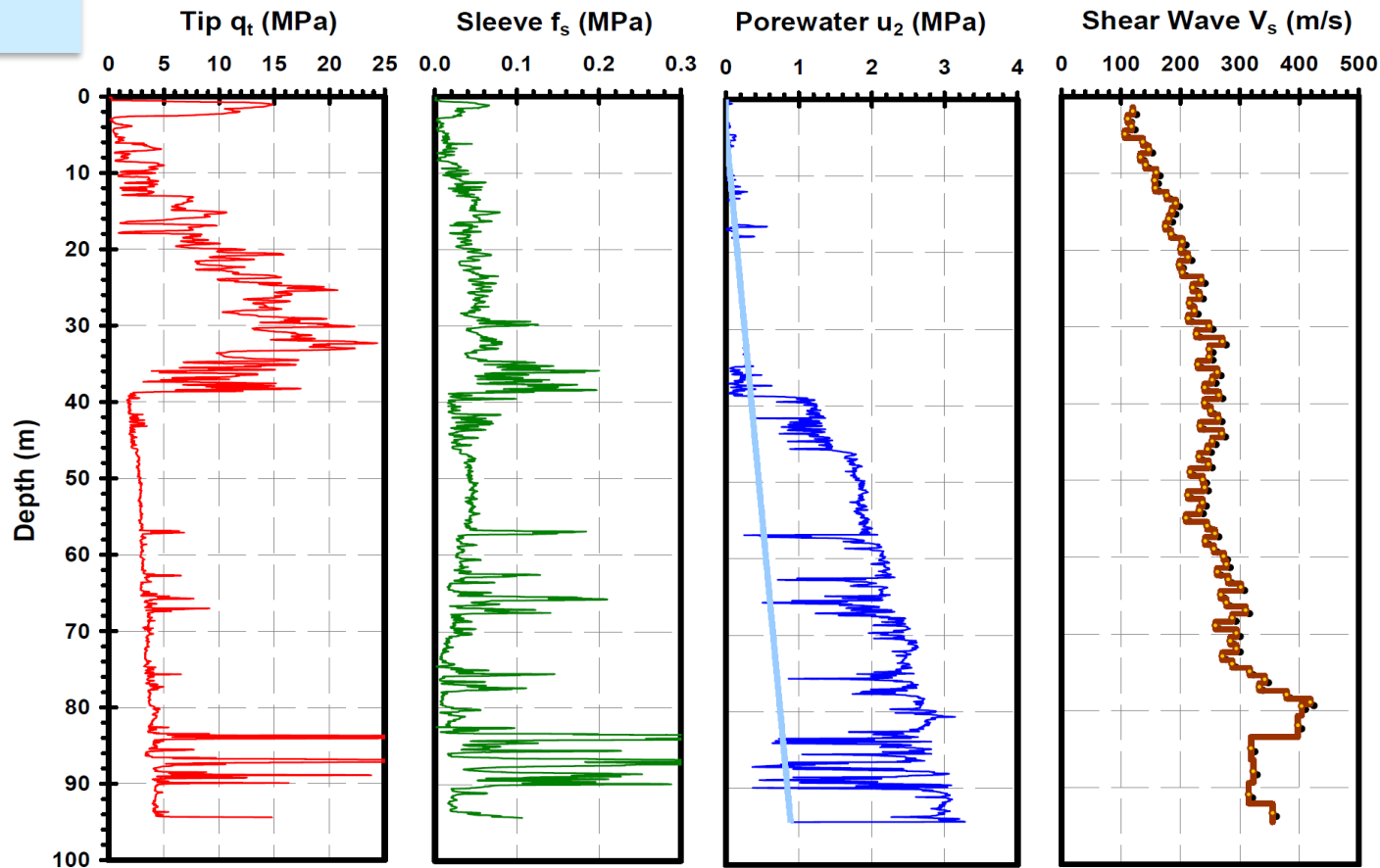
آزمایش نفوذ مخروط (CPT)



آزمایش نفوذ مخروط (CPT)

SCPTU at Golden Ears Bridge
ConeTec, Vancouver, BC

نمونه از نتایج
CPTu



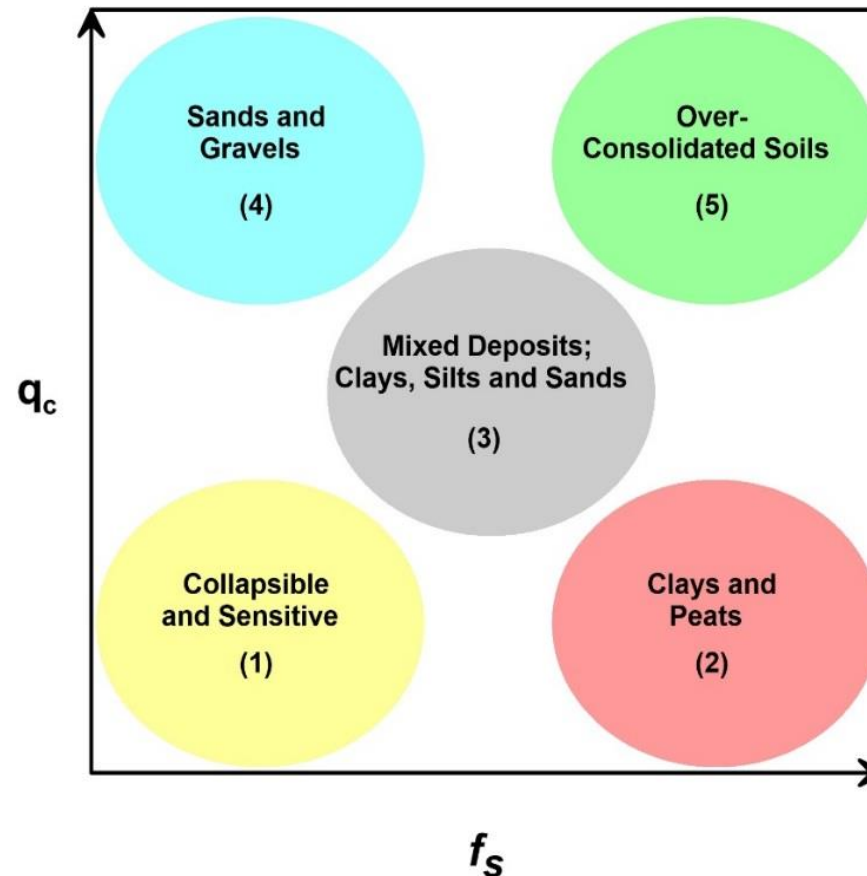
محدوده تغییرات نتایج CPT برای خاک های مختلف

Soil		q_c (MPa)
Sand	Very loose	<2.5
	Loose	2.5-5
	Medium dense	5-10
	Dense	10-20
	Very dense	>20
Clay	Very Soft	<2
	Soft	2-5
	medium	5-10
	Hard	10-20

(Look, 2007)

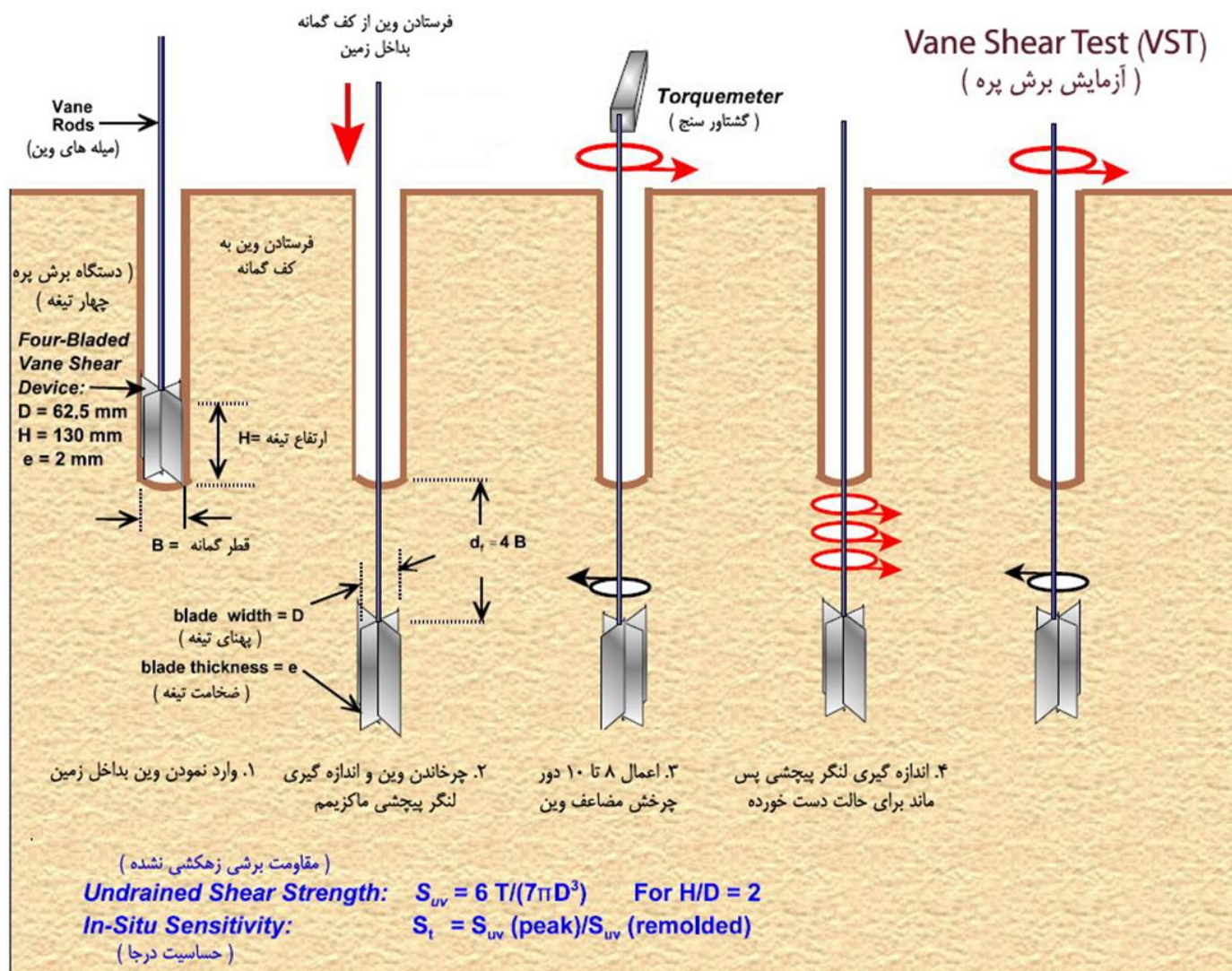
آزمایش نفوذ مخروط (CPT)

طبقه‌بندی رفتاری خاک‌ها براساس نتایج CPT و CPTu



Schematic chart for soil behavior classification (Eslami et al. 2020)

آزمایش برش پره ای یا برش وین (VST)



ارزیابی قوام خاک‌های چسبنده

قوام خاک چسبنده براساس مقاومت برشی زهکشی نشده، S_u (Look, 2007)

عنوان	نماد	ارزیابی در محل	نقوذ شصت دست	مقاومت برشی زهکشی نشده (kPa)
خیلی نرم	VS	در صورت فشردن از بین انگشتها بیرون می‌زند.	$> 25 \text{ mm}$	< 12
نرم	S	با فشار کم انگشتان قابل شکل‌دهی می‌باشد.	$> 10 \text{ mm}$	12-25
متوسط	F	با فشار زیاد انگشتان قابل شکل‌دهی می‌باشد.	$< 10 \text{ mm}$	25-50
سفت	St	با انگشتان قابل شکل‌دهی نمی‌باشد. با فشار شصت می‌توان در آن فرورفتگی ایجاد نمود.	$< 5 \text{ mm}$	50-100
خیلی سفت	VSt	با ناخن شصت می‌توان در آن فرورفتگی ایجاد نمود.	$< 1 \text{ mm}$	100-200
سخت	H	با ناخن شصت به سختی می‌توان در آن فرورفتگی ایجاد نمود.	$\approx 0 \text{ mm}$	> 200

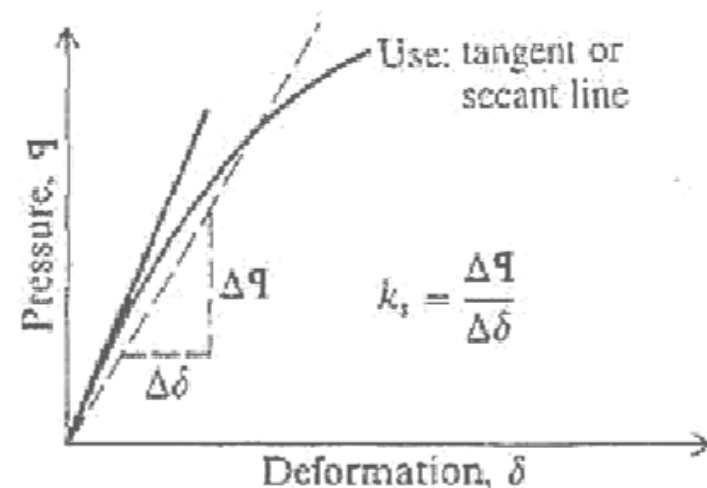
آزمایش بارگذاری صفحه (PLT)

بارگذاری یک صفحه صلب برای تشخیص برخی ویژگی‌ها و پارامترهای خاک از جمله:

- ظرفیت باربری خاک
 - پارامترهای نشست‌پذیری
 - ضریب عکس‌العمل بستر
 - مدول الاستیسته خاک در شرایط طبیعی زمین یا در شرایط بحرانی اشباع شدن خاک
- به طور معمول از صفحه‌های گرد با قطر ۳۰، ۴۵ و ۶۰ سانتیمتری استفاده می‌شود.



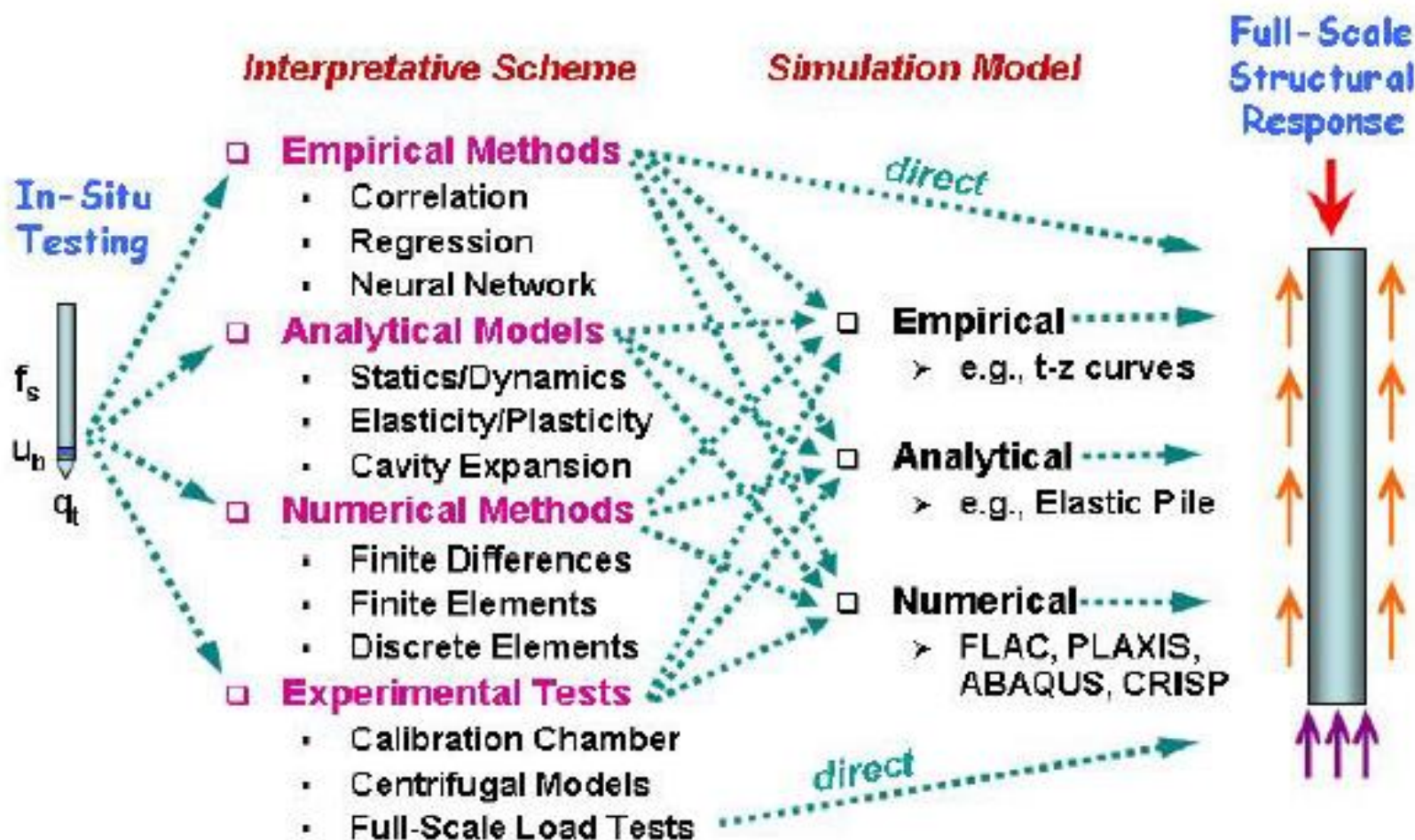
تامین عکس‌العمل به روش ثقلی با استفاده از وزن ماشین‌آلات



نمودار بار-نشست آزمایش بارگذاری صفحه

روش‌های استفاده از نتایج تست‌های درجا در طراحی

Methods of Interpreting Ground Behavior from In-Situ Tests



انواع خاک‌های مسئله‌دار

خاک‌های مسئله‌دار

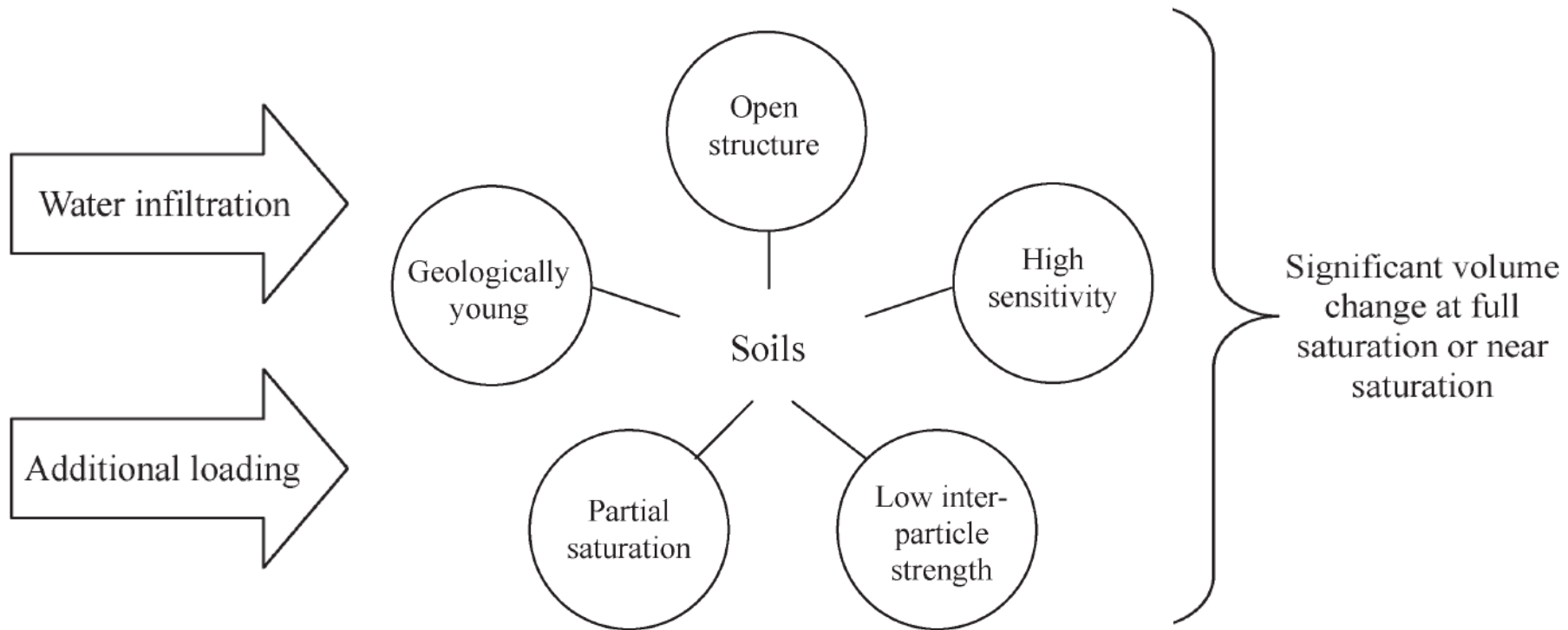
- خاک‌های با منشا آلی و نباتی – Peat and Organic Soils
- خاک‌های رس اشباع و نرم – Soft and Saturated Clays
- خاک‌های ماسه‌ای و لای شل – Loose Silts and Sands
- خاک‌های رمبنده یا فروریزشی – Collapsible Soils
- خاک‌های واگرا – Dispersive Soils
- خاک‌های انبساطی – Expansive Soils
- خاکریزها – Fills
- خاک‌های با منشا زباله و ضایعات – Landfills

خسارات عمرانی سالیانه در آمریکا در نتیجه عواقب حاصل از خاک‌های مسئله‌دار بیش از موارد مربوط به سیل، طوفان و زلزله می‌باشد.
(Holtz et al., 2023 – Coduto et al., 2016)

خاک‌های فروریزشی

دارای ساختار باز (لانه زنبوری) و نیمه پایدار هستند؛

در اثر افزایش رطوبت و اعمال بار ← فروریزش ساختار و تغییر حجم زیاد



خاک های انبساطی

عموماً خاک های رسی هستند؛

تغییرات رطوبت در محل خاک ← تغییرات حجمی زیاد؛

یعنی در اثر افزایش رطوبت خاک ← حجم آن افزایش می یابد؛

پس از خشک شدن خاک ← کاهش مجدد حجم



Image A, initial view; Image B, after a small amount of water has been introduced; Image C, 48hour time

خاک های نرم و حساس

- ظرفیت باربری پایین
- نشست بالا

$$S_t = \frac{\tau_f (\text{undisturbed})}{\tau_f (\text{remolded})}$$



Leda clay from Ottawa, Ontario

Condition	Range of S_t		
	U.S.	Canada	Sweden
Low sensitive	2-4	<2	<10
Medium sensitive	4-8	2-4	10-30
Highly sensitive	8-16	4-8	>30
Extra sensitive	16	8-16	>50
Quick	—	>16	>100
Greased lightning	—	>>16	

خاک‌های آلی و نباتی

انباشته‌های مواد آلی تجزیه‌شدنی } تحت شرایط فسیل‌شدگی و هوازدگی
درصد رطوبت بالا

خاک با بیش از ۲ درصد مواد آلی ← خاک آلی

خاک با بیش از ۵۰ درصد مواد آلی ← خاک نباتی



خاک‌های دستی و خاکریزها



خاک دستی
خاک حاصل از حفاری
ضایعات ساختمانی
پس‌مانده‌های صنعتی، معدنی
زباله‌ها

تغییرات حجمی زیاد
ضعف باربری
ناپایداری داخلی

← اگر به درستی خاکریزی و متراکم نشوند

۲/۵ درصد

۵ درصد

۱۰ درصد

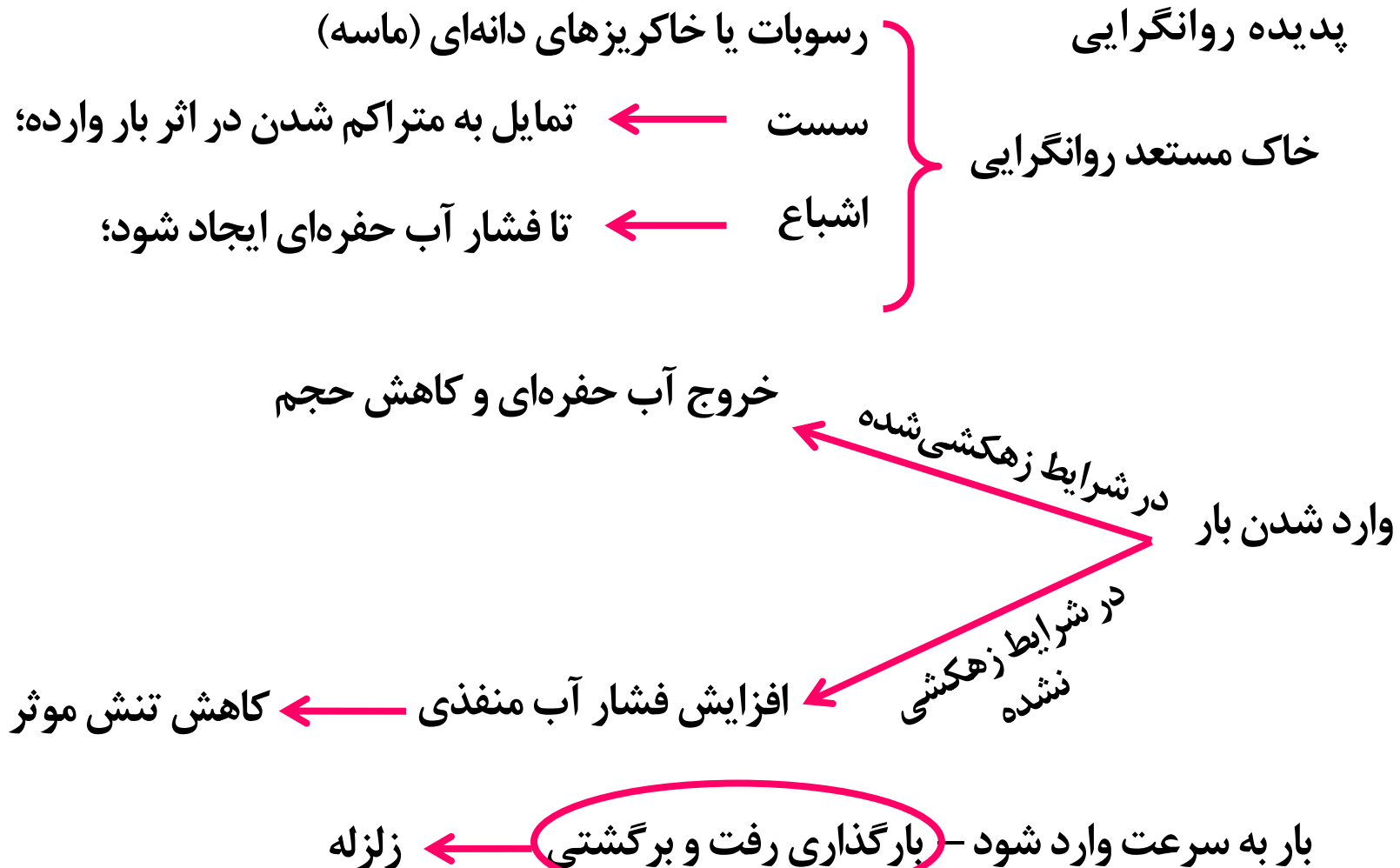
خاکریزهای شنی

خاک‌های ماسه‌ای

مصالح رسی و ریزدانه

محدوده نشست

خاک‌های مستعد روانگرایی



سنتز اطلاعات و گزارش ژئوتکنیک

موارد مندرج در گزارش ژئوتکنیک

- ۱- موقعیت محل و خصوصیات کلی پروژه و نحوه قرارداد جهت مطالعات ژئوتکنیک
- ۲- زمین‌شناسی عمومی منطقه
- ۳- خلاصه‌ای از نوع پی‌ها و بارهای وارده جنبه‌های مختلف سازه‌ای و معماری
- ۴- خلاصه‌ای از عوارض سایت مربوط به جنبه‌های هیدرولوژی، توپوگرافی و زمین‌شناسی
- ۵- روش‌های حفاری و نمونه‌گیری
- ۶- لیست و چگونگی آزمایش‌های درجا و آزمایشگاهی به همراه نمودارهای مربوط
- ۷- تغییرات رقوم آب زیرزمینی، حرکت آب در خاک
- ۸- پروفیل زمین بر اساس لوگ گمانه
- ۹- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک
- ۱۰- مقاومت مجاز، نشست پی‌ها
- ۱۱- بررسی پتانسیل مخاطرات ژئوتکنیکی مانند رانش، آب‌شستگی، تورم، روانگرایی و ...
- ۱۲- ضرایب فشار جانبی خاک در حالات مختلف و نیز ضریب عکس‌العمل بستر

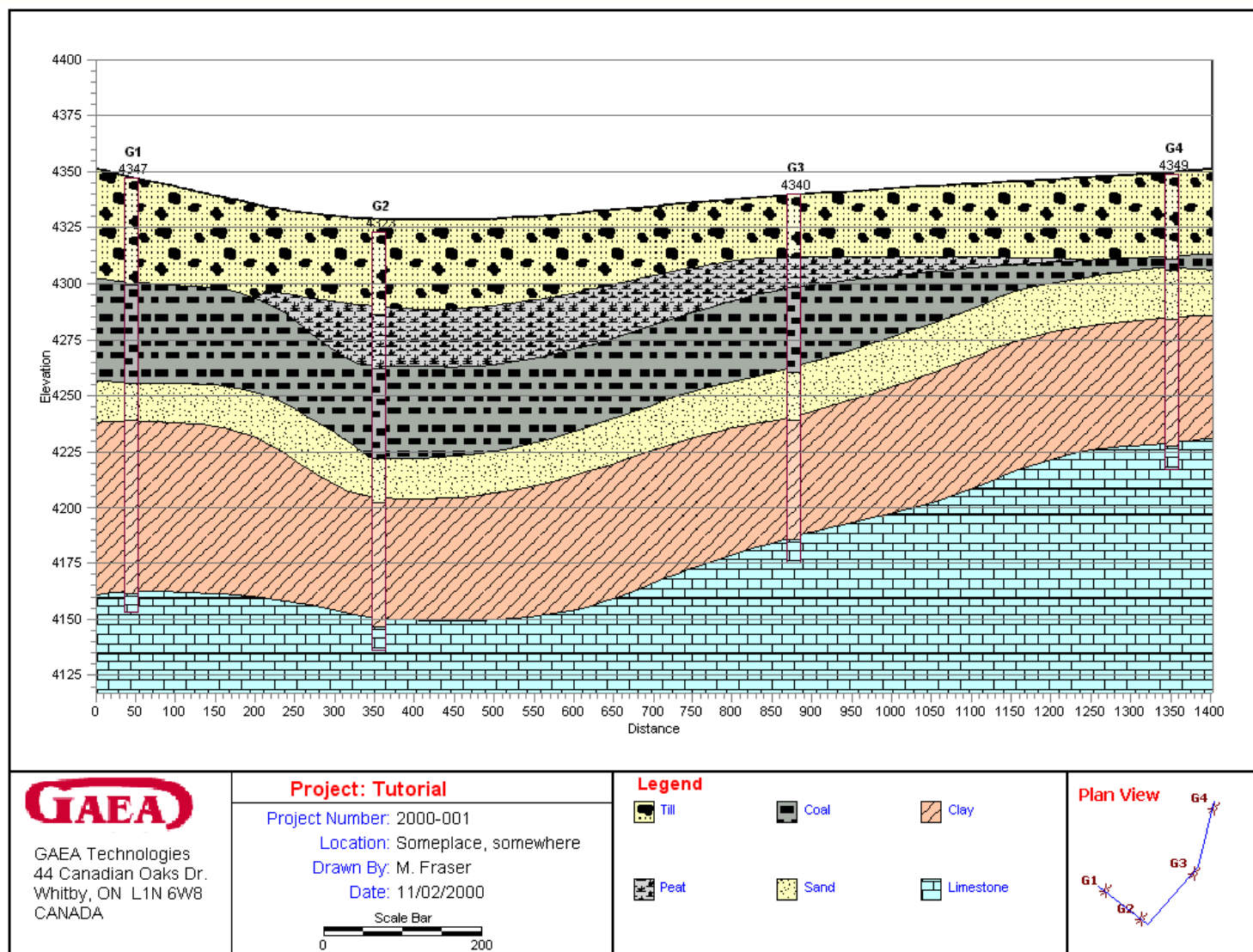
سنتز اطلاعات و گزارش ژئوتکنیک

موارد مندرج در گزارش ژئوتکنیک

- ۱۳- ضرایب فشار جانبی خاک در حالات مختلف و نیز ضریب عکس العمل بستر
- ۱۴- مشخصات شیمیایی آب و خاک محل مورد مطالعه
- ۱۵- پارامترهای ژئوتکنیکی مربوط به زلزله و مبانی لرزه زمین‌ساخت
- ۱۶- توصیه‌ها و پیشنهادها در خصوص طراحی و اجرای زیرسازه
- ۱۷- توصیه جهت نگهداری و مقابله با عوامل مهاجم و خورنده حاصل از املاح مضر در آب و خاک
- ۱۸- تعیین وضعیت منابع قرضه و چگونگی استحصال آن‌ها
- ۱۹- چگونگی گودبرداری، حفاری و شیوه‌های پایدارسازی آن‌ها
- ۲۰- محدودیت‌های مطالعات، آزمایش‌ها، روابط و پارامترهای پیشنهادی
- ۲۱- منابع و مراجع

- گزارش ژئوتکنیک: اطلاعات حاصله از مطالعات ژئوتکنیک، تجارب، تفسیر و قضاوت مهندسی
- نقش مکمل آزمایش‌های درجا و تست‌های آزمایشگاهی در مهندسی پی
- پارامترهای مقاومتی و سختی مهم خاک در مهندسی پی: q_c ، N ، K_s و PL
- نقش پررنگ آزمایش‌های درجا در تعیین پارامترهای طراحی پی

سنتز اطلاعات و گزارش ژئوتکنیک



ACME

ACME Consulting Limited
44 Canadian Oaks Drive
Whitby, Ontario

Log of Borehole:

Project No.:

Project: Port Sidney Oil Terminal

Client: Inter-Island Gas

Location: Port Sidney

Enclosure: 1

Project Manager: M. Fraser

SUBSURFACE PROFILE			SAMPLE				Well Completion Details
Depth	Symbol	Description	Depth/Elev.	Number	Type	Recovery	
ft							
m							
-1		Ground Surface	102				
			101				
			0				
1		Asphalt					
		Fill		1		40	180
		Sand and gravel fill, some organic debris.					
3		Sandy Silt	98	2		30	220
		Moist, brown to grey sandy silt with embedded gravel.					
5		Sand	96	3		75	380
		Medium to fine sand, occasional clay lenses. Strong hydrocarbon odour.					
7				4		60	450
9				5		55	315
11		Clay	90	6		80	210
		Mottled brown and grey silty clay. Some sandy lenses.					
13			87	7		45	125
		Sand					
		Compact, coarse to medium sand. Shell fragments.					
15							
17							
19			82				
			19				
6							

Drilled By: ABC Drilling Company

Drill Method: H/S Auger

Drill Date: 02-06-2000

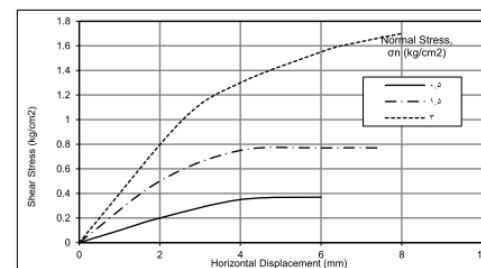
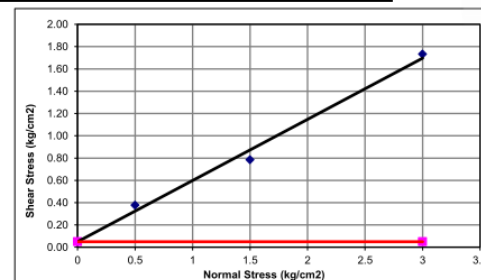
Hole Size: 12"

Datum: Local

Sheet: 1 of 1

سنتر اطلاعات و گزارش ژئوتکنیک**DIRECT SHEAR TEST DATA (ASTM D3080)**

Project	ساختمان مسکونی	Test Pit No.	TP.1
Location	بلوار	Depth (m)	1.0
		Box Diameter	10*10*2
Project No.	1200000	Soil Type	SC



Water Content	Dry Density	Normal stress at Failure	Shear stress at failure	Shear Displacement	Cohesion Resistance	Angle Of internal friction
w_{opt} (%)	γ_d (gr/cm³)	σ_n (kg/cm²)	τ (kg/cm²)	(mm)	C (kg/cm²)	ϕ degree
6.2	1.73	0.59	0.38	4.50	0.05	29
		1.33	0.78	6.00		
		3.04	1.73	7.00		

Shear rate: 1.2 mm/min

Sample type: Remolded

test type: Quick

SPT و محدودیت‌های آن

Is One Number Enough ?

c_u = undrained strength

OCR = overconsolidation

γ_{sat} = total unit weight

I_R = rigidity index

e_o = void ratio

ϕ' = friction angle

K_0 = lateral stress

V_s = shear wave

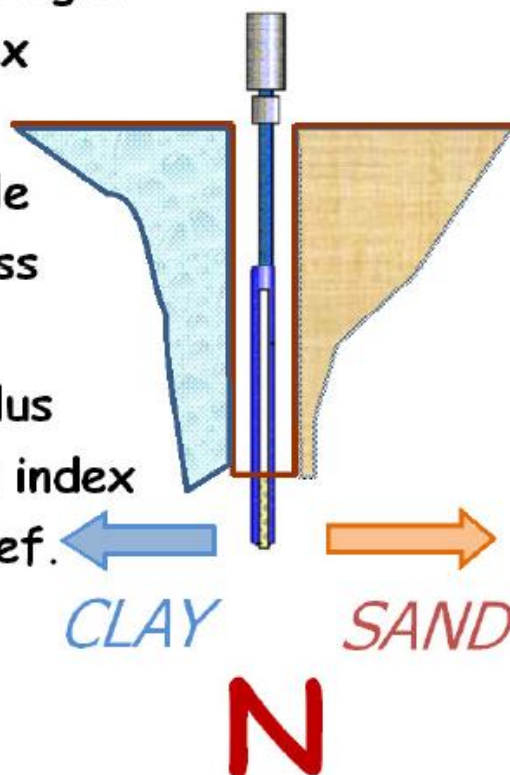
G' = shear modulus

C_c = compression index

k_s = subgrade coef.

c_a = adhesion

k = permeability



D_R = relative density

γ_d = dry unit weight

LI = liquefaction index

ϕ' = friction angle

c' = cohesion intercept

n = porosity

q_{ult} = bearing capacity

σ_p' = preconsolidation

V_p = compression wave

E' = Young's modulus

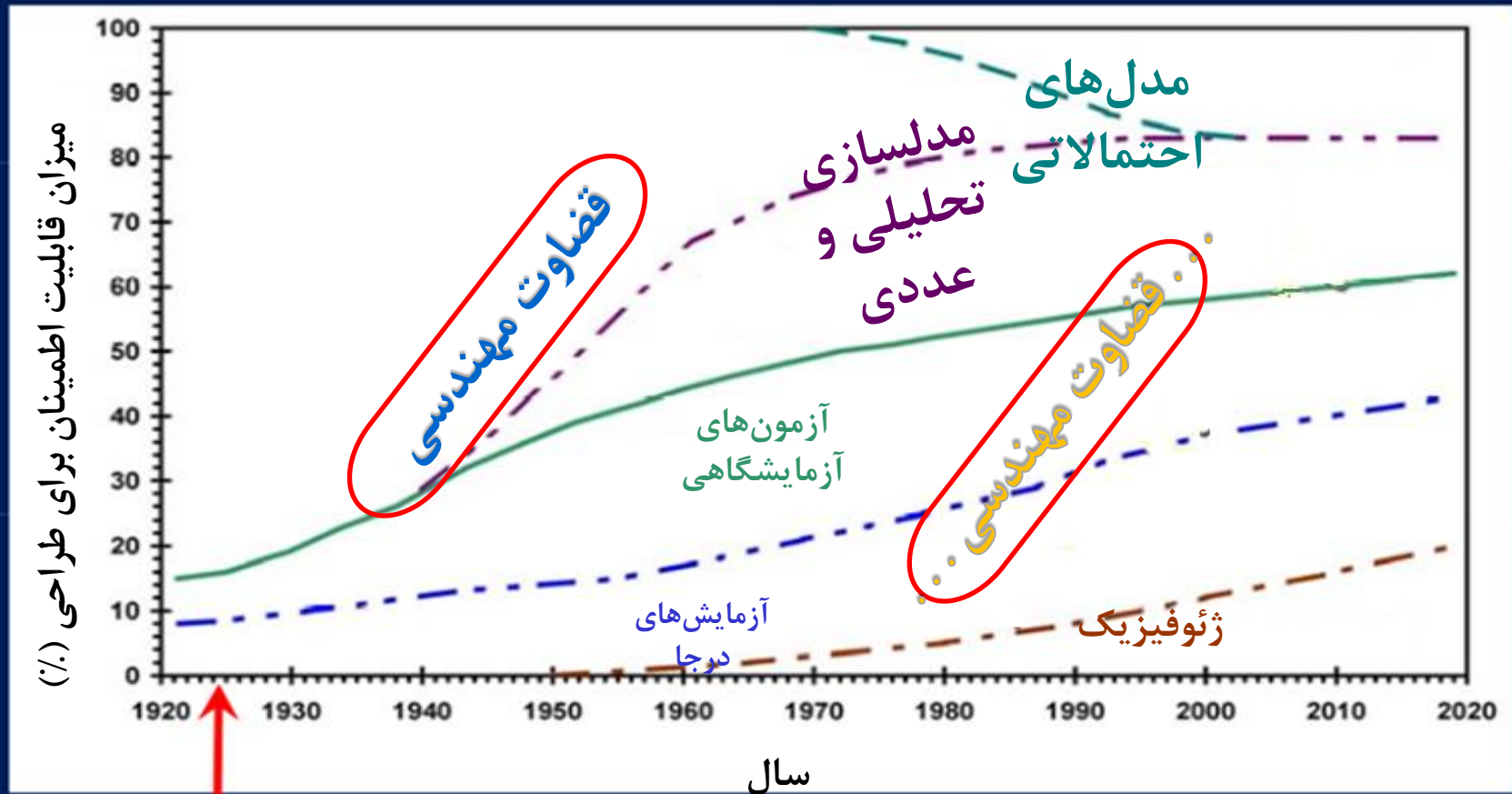
Ψ = dilatancy angle

q_b = pile end bearing

f_s = pile skin friction

قضای مهندسی

تکامل روندهای مطالعاتی
ملاحظه اندرکنش خاک و سازه با شاخص های پی سازی
Modified after Lacasse (1985)

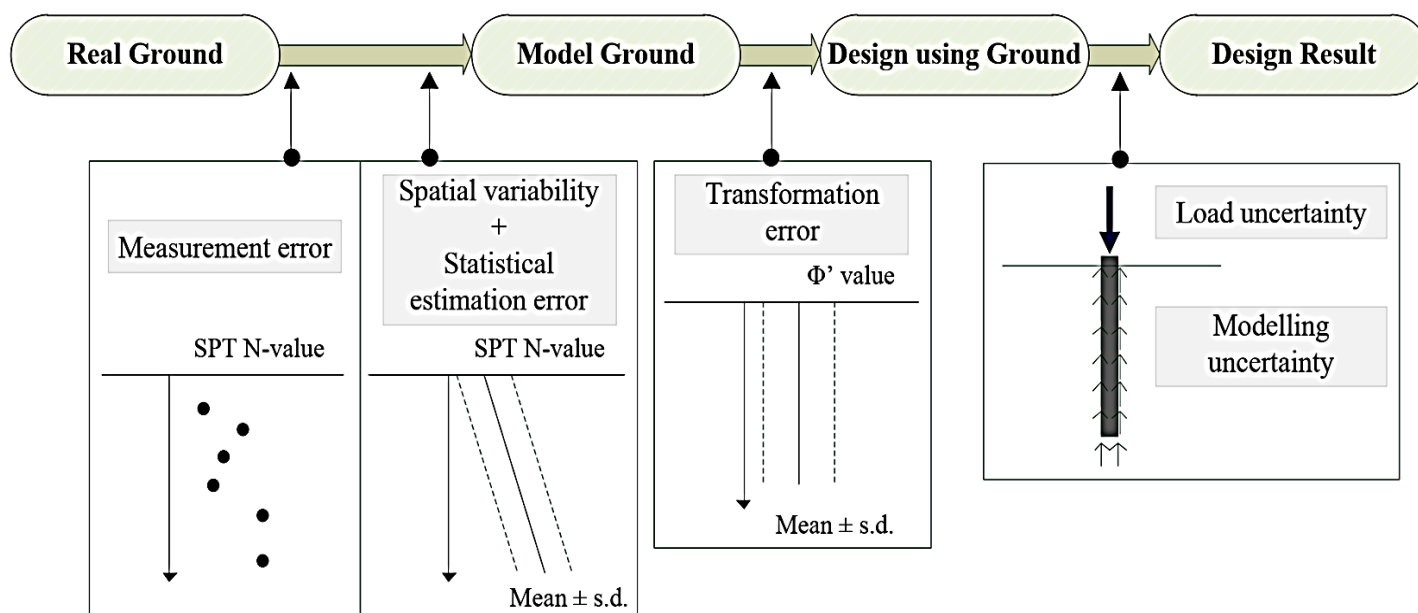


SOA-1: 17th ICSMGE 2009 - Alexandria

عدم قطعیت در مهندسی ژئوتکنیک

منابع اصلی ایجادکننده عدم قطعیت در مهندسی ژئوتکنیک:

- تغییرپذیری ذاتی،
- خطاهای اندازه‌گیری و عدم قطعیت‌های آماری
- عدم قطعیت در مدل و خطاهای ناشی از تبدیل
- عدم قطعیت در بارگذاری



A procedure for geotechnical RBD (Honjo, 2011)

عدم قطعیت در مهندسی ژئوتکنیک

Variability from laboratory testing (Phoon and Kulhawy, 1999)

Test	Property	Soil type	Coefficient of variation (%)	
			Range	Mean
Atterberg tests	Plasticity index	Fine grained	5-51	24
Triaxial compression	Effective angle of friction	Clay, silt	7-56	24
Direct shear	Shear strength, C_u	Clay, silt	19-20	20
Triaxial compression	Shear strength, C_u	Clay, silt	8-38	19
Direct shear	Effective angle of friction	Sand	13-	
Direct shear	Effective angle of friction	Clay	6-	
Direct shear	Effective angle of friction	Clay, silt	3-	
Atterberg tests	Plastic limit	Fine grained	7-	
Triaxial compression	Effective angle of friction	Sand, silt	2-	
Atterberg tests	Liquid limit	Fine grained	3-	
Unit weight	Density	Fine grained	1-	

Variability from in-situ testing (Phoon and Kulhawy, 1999)

Test	Equipment	Oper./proc.	Random	Total ^a	Range ^b
Standard penetration test (SPT)	0.05 ^c -0.75 ^d	0.05 ^c -0.75 ^d	0.12-0.15	0.14 ^c -1.00 ^d	0.15-0.45
Mechanical cone penetration test (CPT)	0.05	0.10 ^e -0.15 ^f	0.10 ^e -0.15 ^f	0.15 ^e -0.22 ^f	0.15-0.25
Electric cone penetration test (ECPT)	0.03	0.05	0.05 ^e -0.10 ^f	0.07 ^e -0.12 ^f	0.05-0.15
Vane shear test (VST)	0.05	0.08	0.10	0.14	0.10-0.20
Dilatometer test (DMT)	0.05	0.05	0.08	0.11	0.05-0.15
Pressuremeter test, pre-bored (PMT)	0.05	0.12	0.10	0.16	0.10-0.20 ^g
Self-boring pressuremeter test (SBPMT)	0.08	0.15	0.08	0.19	0.15-0.25 ^g

^a $COV(total)^2 = COV(equipment)^2 + COV(operator/procedure)^2 + COV(random)^2$.

^b Because of statistical estimation uncertainty and subjective judgment involved in estimating COVs, ranges represent plausible magnitudes of measurement uncertainty for field tests.

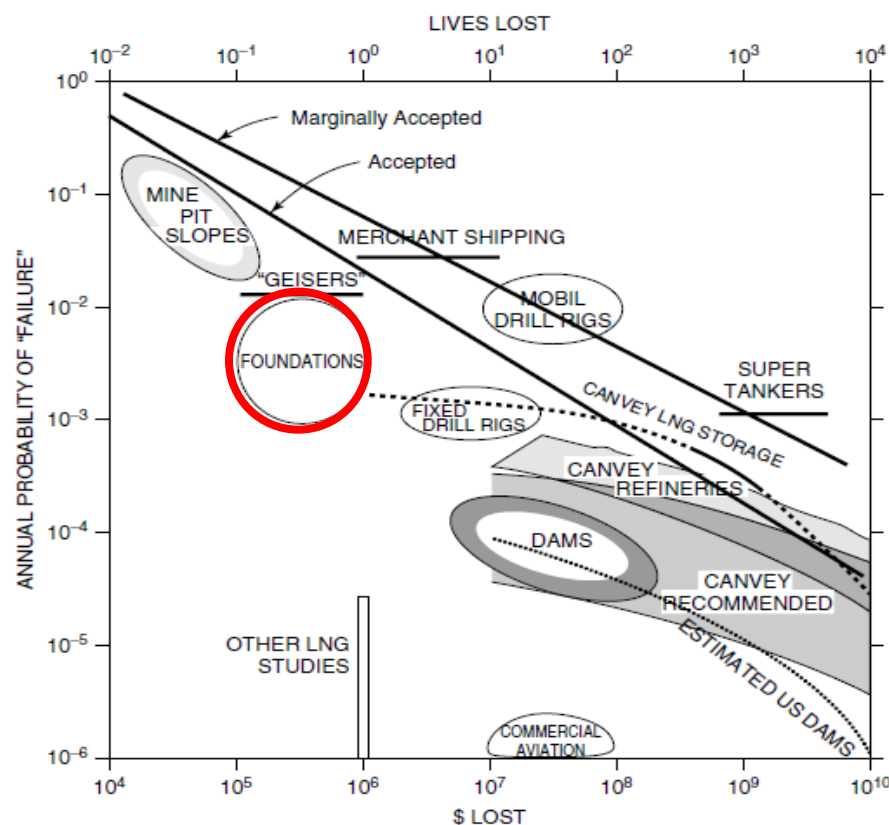
^{c,d} Best- to worst-case scenarios, respectively, for SPT.

^{e,f} Tip and side resistances, respectively.

^g It is likely that results may differ for p_0 , p_f and p_L , but data are insufficient to clarify this issue.

عدم قطعیت در مهندسی ژئوتکنیک

مقادیر ضریب تغییرات خصوصیات ژئوتکنیکی
(Duncan, 2000)



Risks for engineering projects
(Withman, 1984)

مقدار پارامتر اندازه گیری شده یا تفسیر شده	COV (%)
وزن مخصوص، γ	3 – 7
وزن مخصوص غوطه وری، γ'	0 – 10
زاویه اصطکاک تنش مؤثر، ϕ'	2 – 13
مقاومت برشی زهکشی نشده، S_u	13 – 40
نسبت مقاومت زهکشی نشده، S_u/σ'_{v0}	5 – 15
شاخص فشردگی، C_c	10 – 37
تنش پیش تحکیم یافتگی، σ'_p	10 – 35
رسانایی هیدرولیکی رس اشباع، k	68 – 90
رسانایی هیدرولیکی رس نیمه اشباع، k	130 – 240
ضریب تحکیم، C_v	33 – 68

مورد عملی شماره ۱ – شهر مکزیکوسیتی (وجود خاک مسئله‌دار)

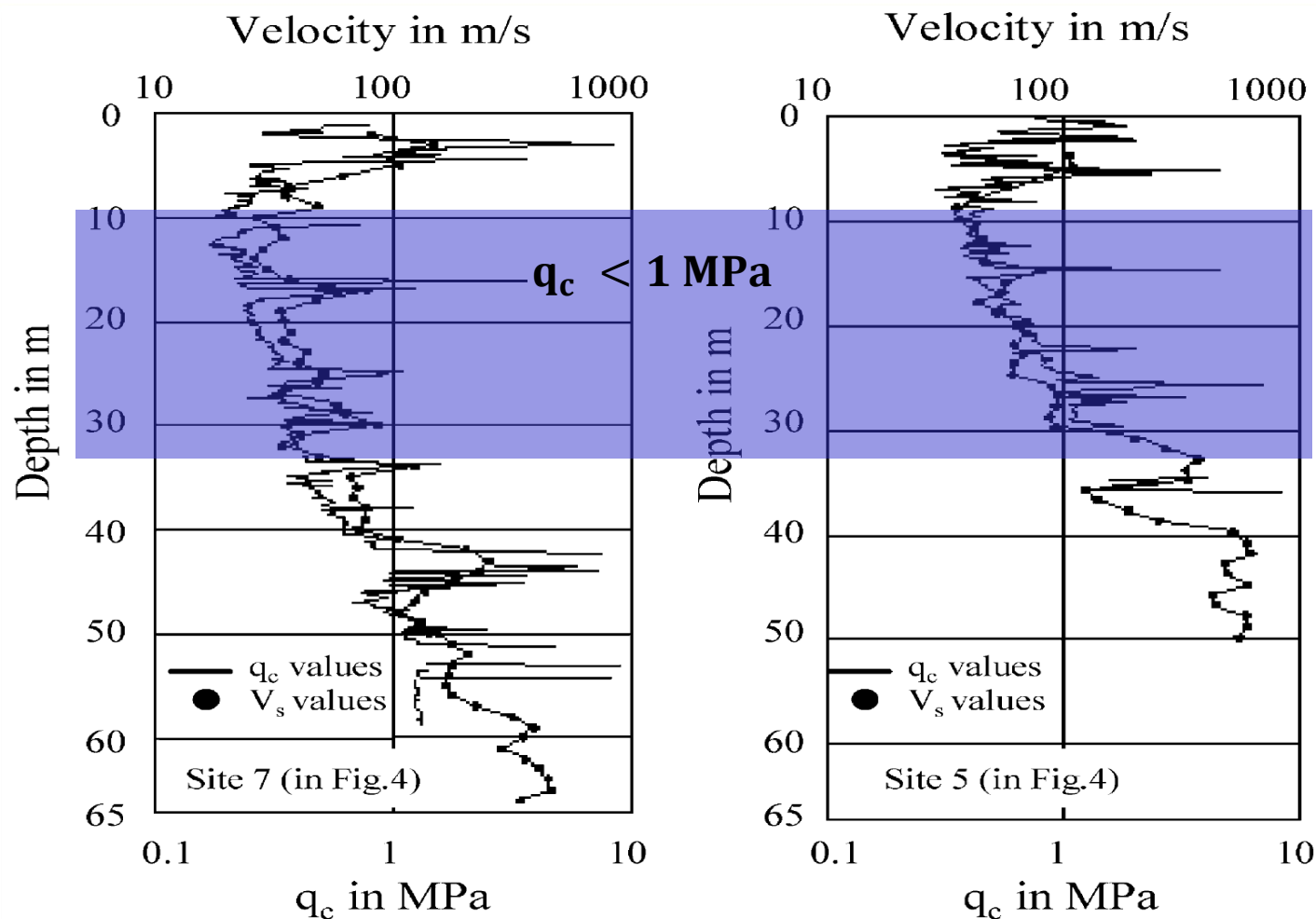
برج Torre Latino Americana (Coduto et al., 2016)

- ساخت برج ۴۳ طبقه در شهر مکزیکوسیتی
- نمونه‌ای از کاربرد روش‌های نوین در خاک‌های مسئله‌دار

پروفیل خاک محل برج Torre Latino Americana

عمق (متر)	نوع و شرایط خاک
۵/۵-۰	خاکریزهای قدیمی - سطح آب در ۲ متری
۹/۱-۵/۵	نهبشته‌های Becarra - ماسه، لای و رس
۳۳/۵ - ۹/۱	رس Tacubaya و لکانیک نرم $Cc=4-10$ رطوبت ۱۰۰ تا ۴۰۰ درصد , $Su=35-70$ kPa
۷۰-۳۳/۵	نهبشته‌های ماسه‌ای متراکم Tarango

مورد عملی شماره ۱- شهر مکزیکوسیتی (وجود خاک مسئله‌دار)

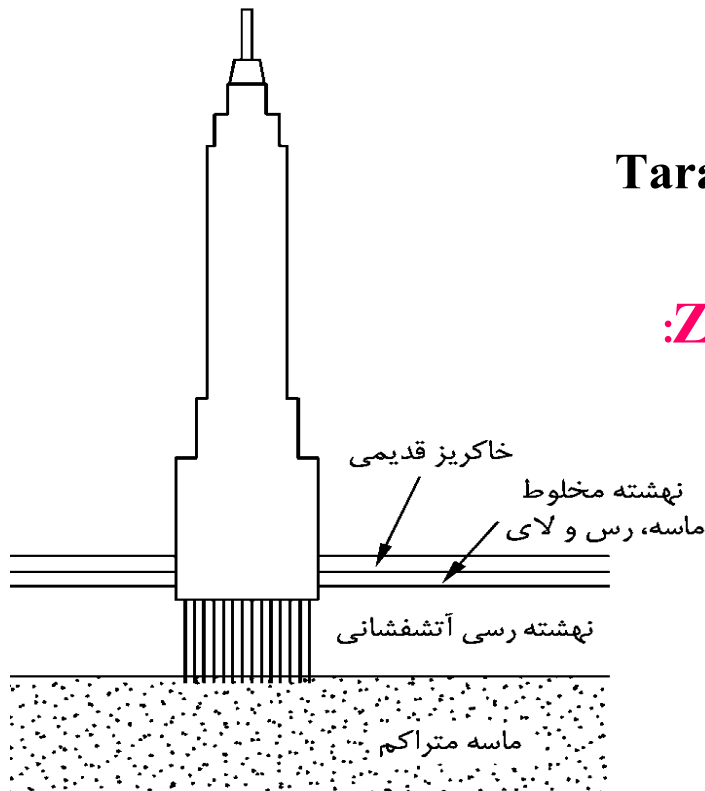


Stratigraphic characteristics of Mexico City soil deposits
(Romo & Garcia, 2003)

مورد عملی شماره ۱ – شهر مکزیکوسیتی (وجود خاک مسئله‌دار)

برج (Coduto et al., 2016) Torre Latino Americana

- لایه بسیار نشست‌پذیر در عمق ۹/۱ تا ۳۳/۵ متری،
- نشست‌های بسیار بزرگ در ساختمان‌های متوسط اطراف این بنا حدود ۳ متر، از سال ۱۹۰۴ تا ۱۹۶۲ و ادامه با نرخ ۱۲ میلیمتر در سال
- استفاده از پی رادیه-مرکب شناور در عمق ۱۳ متری
- شمع‌های کوبیدنی در زیر رادیه تا لایه ماسه‌ای متراکم Tarango



از جنبه‌های جالب توجه در این پروژه به نقل از Zeevart:

- مطالعات ژئوتکنیک در شناخت خاک مسئله‌دار میان لایه
- اهمیت شمع‌های اتکایی
- جنبه‌های بهینه بکارگیری پی‌های شناور
- نشست‌ها در محدوده مجاز

۲. سیستم فونداسیون: فرم و عملکرد

2. Foundation Systems: Form & Function

مهندسی پی

❑ پروژه‌های عمرانی:

❖ روسازه Superstructure

❖ زیرسازه Substructure

❑ مشارکت زیرسازه در تماس با خاک و در روند انتقال بار سازه به زمین

❑ انتقال بار از روسازه به زمین توسط عنصری به نام پی یا فونداسیون

مهندسی پی هنر بکارگیری علوم ژئوتکنیک، سازه و قضاوت مهندسی برای طراحی و انتخاب فونداسیون مناسب می باشد.

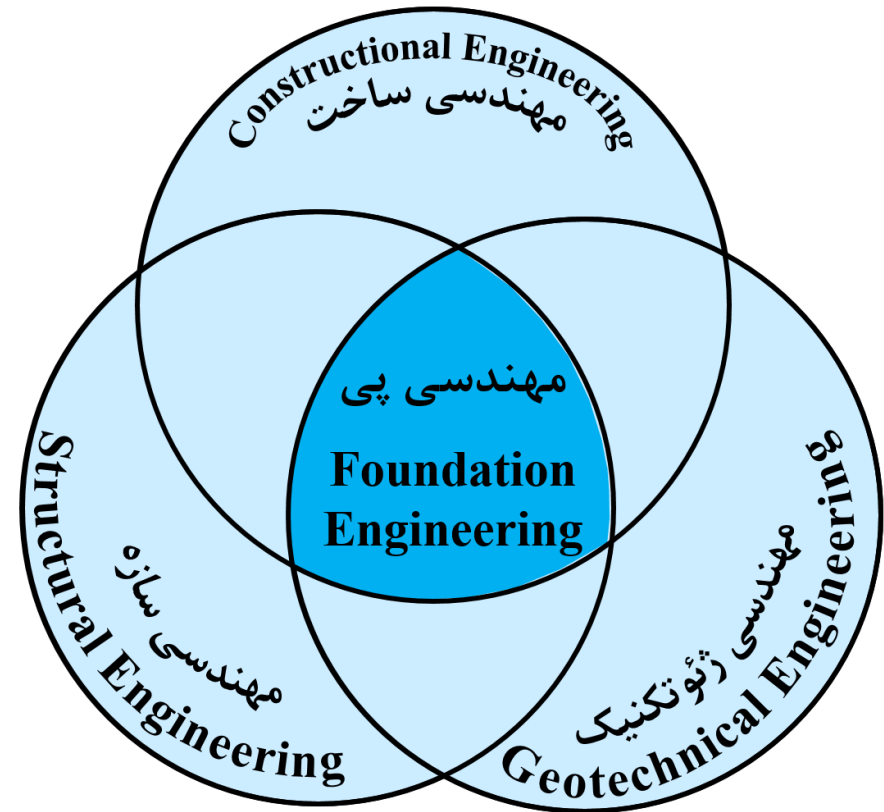
ترزاقی: «طراحی هر آنچه که مربوط به زمین می شود را نباید صرفاً در دفتر کار انجام داد.»

Knowledge Based, Construction Technology, Optimization

Salgado (2008):

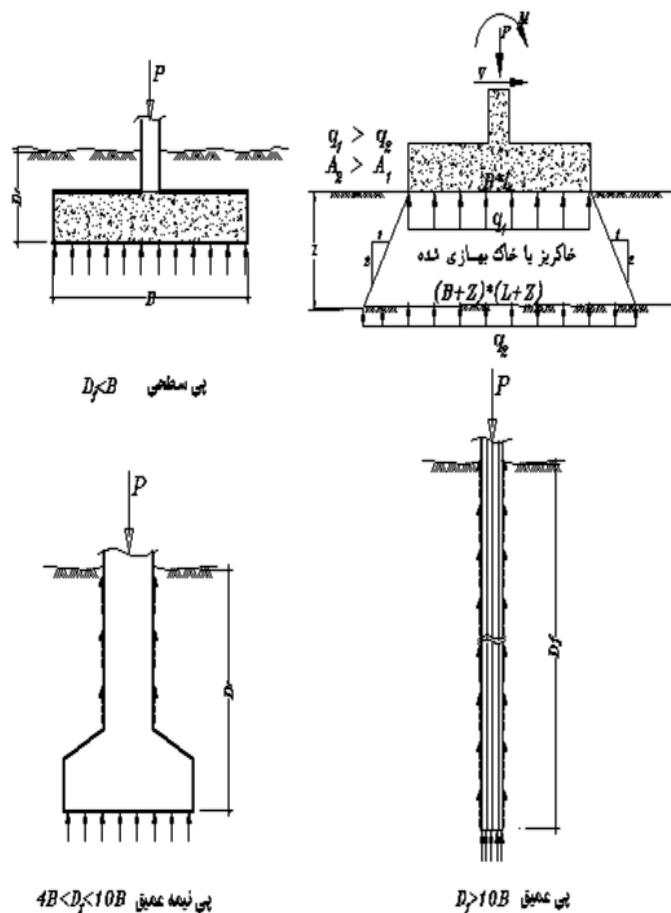
Foundation engineering tools are:

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



Multidisciplinary: Structural, Geotechnical and Constructional

سیستم های پی سازی



پی های سطحی

پی سطحی +
بهسازی

پی های نیمه عمیق

پی های عمیق

انواع سیستم های
پی سازی

معضلات فونداسیون‌های سطحی و عمیق

پی سطحی

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

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 غیربهینه در طراحی و بهره‌برداری

راه حل میانه: بهسازی، پی‌های نیمه عمیق

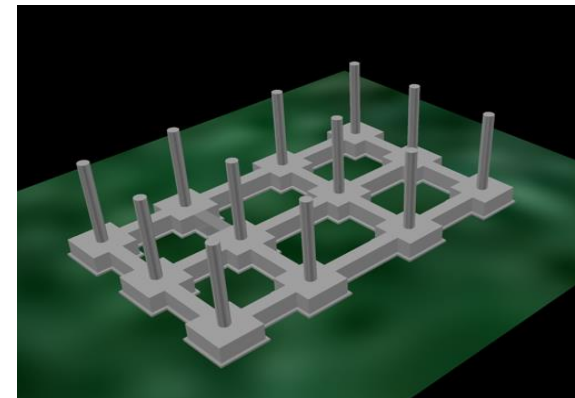
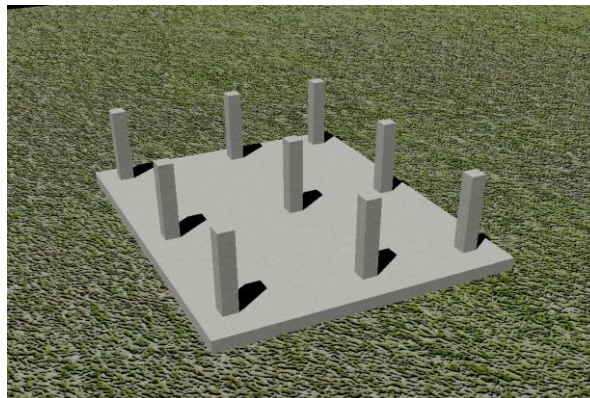
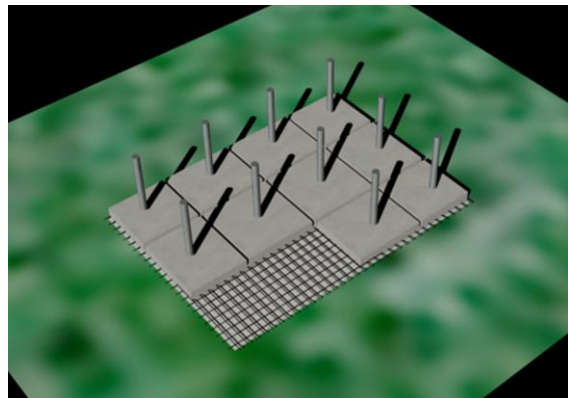
مقایسه پی‌های سطحی و عمیق

پی عمیق	پی سطحی	نوع فونداسیون	ملاحظات طراحی
		ظرفیت باربری	نشست
زیاد	کم تا متوسط	طراحی سازه‌ای	پایداری
مقاومت کف تا 120kg/cm^2	$0.5-5\text{ kg/cm}^2$	ملاحظات اجرایی	جنبه‌های اقتصادی
مقاومت جدار $0.2-2\text{kg/cm}^2$	زیاد	سادگی تا پیچیده	نسبتاً دشوار
محدود	مشکل‌دار	نسبتاً عملی	نسبتاً پرهزینه
معمول	تا حدودی مطلوب		
کنترل شده			
نسبتاً دشوار			
نسبتاً پرهزینه			

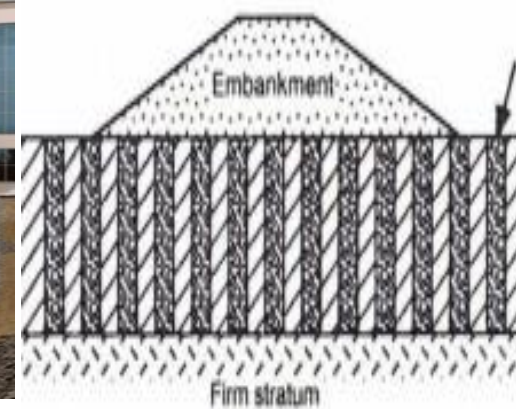
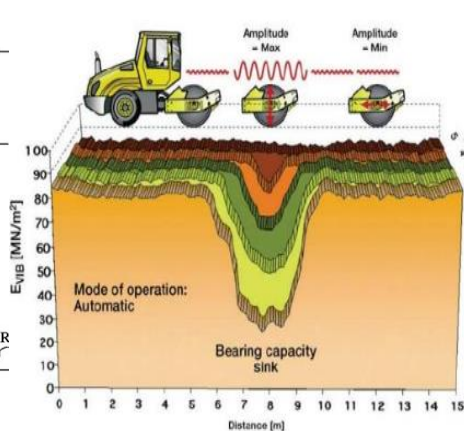
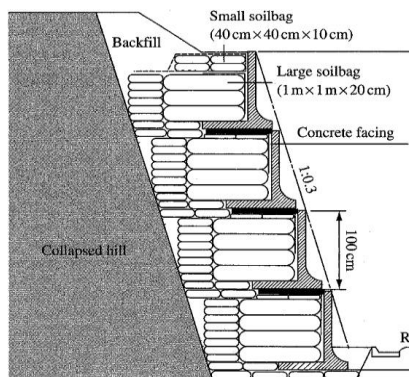
فونداسیون‌های نیمه‌عمیق، بهسازی
راه حل میانه:

انواع فونداسیون ها: سطحی- بهسازی

پی سطحی $D/B < 1$

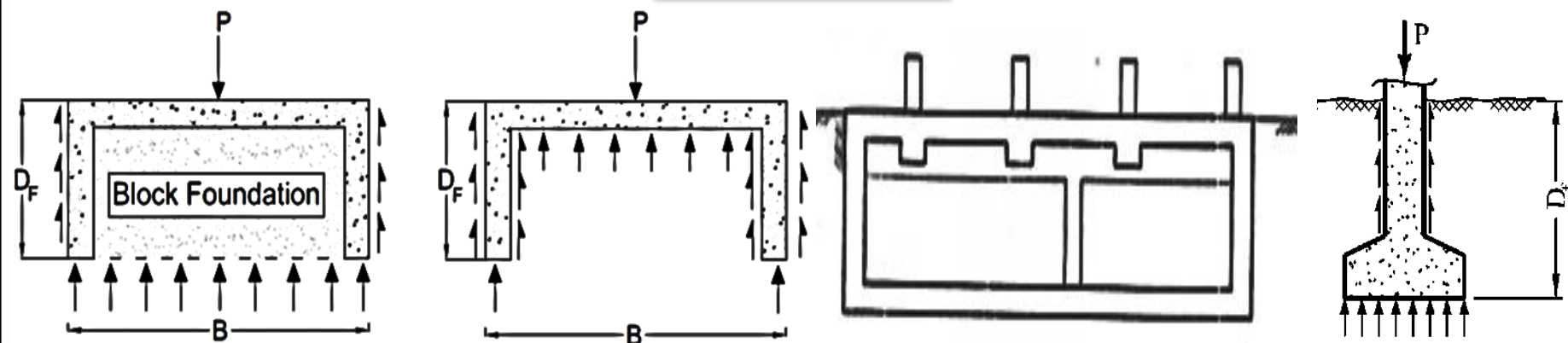


بهسازی

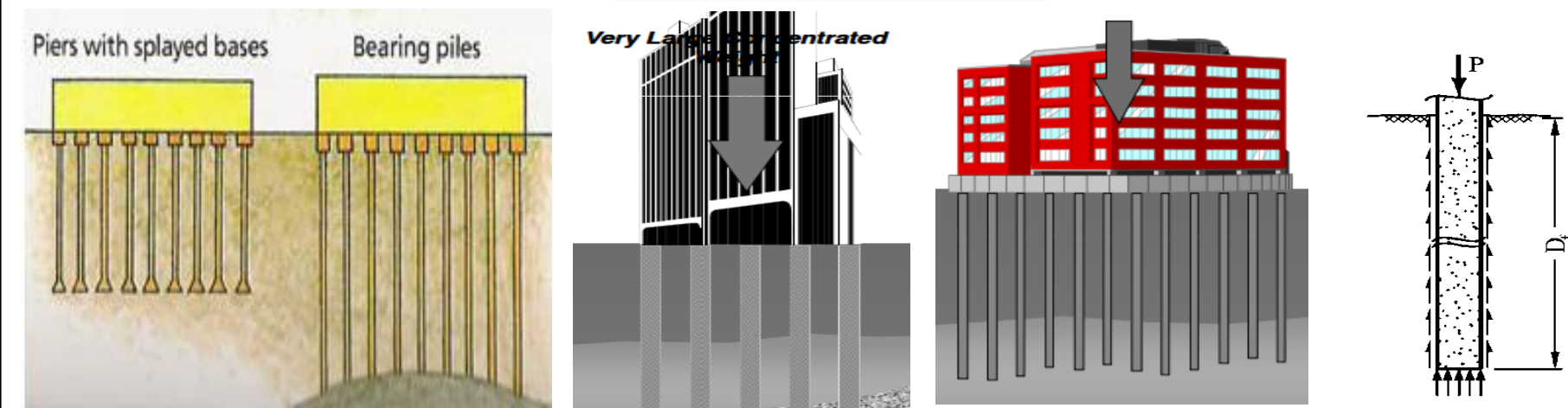


انواع فونداسیون ها: نیمه عمیق – عمیق

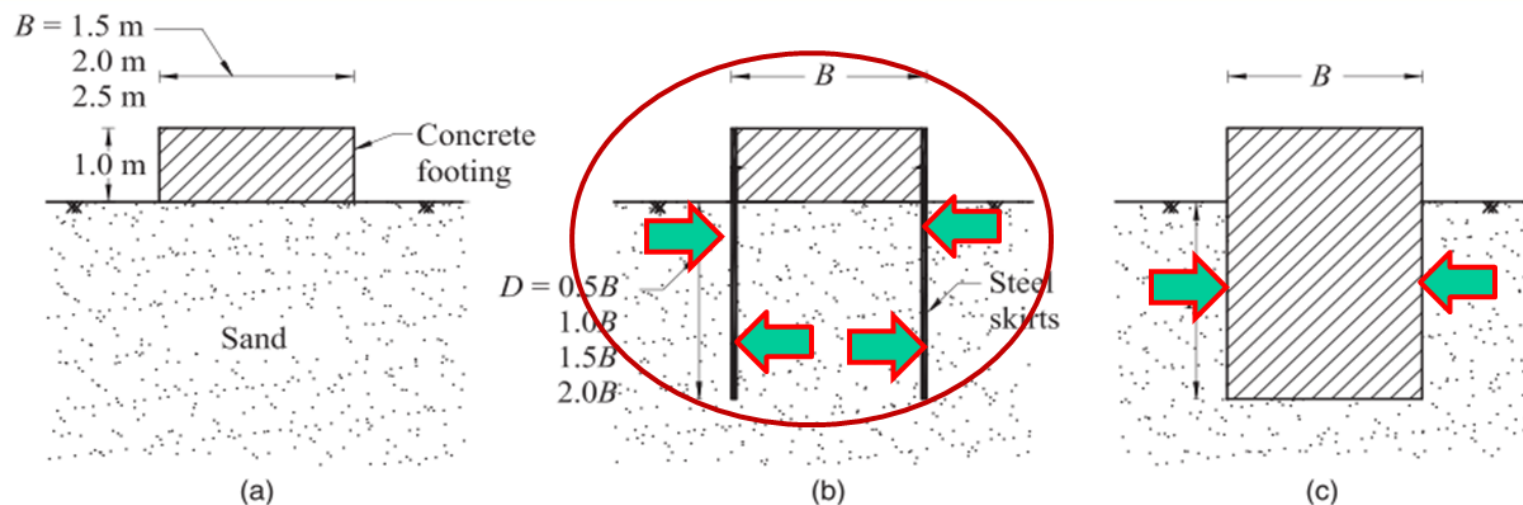
پی نیمه عمیق



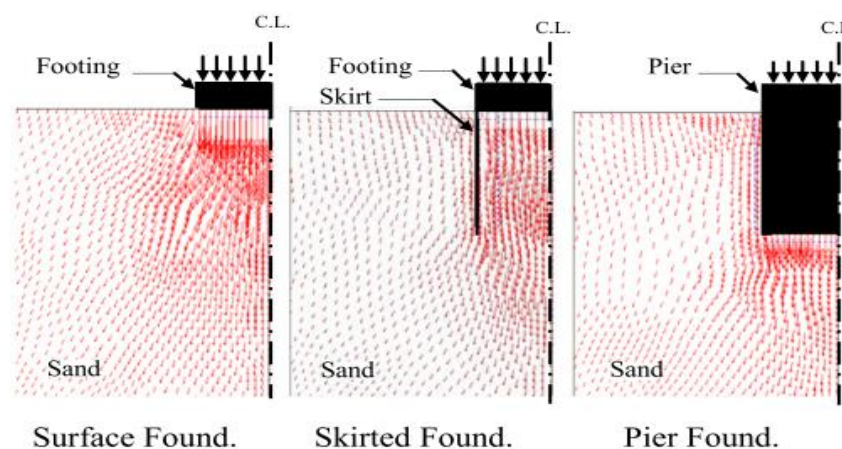
پی عمیق $D/B > 10$



اثرات افزایش عمق استقرار



محصورشدگی خاک توسط پی و پی توسط خاک

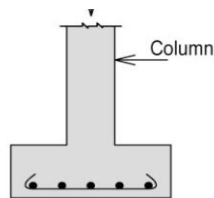
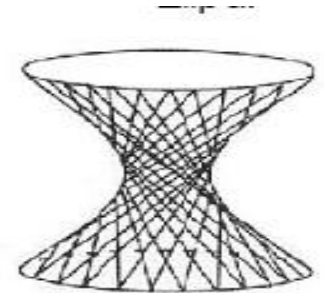
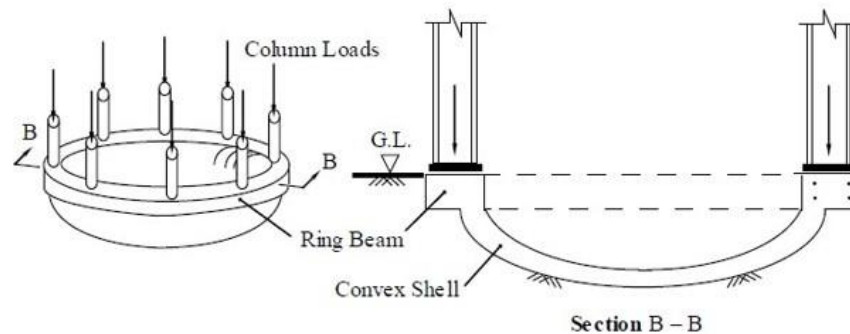
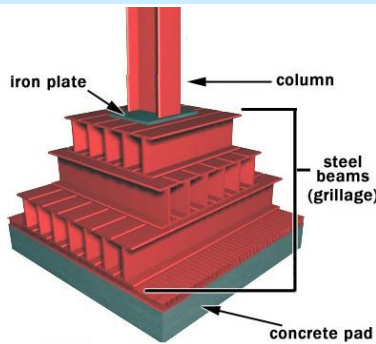


انواع پی‌های (ترکیبی) نیمه عمیق

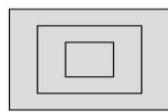
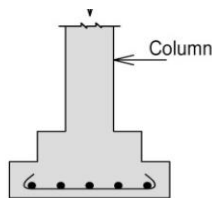
- پی‌های چاهی
Well Foundations
- پی‌های شناور
Floating Foundations
- پی‌های باکسی یا جعبه
Box Foundations
- ساخت همزمان روسازه و زیرسازه
Top-Down Construction
- پی رادیه-مرکب
Piled Raft Foundations
- باکت‌ها و کیسون‌های مکشی
Buckets and Suction Caissons
- پی‌های لبه‌دار
Skirted Foundations
- پی‌های پوسته‌ای
Shell Foundations
- ریزشمع و شمع‌های پره‌ای - پیچشی
Micropile, Helical and DD Piles

فونداسیون های غیر متعارف

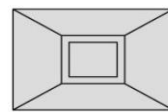
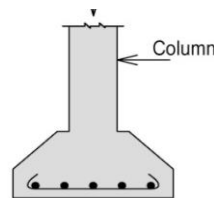
- Pad Foundation
- Ring Foundation
- Conical Foundation
- Grillage Foundation
- Hyperbolic Foundation
- Isolated Foundation
- Root Foundation
- Stepped Foundation
- Sloped Foundation
- Shell Foundation
- Attached Single Foundation
- Jacking Foundation
- Spherical Dome
- Cantilever (Strap) Foundation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



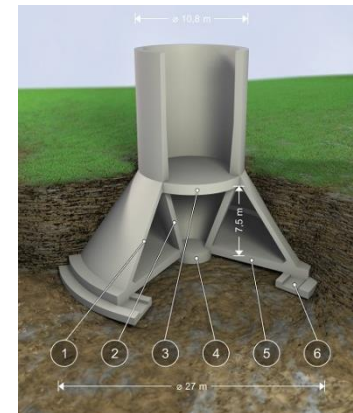
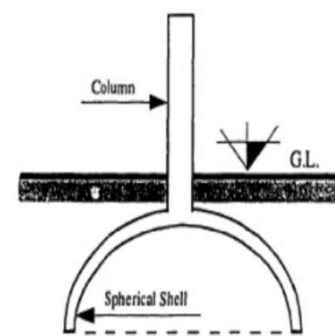
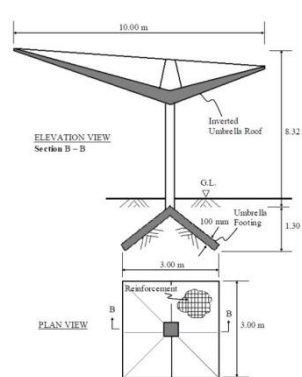
(a) Pad Footing



(b) Stepped Footing



(c) Sloped Footing



ژئوسیستم ها

یک سیستم مرکب متشکل از خاک، المان های سازه ای و آب

GeoSystems encompasses a broad area in geotechnical and geological engineering, environmental geotechnics, geohydrology and applied geophysics.



عملکرد یکپارچه خاک و مسلح‌کننده



مصارف ژئوسنتتیکي:

• كيسه‌های خاک

• ژئوتیوب

• ژئوسل



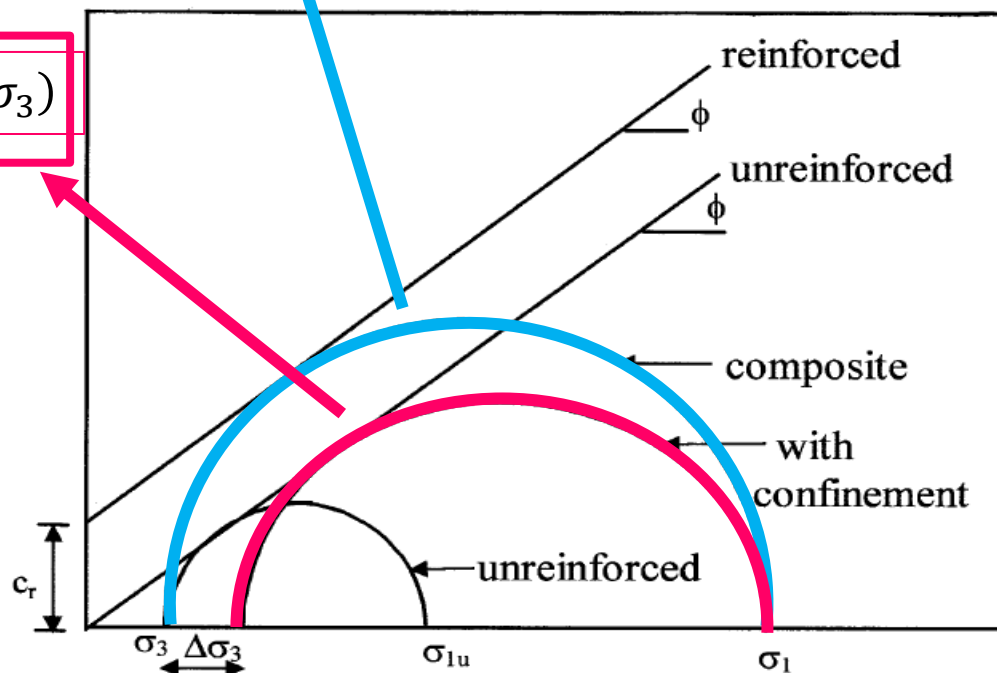
SANDBAGS

ایجاد چسبندگی ناشی از محصورشدگی در خاک دانه‌ای

$$\sigma_r = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 + 2c_r \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} = K_p \sigma_3 + 2c_r \sqrt{K_p}$$

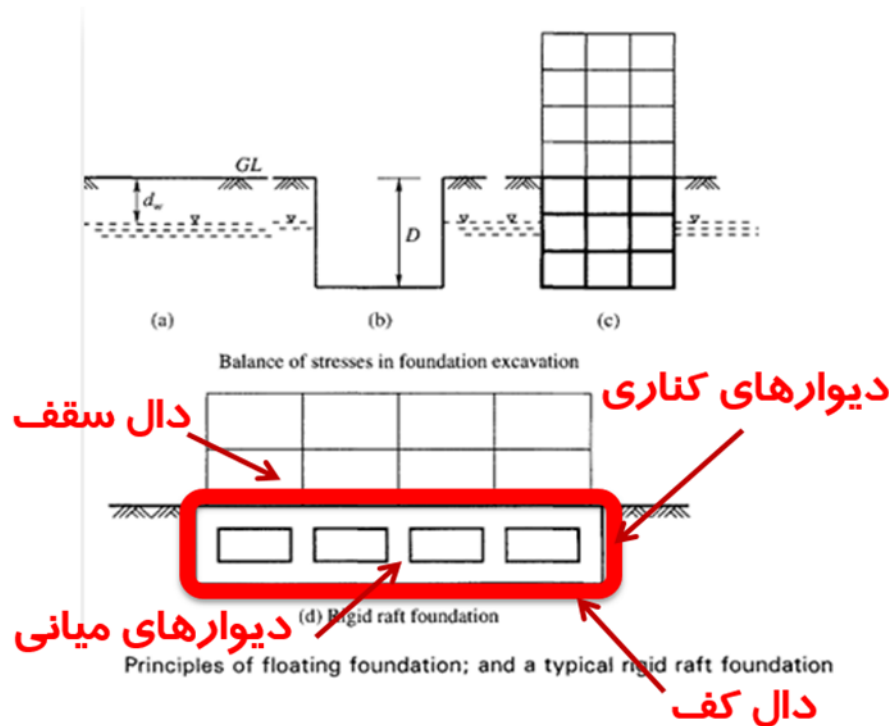
$$\sigma_1 = K_p(\sigma_3 + \Delta\sigma_3)$$

$$c_r = \frac{\Delta\sigma_3}{2} \sqrt{K_p}$$

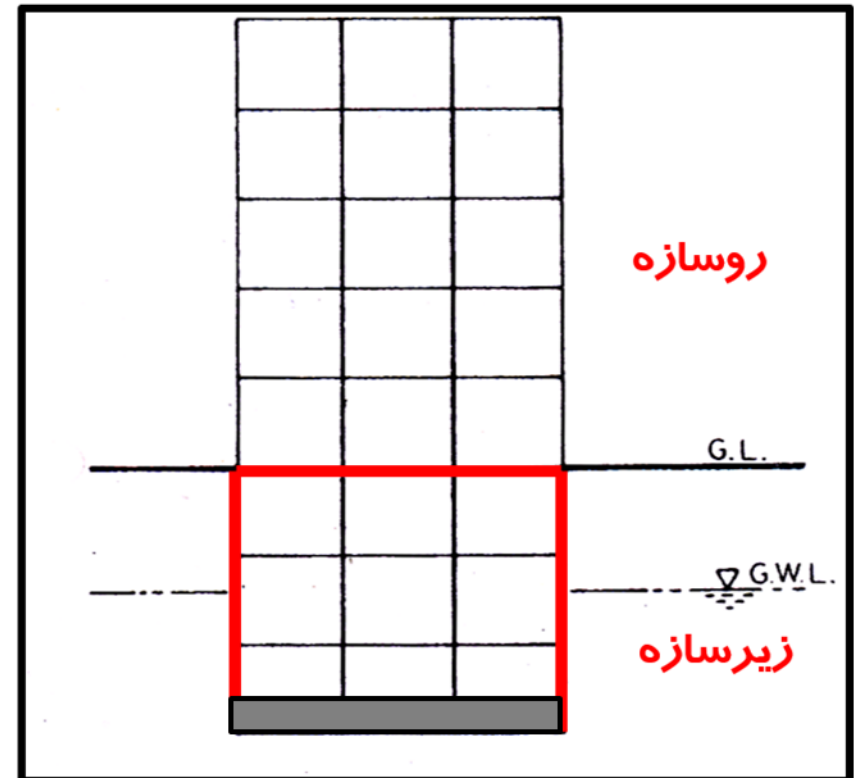


سیستم های پی

اجزای اصلی یک پروژه ساختمانی



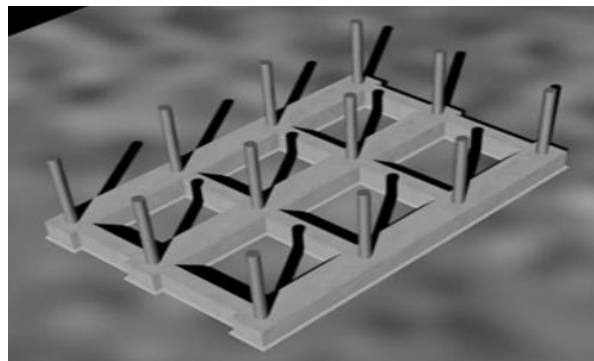
سیستم فونداسیون



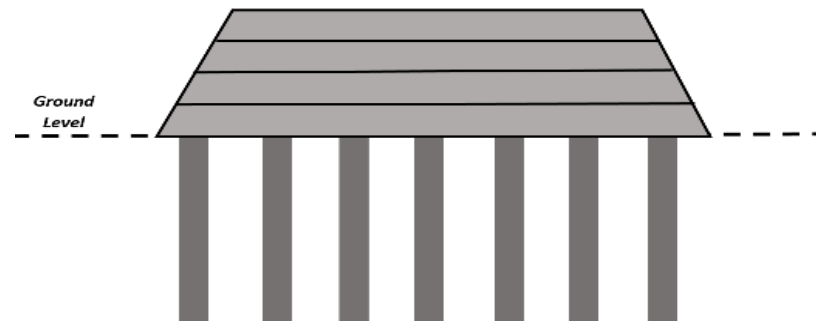
پی رادیه

سیستم‌های پی

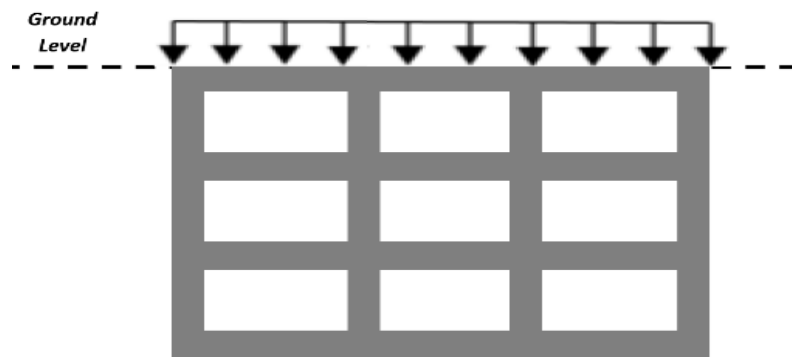
نمونه‌هایی از سیستم‌های پی



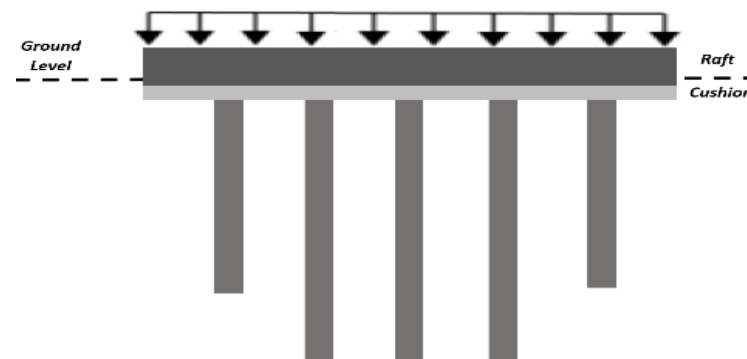
(a)



(b)



(c)



(d)

Various foundation systems; a) grid shallow foundation, b) embankment on rigid intrusion stabilized soil, c) semi-deep box foundation, d) piled raft foundation (PRF)

نگرش نوین؛ فرم هندسی و انتقال بار

فرم های هندسی سازه های



(a)



(b)

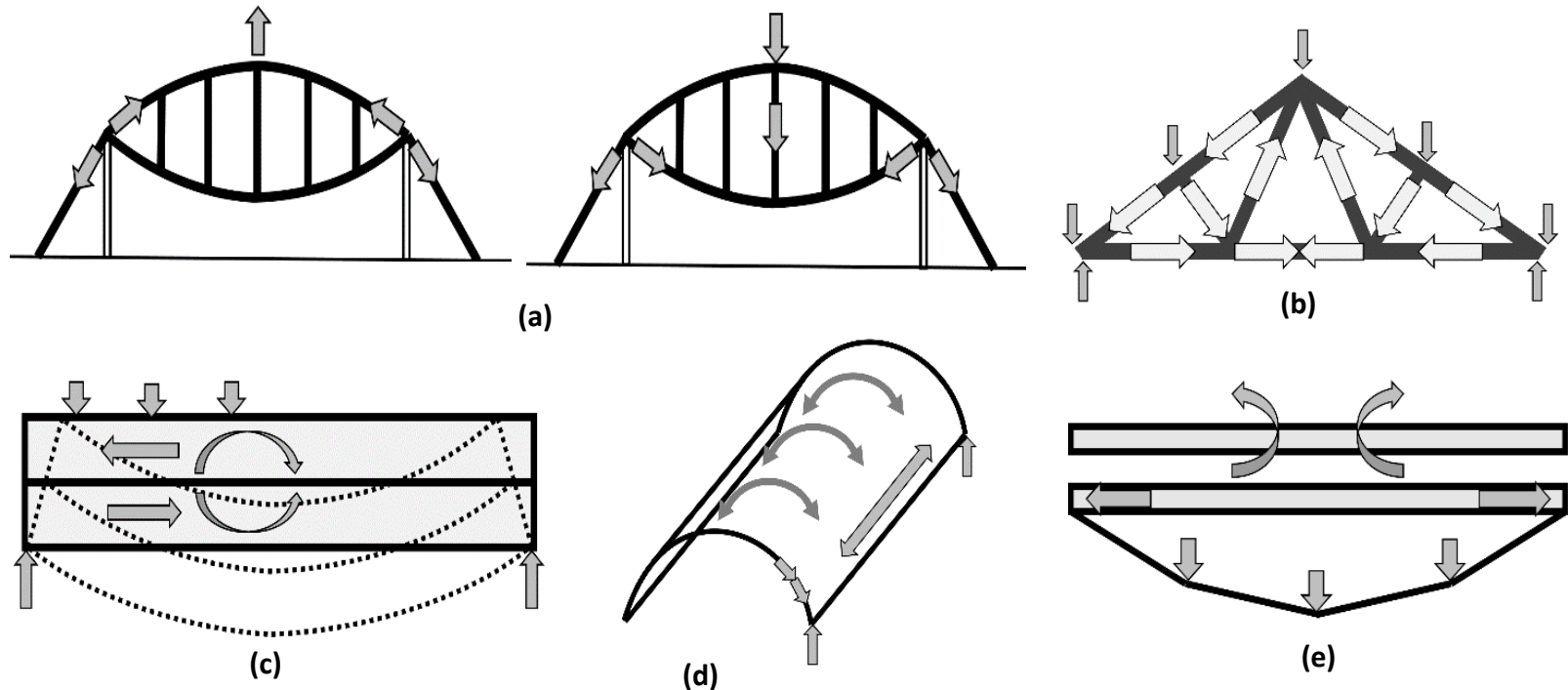


(c)

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)

نگرش نوین؛ فرم هندسی و انتقال بار

مکانیزم انتقال بار در سازه‌ها



Different structural systems load transfer mechanisms: a) form-act structure; b) vector-act structure; c) section-act structure; d) surface-act structure; e) hybrid structure (adapted from Engel, 2013)

نگرش نوین؛ فرم هندسی و انتقال بار

دسته‌بندی کلی پی‌ها بر اساس فرم هندسی

۱- پی‌های خطی: انواع شمع‌های تک

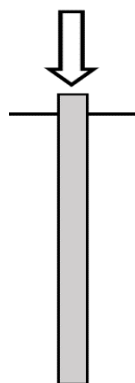
1. One-Dimensional (Linear) Foundations: Piles & Drilled Shafts

۲- پی‌های صفحه‌ای: انواع پی‌های سطحی و پوسته‌ای

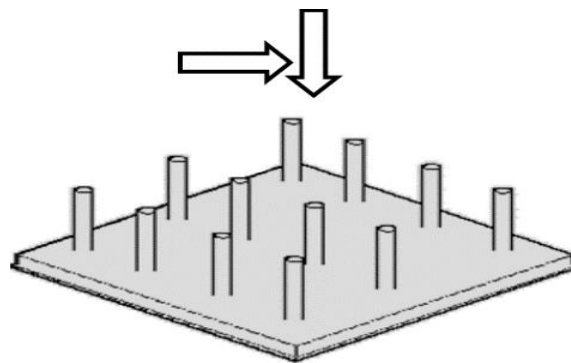
2. Two-Dimensional (Planar) Foundations: Footings, Mats & Shells

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

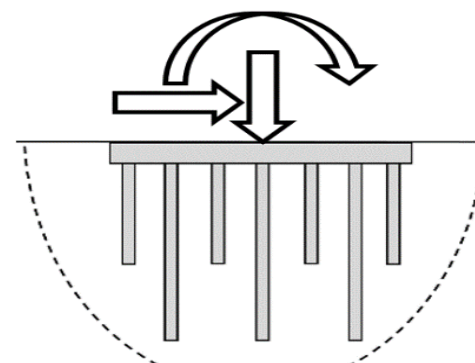
3. Three-Dimensional (Volumetric) Foundations: PRF & Massive Treatment



(a)



(b)

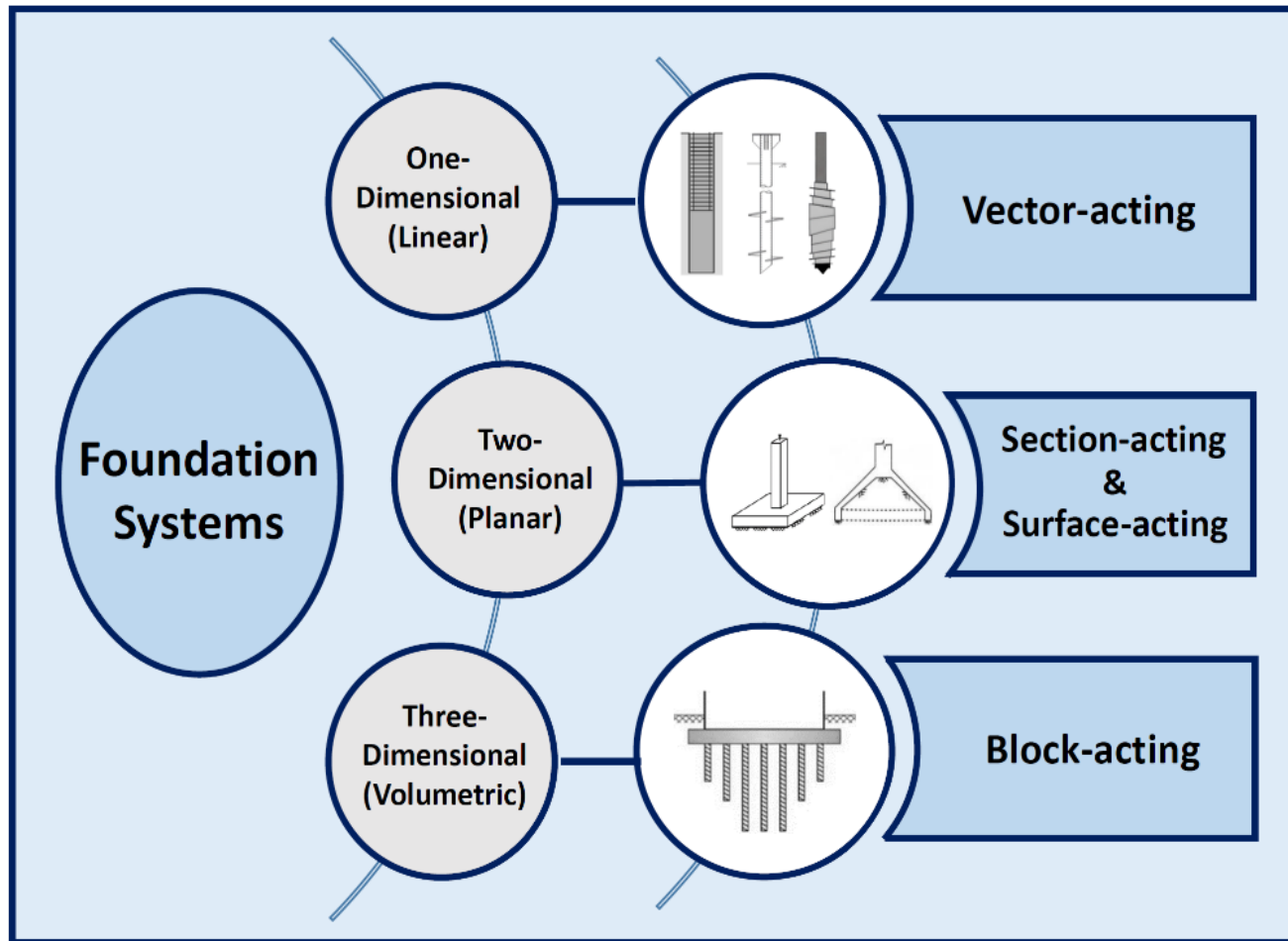


(c)

Typical categories of foundations based on form and prevalent applied loads a) one dimensional, b) two dimensional, c) three dimensional (Ebrahimipour & Eslami, 2024)

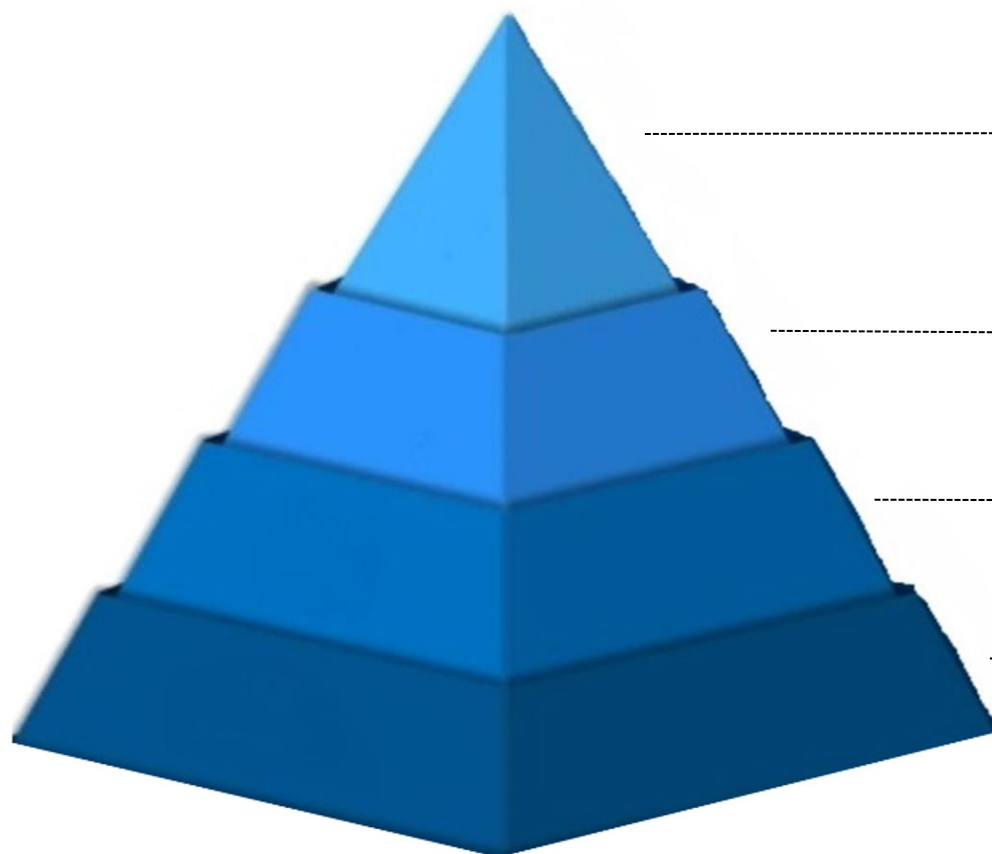
نگرش نوین؛ فرم هندسی و انتقال بار

رده‌بندی پی‌ها



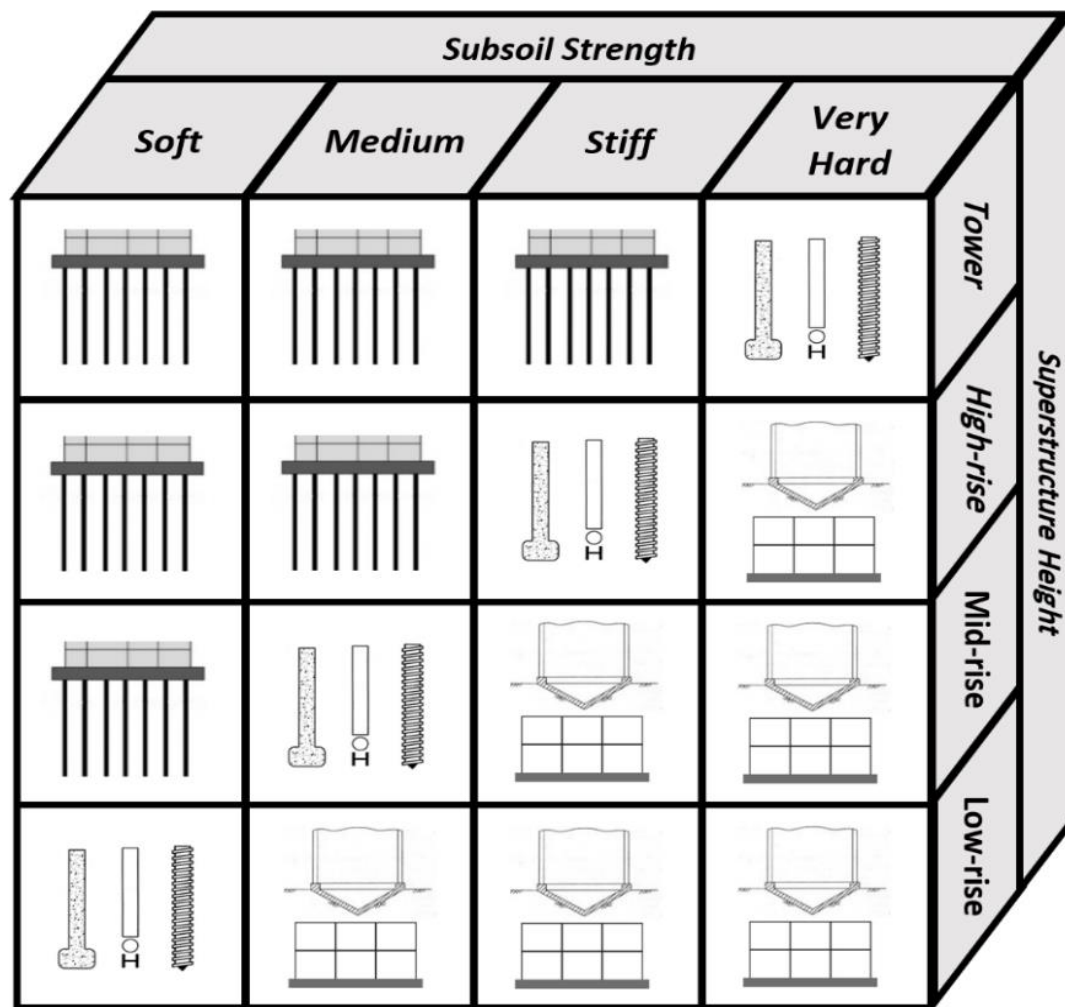
(Ebrahimipour & Eslami, 2024)

فراوانی کاربرد پی ها



Surface-acting Foundations (2D)	
Block-acting (Hybrid) Foundations (3D)	
Vector-acting Foundations (1D)	
Section-acting Foundations (2D)	

انتخاب سیستم پی بر مبنای قوام نهشته و ارتفاع ساختمان



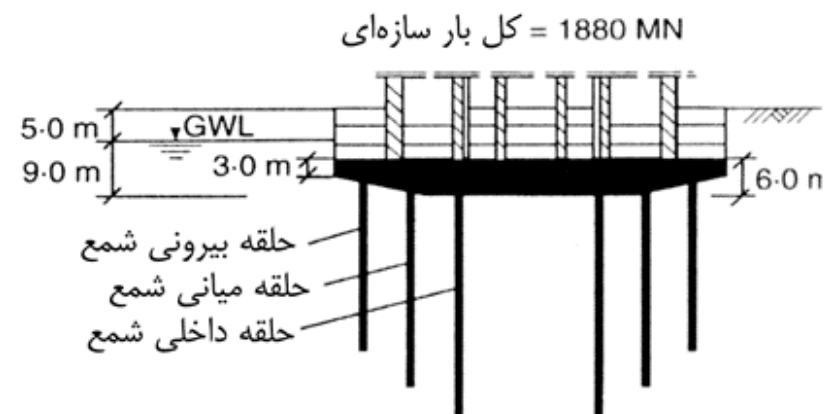
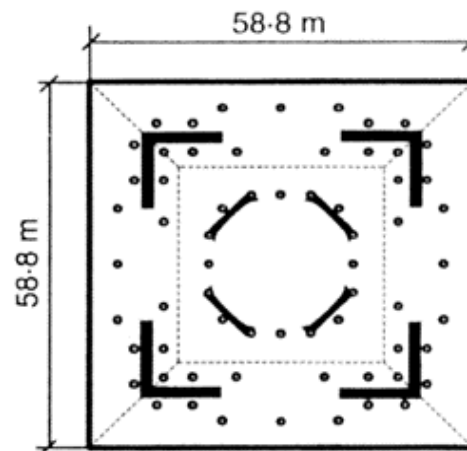
1D	 Vector-acting
2D	 Section-acting  Surface-acting
3D	 Block-acting

مورد عملی شماره ۲ – ساختمان Messeturm فرانکفورت – آلمان

سیستم پی رادیه – مرکب

Hemsley (2000)

- بلندترین ساختمان اروپا در دهه ۹۰ در شهر فرانکفورت به ارتفاع ۲۵۶/۵ متر
- برج ۶۰ طبقه دارای ۲ طبقه زیرزمین و با ابعاد ۴۱×۴۱ متر و وزن کل ۱۸۸۰ مگا نیوتن
- خاک محل شامل ۸ متر شن و ماسه و متعاقباً لایه رسی ۱۰۰ متر
- استفاده از پی عمیق، به تنهایی غیراقتصادی و دشوار
- معضلات ناپایداری $H/B > 4$



مورد عملی شماره ۲ – ساختمان Messeturm فرانکفورت – آلمان

Hemsley (2000)

سیستم پی رادیه – مرکب

- هدف اصلی، کاهش نشست‌ها و خصوصاً احتمال چرخش‌های اضافی رادیه بر لایه رسی غیرهموژن و انتقال بخشی از بار روسازه به اعماق سخت‌تر و پایین‌تر
- برآورد نشست پی گسترده بدون شمع، حدود ۴۰۰ mm
- تقلیل میزان نشست با انتخاب سیستم پی رادیه با شمع به ۱۵۰ میلیمتر
- پی گسترده مربعی به ضلع ۶۰ متر و در عمق ۱۴ متری زمین بر روی رس فرانکفورت و در تراز ۹ متر زیر سطح آب زیرزمینی اجرا شد که ضخامت آن از ۶ متر در مرکز به ۳ متر در کناره‌ها رسیده‌است.
- شمع‌های درجای بتنی به قطر ۱/۳ متر و در ۳ حلقه دایره‌ای زیر رادیه

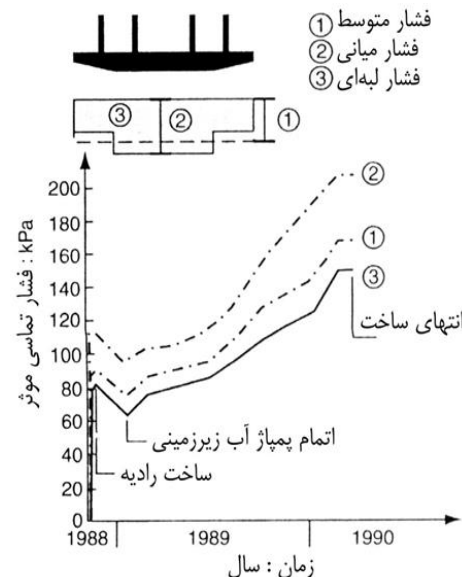
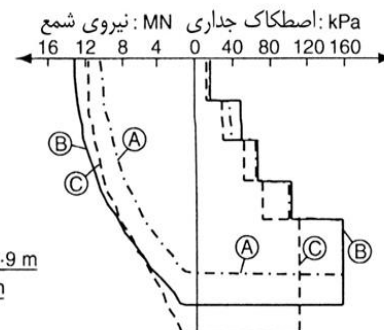
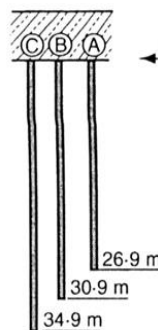
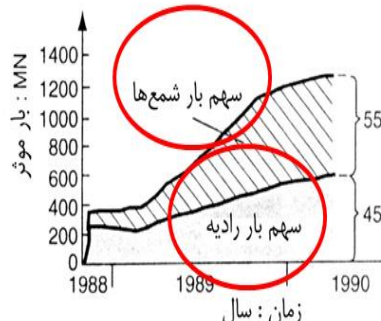
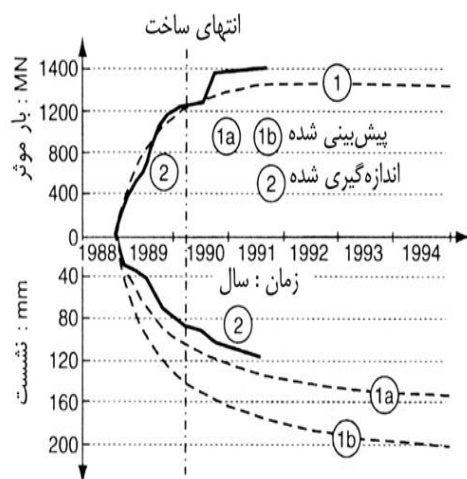
مورد عملی شماره ۲- ساختمان Messeturm فرانکفورت-آلمان

سیستم پی رادیه - مرکب

Hemsley (2000)

- طول شمع های حلقه بیرونی ۲۶/۹ متر (۲۸ شمع)، در حلقه میانی ۳۰/۹ متر (۲۰ شمع) و در حلقه میانی ۳۴/۹ متر (۱۶ شمع)
- به دلیل اجتناب از عملکرد گروه شمع فاصله بین شمع ها متغیر از ۳/۵B تا ۵B

رفتار اندازه گیری شده سیستم زیرسازه



مورد عملی شماره ۳ – ساختمان Al-Faisaliah ریاض – عربستان سعودی

سیستم پی رادیه

Hemsley (2000)

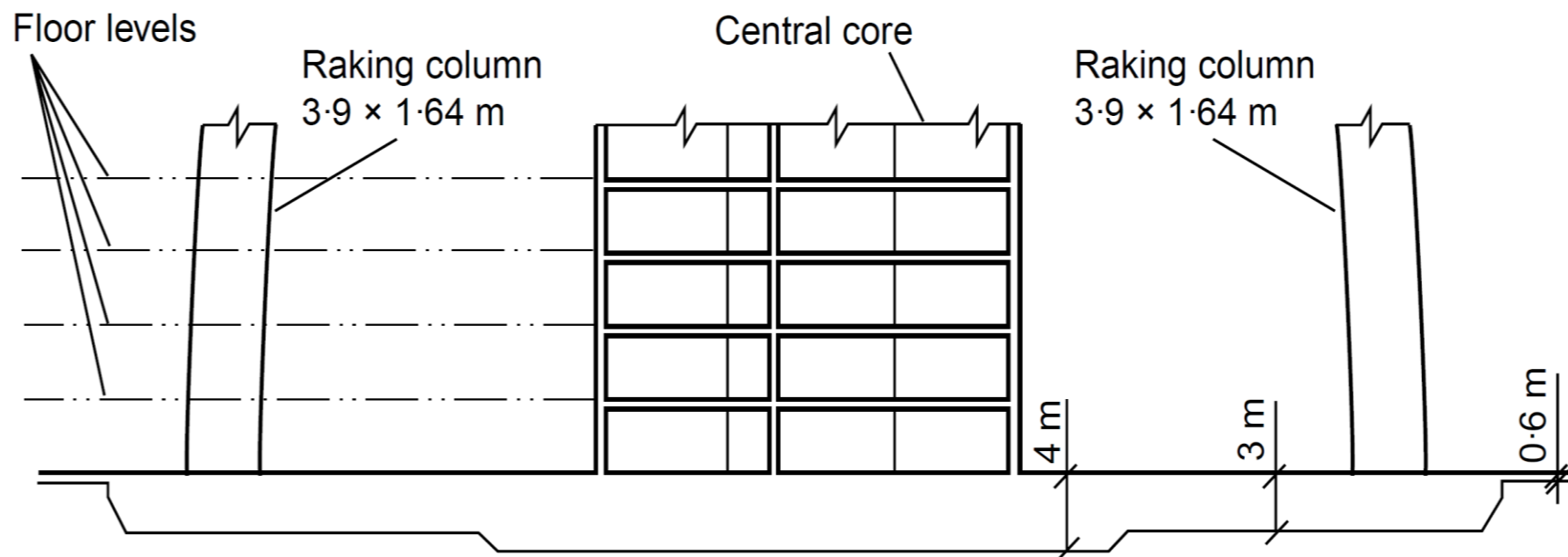


- تکمیل شده در سال ۲۰۰۰ میلادی
- برج ۴۴ طبقه تجاری و ارتفاع کل ۲۶۷ متر
- مساحت کل زیربنا برابر ۲۴۰ هزار مترمربع
- سیستم فونداسیون رادیه با ضخامت متغیر
- چالش اجرایی جهت بتن‌ریزی
- خاک سخت و ظرفیت ژئوتکنیکی بالا

مورد عملی شماره ۳ – ساختمان Al-Faisaliah ریاض – عربستان سعودی

سیستم پی رادیه

Hemsley (2000)

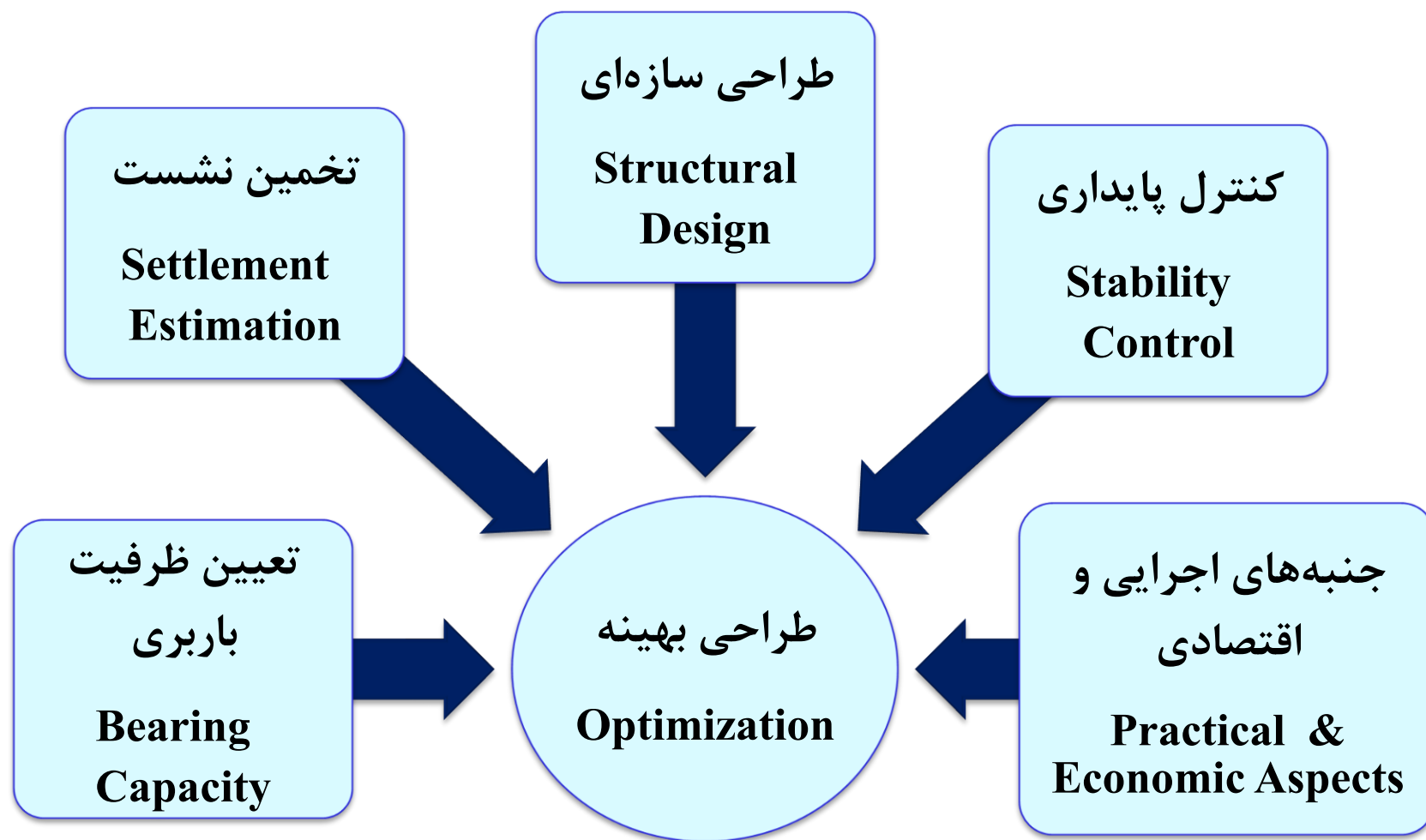


مقطع فونداسیون مجتمع ساختمانی Al Faisaliah (Hemsley, 2000)

۳. طراحی ژئوتکنیکی و سازه‌ای

3. Geotechnical & Structural Design

ملاحظات عمده تحلیل و طراحی فونداسیون



ملاحظات عمده تحلیل و طراحی فونداسیون

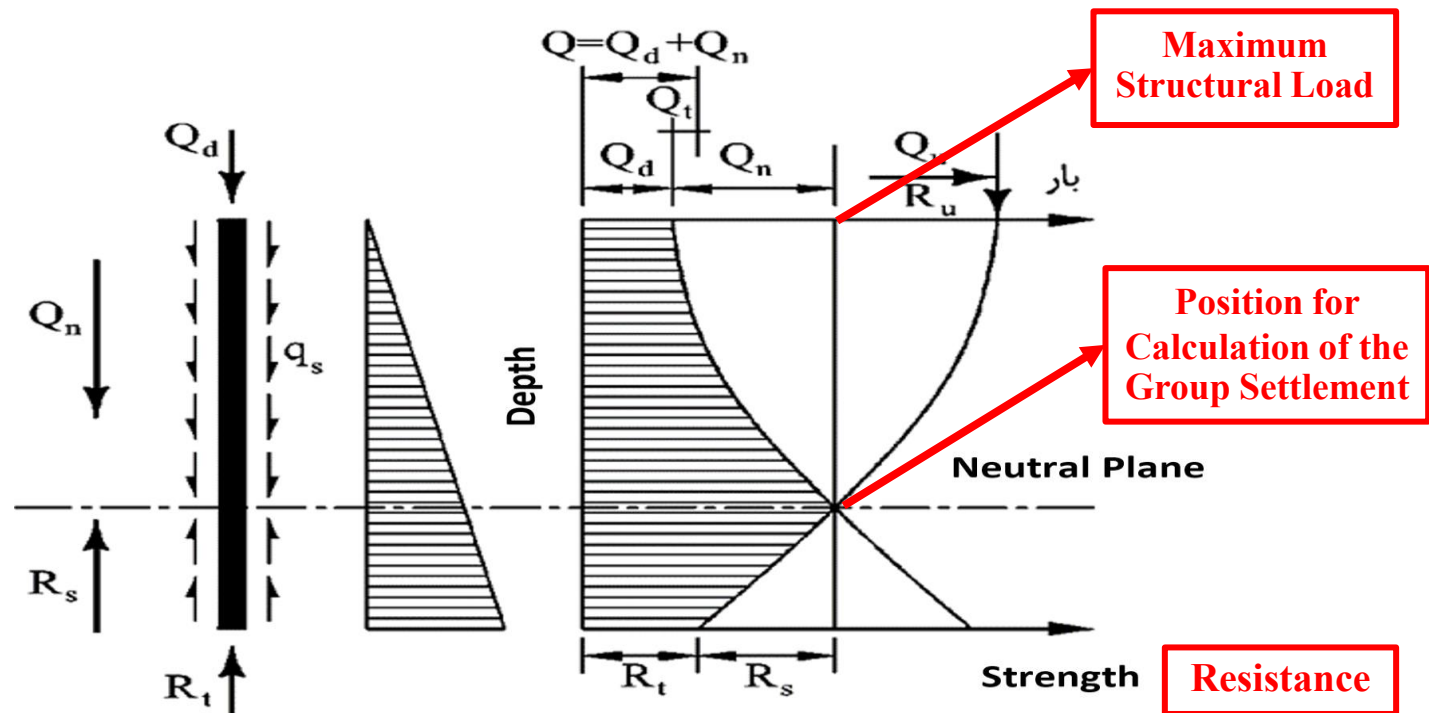
Following issues are realized in efficient foundation engineering practice including **technical**, **practical** and **economical** aspects; mainly focusing on **performance-based design**:

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

ملاحظات عمده تحلیل و طراحی فونداسیون

Fellenius (2015):

تحلیل و طراحی پی ها یک فرایند تکرارشونده می باشد که در آن، مقدار بارهای وارده، نشست متناظر و هندسی پی به صورت اندرکنشی می باشند و تحت تاثیر ظرفیت ژئوتکنیکی، سازه ای و الزامات سرویس دهی (نشست و چرخش) می باشند.



عوامل موثر در طراحی ژئوتکنیکی

- شرایط خاک: پارامترهای مقاومتی و سختی

- نوع خاک

- شرایط تراکم

- هندسه پی: عمق استقرار

- طول

- عرض

- ضخامت

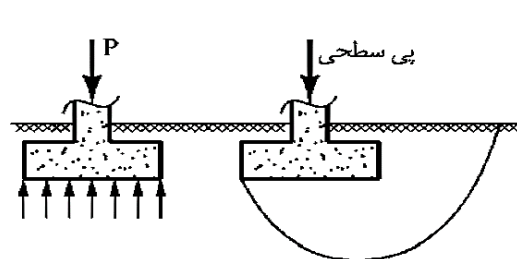
- شرایط محیطی: محصورشدگی

- آب زیرزمینی

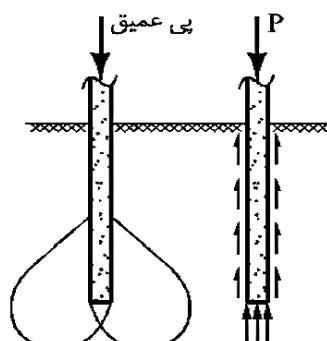
- بارگذاری

- هندسه زمین

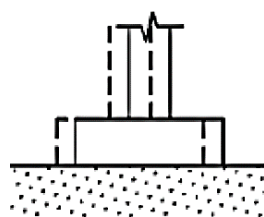
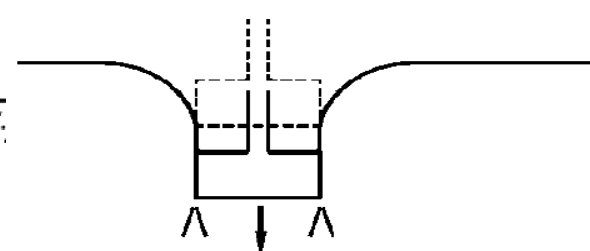
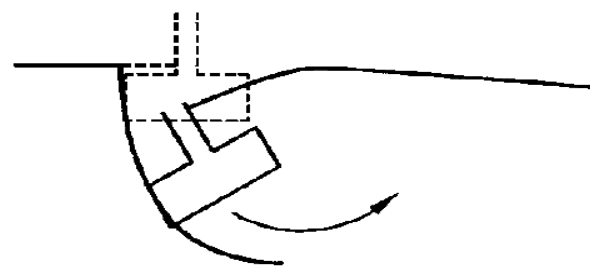
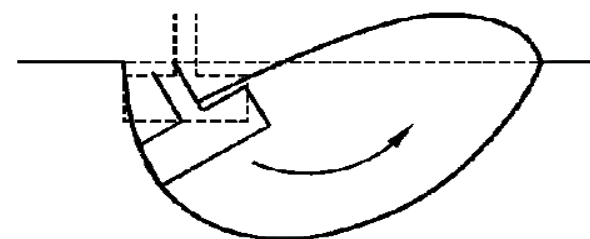
مکانیزم‌های گسیختگی



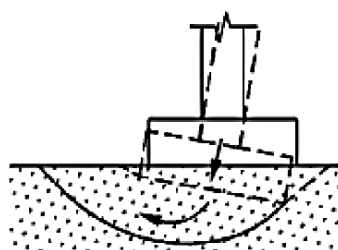
گسیختگی برش کلی



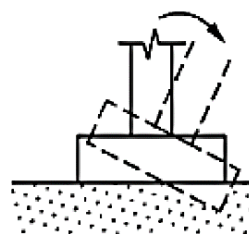
گسیختگی برش پانچ یا موضعی



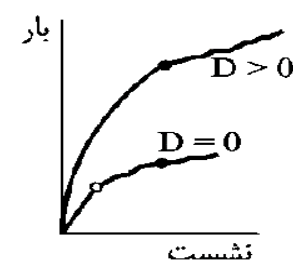
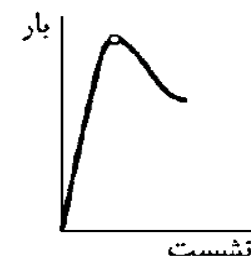
گسیختگی لغزش



گسیختگی برش کلی



واژگونی



رابطه پایه ظرفیت باربری پی‌های سطحی

Terzaghi (1943)

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

C = cohesion parameter

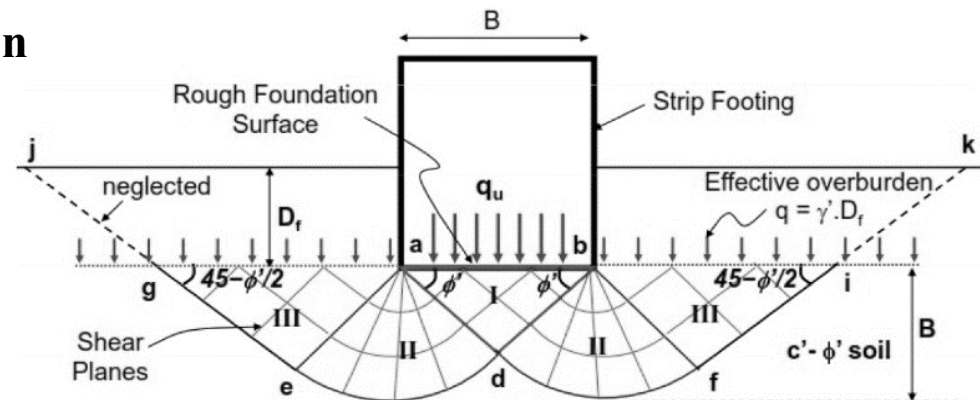
$\bar{q}$ = surcharge around the foundation equals to γD_f

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

B = foundation width

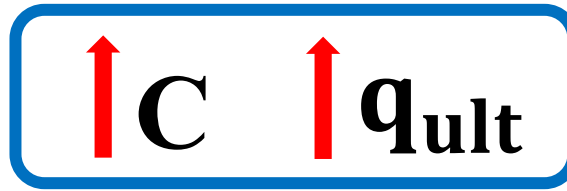
D_f = embedment depth of the foundation

N_c, N_q, N_γ = non-dimensional factors

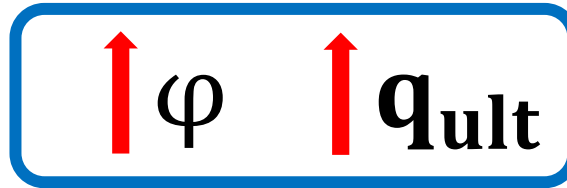


فاکتورهای مهم در ظرفیت باربری

پارامترهای مقاومت برشی خاک اطراف و زیر پی



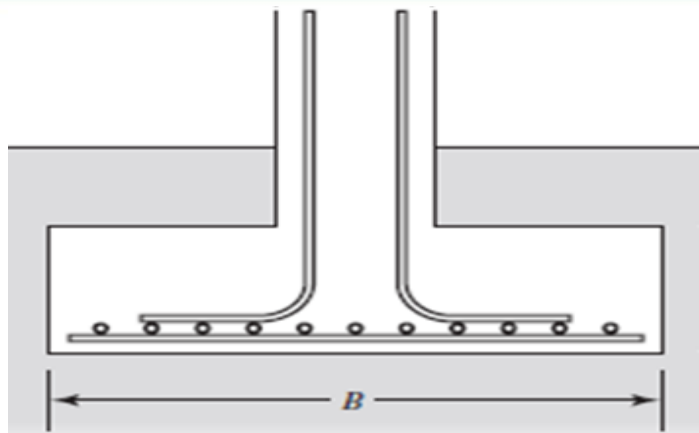
- چسبندگی (C)
- زاویه اصطکاک داخلی (φ)



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

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

فاکتورهای مهم در ظرفیت باربری



↑ B ↑ q_{ult}

- هندسه پی
بعد پی (B)

- بارگذاری :

وجود بارهای ترکیبی شامل نیروی محوری و لنگر بارهای مایل

↓ q_{ult} اعمال ضرایب کمتر از واحد

انواع تنش در ظرفیت باربری

$$q = \frac{P + W_F}{A} - u_D$$

فشار تماسی یا لهیدگی

P بار قائم روی پی

W_F وزن پی و خاک روی آن

A سطح کف پی

u_D فشار آب در کف پی (در عمق D از سطح زمین)

روابط پایه در طراحی پی

- ظرفیت باربری ← q_{ult}

• شرایط خاک

• هندسه پی

• شرایط پیرامونی و بارگذاری

$$q_{safe} = \frac{q_{ultimate}}{FS}$$

ظرفیت باربری ایمن

ملاحظات جابجایی: ظرفیت باربری مجاز q_{allowable}

$$q < q_{allowable}$$

استفاده از مقادیر توصیه‌شده در آیین‌نامه‌ها و کدها

نوع سنگ یا خاک	q_a (kg /cm ²)
الف - سنگها :	
- سنگهای آذرین سخت و بدون هوازدگی	۱۰۰
- ماسه سنگ و آهک سنگهای سخت	۴۰
- شیستها	۳۰
- شیل‌های سخت و سنگهای نرم	۲۰
- شیل‌های نرم	۱۰ - ۶
- سنگهای آهکی نرم	۶
ب - خاکهای غیرچسبنده :	
- شن متراکم یا شن و ماسه متراکم	بزرگتر از ۶
- شن و ماسه با تراکم متوسط	۶ - ۴
- شن و ماسه شل	کوچکتر از ۲
- ماسه متراکم	بزرگتر از ۳
- ماسه با تراکم متوسط	۳ - ۱
- ماسه شل $N < ۱۰$	کوچکتر از ۱
ج - خاکهای چسبنده : (در مقابل نشستهای تک‌محیی حساسند)	
- رس‌های خیلی سفت و سخت	۶ - ۳
- رس‌های سفت	۳ - ۱/۵
- رس‌های متوسط	۱/۵ - ۰/۷۵
- رس‌های نرم	کوچکتر از ۰/۷۵
- رس‌های خیلی نرم	قابل استفاده
- خاکی آلی	غیر قابل اعتماد
- خاک دستی	باید اندازه‌گیری شود

ظرفیت باربری پی‌های عمیق

متدهای متداول جهت تعیین توان باربری شمع‌ها

۱- آنالیز استاتیکی

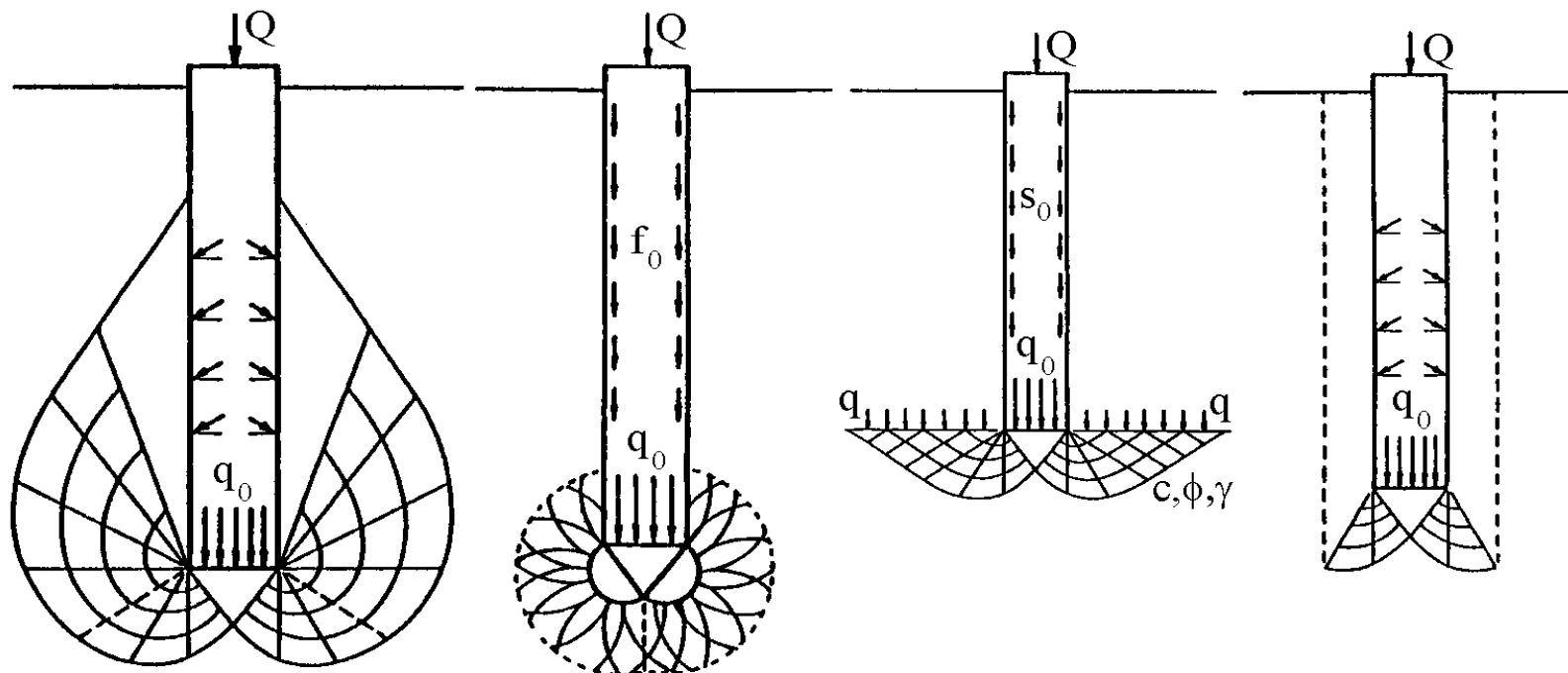
۲- تحلیل استاتیکی با استفاده از نتایج تست‌های درجا

۳- آزمایش بارگذاری استاتیکی

۴- تحلیل دینامیکی و تست‌های دینامیکی

۵- مدل‌های رفتاری و تحلیل‌های عددی

ظرفیت باربری شمع ها



De Beer (1945)
Jaky (1948)
Meyerhof (1951)

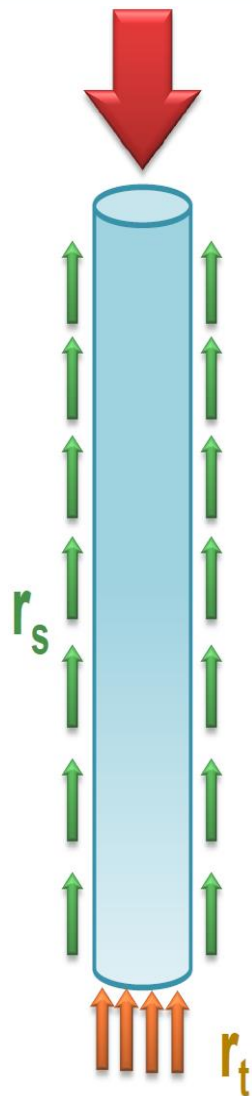
Berezantsev and
Yaroshenko (1962)
Vesic (1963)

Prandtl (1921)
Reissner (1924)
Caquot (1934)
Buisman (1935)
Terzaghi (1943)

Bishop, Hill,
and Mott (1945)
Skempton, Yassin,
and Gibson (1953)

الگوهای متفاوت گسیختگی توسط مؤلفین مختلف

ظرفیت باربری پی های 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

ظرفیت باربری پی های عمیق بر اساس SPT

$$r_{t/s} = n \cdot N$$

مقاومت خاک

نوع خاک
جنس شمع
نحوه اجرا

- استفاده از ضرایب اصلاحی وابسته به جنس شمع، قطر شمع و یا نسبت L_b/B در برخی روش ها
- محدوده میانگین گیری از N_{SPT} جهت محاسبه مقاومت نوک شمع در روش های مختلف، متغیر است.

$$Q_{ult} = r_t \cdot A_t + r_s \cdot A_s$$

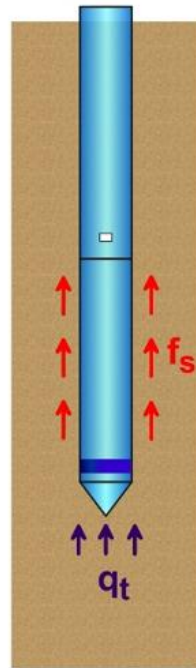
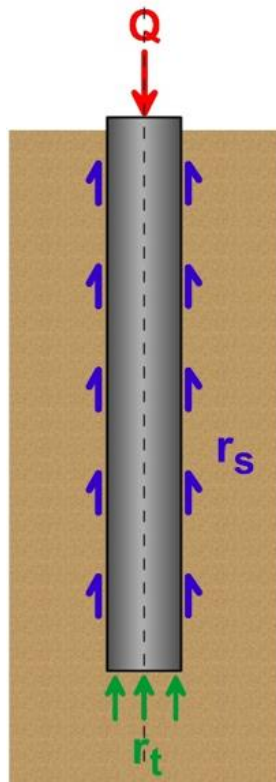
هندسه شمع

- r : مقاومت واحد نوک یا جدار
- n : ضریب تعیین مقاومت واحد نوک یا جدار
- N : میانگین اعداد نفوذ در محدوده نوک یا جدار شمع

ظرفیت باربری پی‌های عمیق بر اساس SPT

نوع خاک	نوع شمع	A $r_t = AN$ MPa	B $r_s = BN$ KPa	مراجع
ریزدانه	ریختنی	۰,۱۵ ۰,۱۵	۵ ۳,۳	Shioi and Fukui, ۱۹۸۲ Decourt, ۱۹۸۲
	کوبیدنی	رس ۰,۱۲ لای ۰,۲ ماسه ۰,۲۵ ماسه ۰,۱-۰,۳	مخلوط درشت و ریز ۳,۳ " ۱۰	Decourt, ۱۹۸۲ " " Shiori and Fukui, ۱۹۸۲
		۰,۱-۰,۱۵ $r_t < 3MPa$ ۰,۱۵ $r_t \leq 7.5MPa$ ۰,۱۲	۵ $r_s \leq 150KPa$ ۳,۳ $r_s \leq 170 KPa$ ۱	Shiori and Fukui, ۱۹۸۲ Yamashita et al, ۱۹۸۷ Decourt, ۱۹۸۲ Meyerhof
		۰,۴۵ ۰,۴ ۰,۳	۲ ۳,۳ ۱۰	Meyerhof, ۱۹۵۶, ۱۹۷۶ Decourt, ۱۹۸۲ Shiori and Fukui
		۰,۳۸۵	۳,۶۵	اسلامی و همکاران, ۱۳۸۳

ظرفیت باربری پی های عمیق بر اساس CPT & CPTu



$$\left. \begin{array}{l} r_s \leftarrow q_c, f_s \\ r_t \leftarrow q_c \end{array} \right\} \text{روش های مستقیم}$$

$$\left. \begin{array}{l} r_t, C, \phi \leftarrow q_c, f_s \end{array} \right\} \text{روش های غیرمستقیم}$$

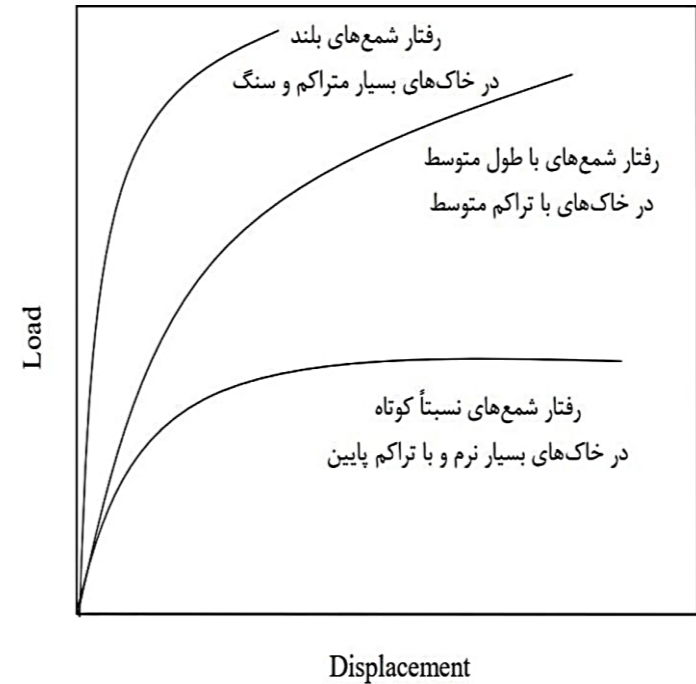
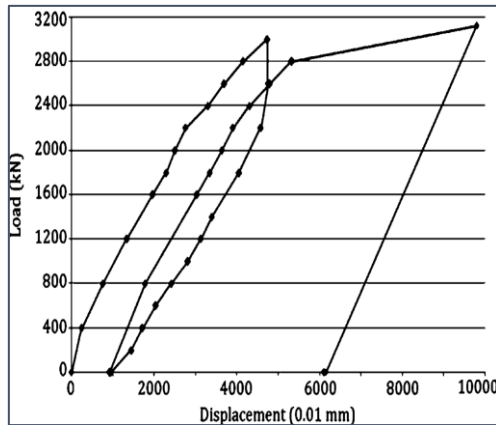
similarities between the cone penetrometer and piles

Penetrometer can be realized as a model pile.

ظرفیت باربری پی‌های عمیق بر اساس CPT & CPTu

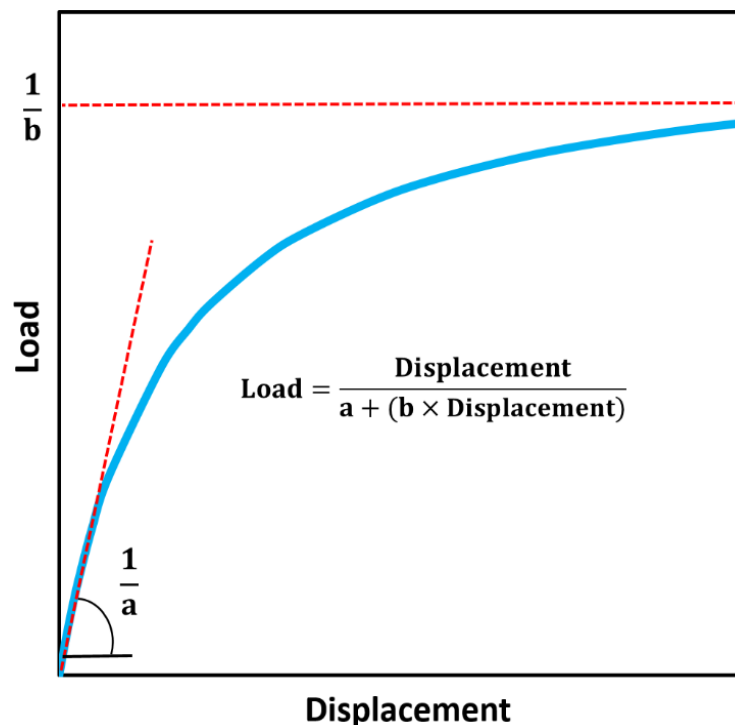
No.	Method	No.	Method
1	Begemann (1963, 1965, 1969)	14	TCD-03 (Gavin and Lehane, 2003)
2	Meyerhof (1956, 1976, 1983)	15	Fugro-05 (Kolk et al., 2005)
3	Aoki and Velloso (1975)	16	UCD-05 (Gavin and Lehane, 2005)
4	Nottingham (1975), Schmertmann (1978)	17	ICP-05 (Jardine et al., 2005)
5	Penpile (Clisby et al.1978)	18	UWA-05 (Lehane et al., 2005)
6	Dutch (de Ruitter & Beringen, 1979)	19	NGI-05 (Clausen et al., 2005)
7	Philipponnat (1980)	20	Cambridge-05 (White & Bolton, 2005)
8	LCPC (Bustamante & Ganeselli, 1982)	21	German (Kempfert and Becker, 2010)
9	Cone-m (Tumay & Fakhroo, 1982)	22	UCD-11 (Igoe et al. 2010, 2011)
10	Price and Wardle (1982)	23	V-K (Van Dijk and Kolk 2011)
11	Gwizdala (1984)	24	SEU (Cai et al. 2011, 2012)
12	Unicone (Eslami & Fellenius, 1997)	25	HKU (Yu and Yang, 2012)
13	KTRI (Takesue et al., 1998)	26	UWA-13 (Lehane et al., 2013)
		27	Enhanced UniCone (Niazi and Mayne, 2016)

عوامل موثر بر رفتار بار-جابجایی پی‌های عمیق

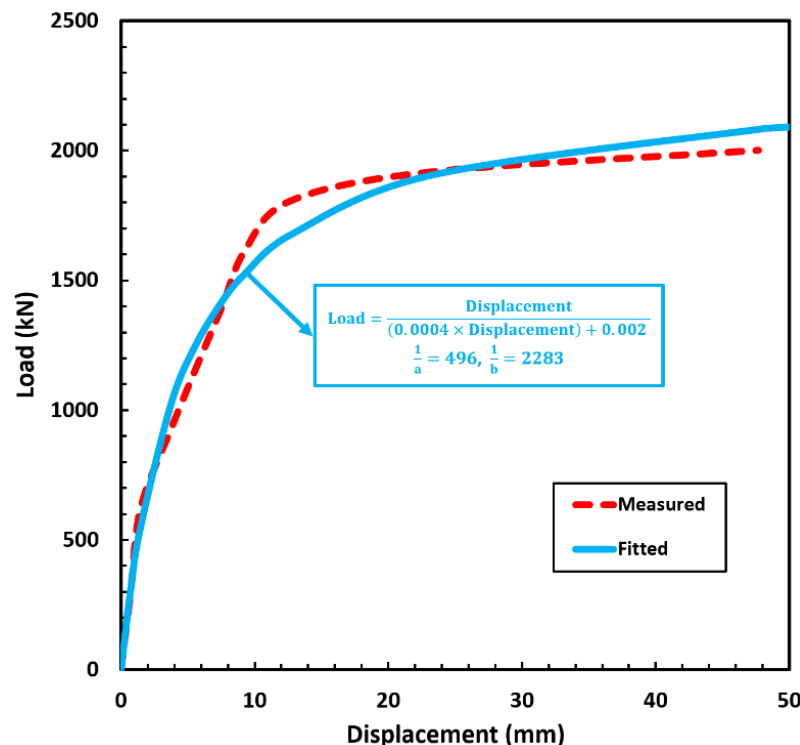


Effect of Pile depth and Soil density (Look, 2007)

تابع ریاضی هایپر بولیک جهت تعیین بار حدی



(a)

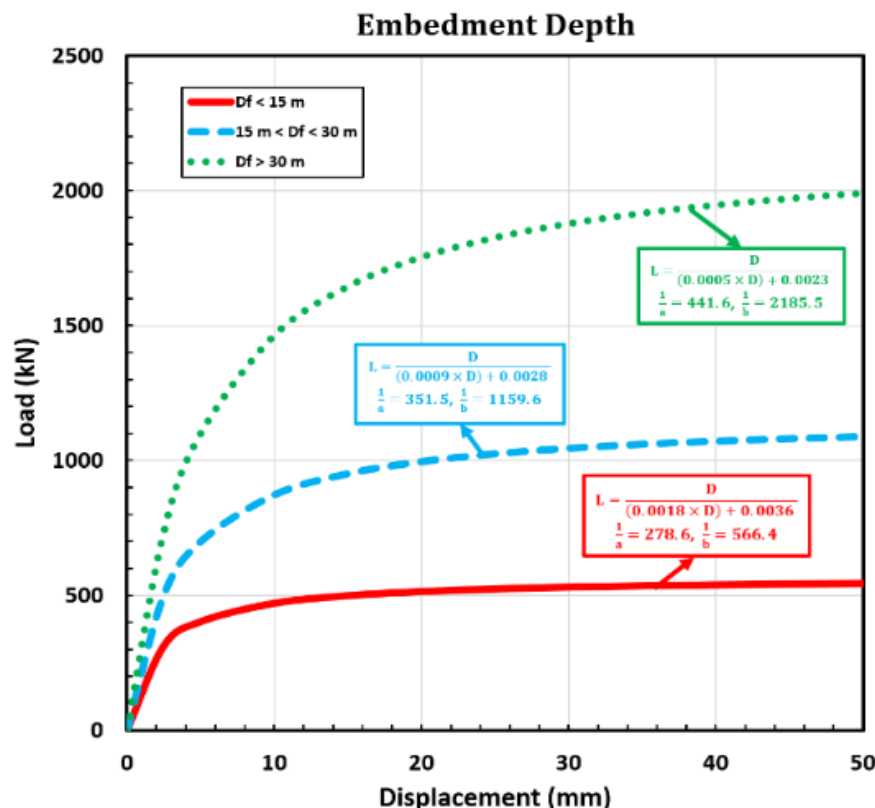


(b)

Hyperbolic function and relevant parameters: a) illustrative concept, b) typical case (Eslami & Ebrahimipour, 2024)

عوامل موثر بر رفتار بار-جابجایی پی‌های عمیق (Eslami & Ebrahimipour, 2024)

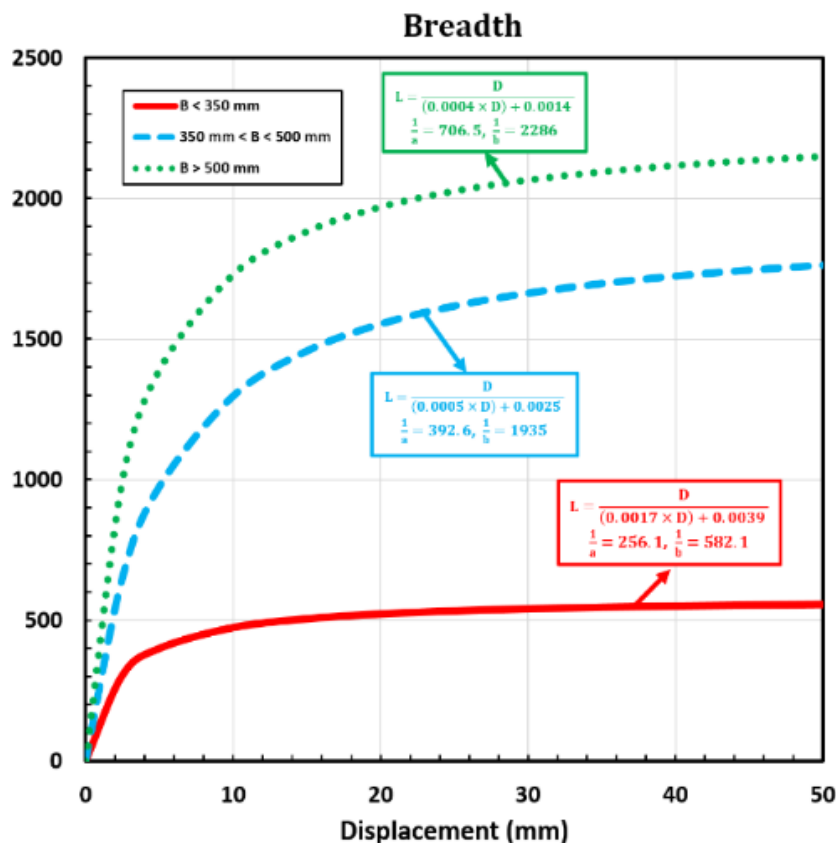
FELADD: Foundation Engineering Load And Displacement Database



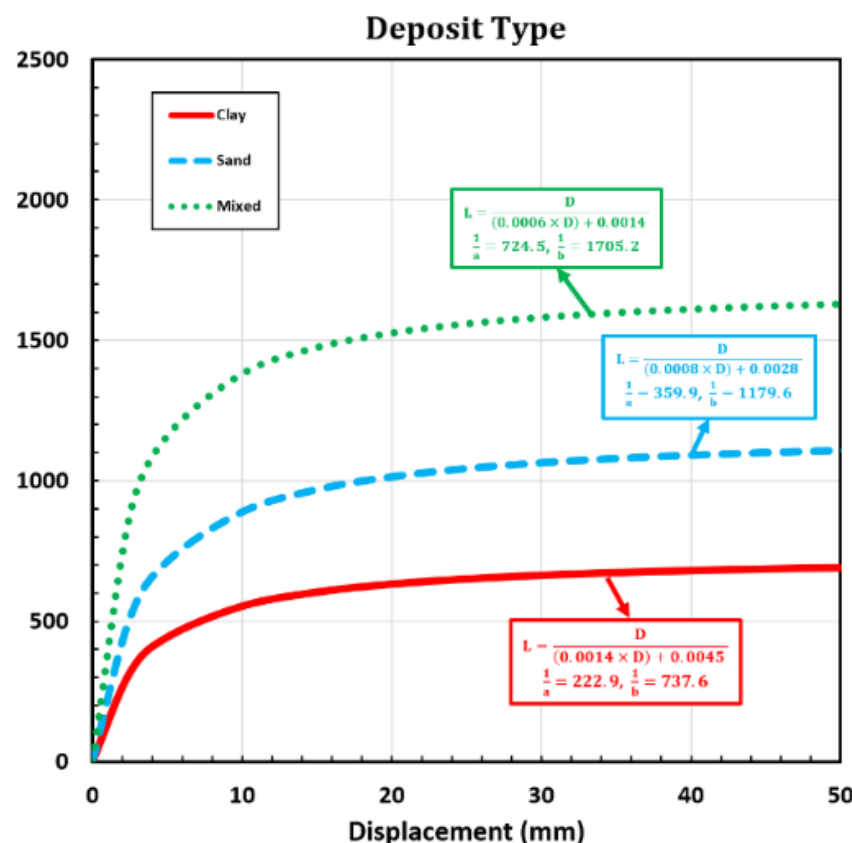
Effect of pile embedment depth

- بانک داده بزرگ مشتمل بر ۱۲ رده پی
- داده‌های بار-جابجایی + آزمایش‌های درجا
- بانک داده شامل ۷۱ مورد شمع کوبیدنی
- اجراشده در رس، ماسه و خاک‌های مخلوط
- عمق مدفون بین ۶ تا ۵۶ متر
- بعد ۲۳۵ تا ۹۱۴ میلیمتر
- شمع فولادی و بتنی
- مقاطع دایره، مربع، لوله‌ای و H

عوامل موثر بر رفتار بار-جابجایی پی‌های عمیق (Eslami & Ebrahimipour, 2024)



Effect of pile breadth



Effect of deposit type

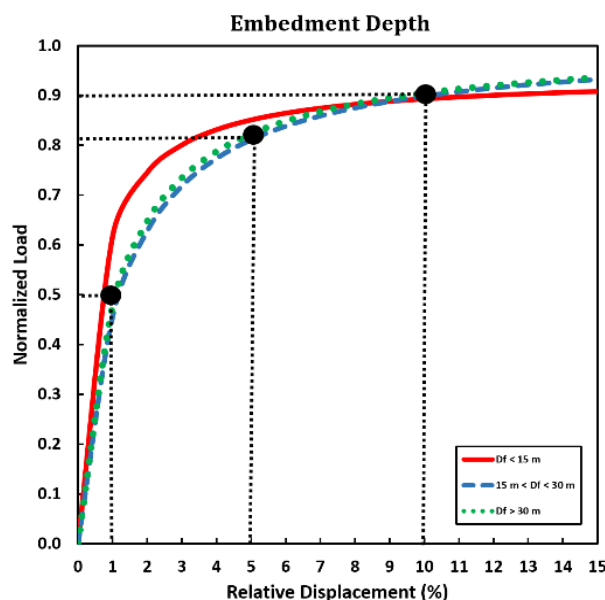
عوامل موثر بر رفتار بار-جابجایی پی‌های عمیق (Eslami & Ebrahimipour, 2024)

Normalization Approach:

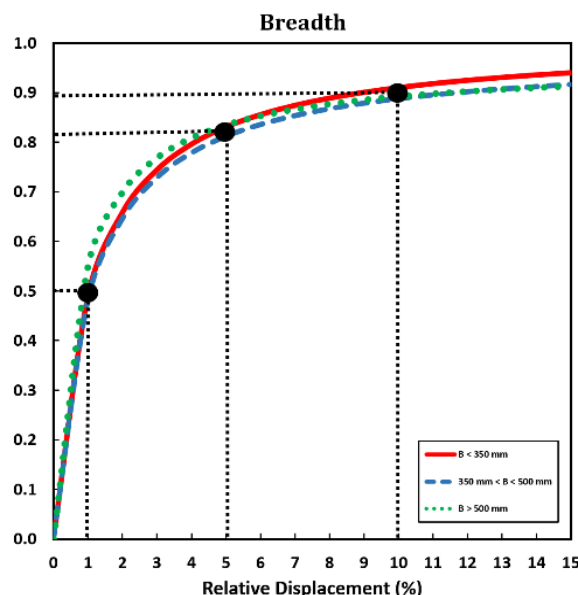
- Load: Brinch-Hansen 80% (1963)
- Displacement: Breadth

Relative Displacement & Normalized Load:

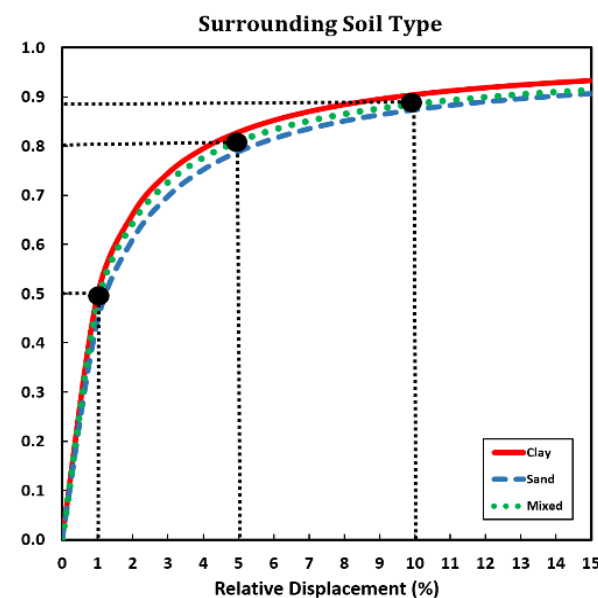
- 1 % $\rightarrow$ 0.5 Pu (FS=2)
- 5 % $\rightarrow$ 0.8 Pu
- 10 % $\rightarrow$ 0.9 Pu



(a)



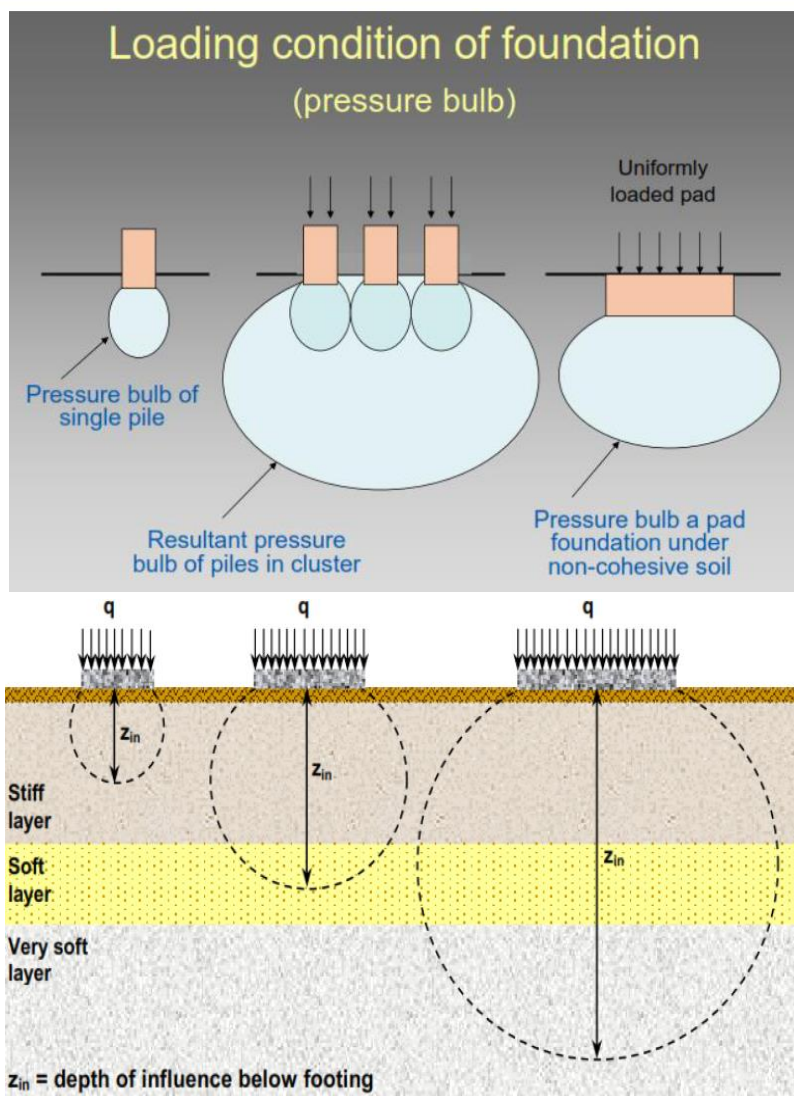
(b)



(c)

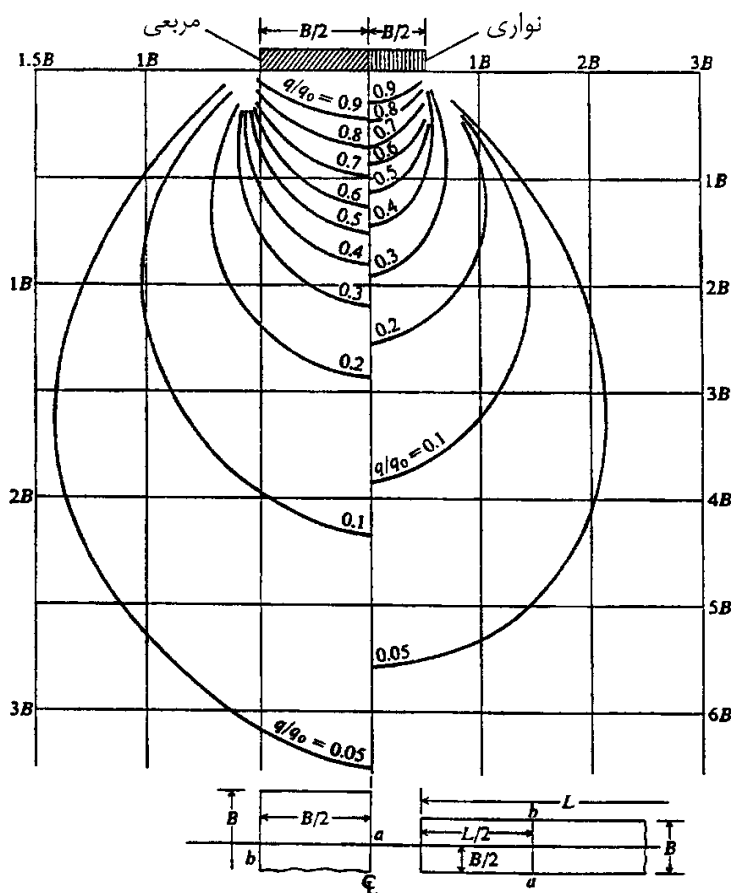
Normalized hyperbolic trending of load-displacement for dominant factors: a) embedment depth, b) breadth, c) surrounding soil type (Eslami & Ebrahimipour, 2024)

نشست پی های سطحی



- بارگذاری
- باربرداری
- آب زیرزمینی
- فرونشست منطقه
- تحکیم لایه ها
- تنش های القایی
- بار دینامیکی
- شرایط اندرکنشی با سازه های مجاور
- مشخصات و سختی خاک
- مشخصات پی

پارامترهای موثر در نشست آنی و تحکیمی



• عرض پی (B) ↑

• پارامتر سختی و مشخصات تراکم پذیری (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

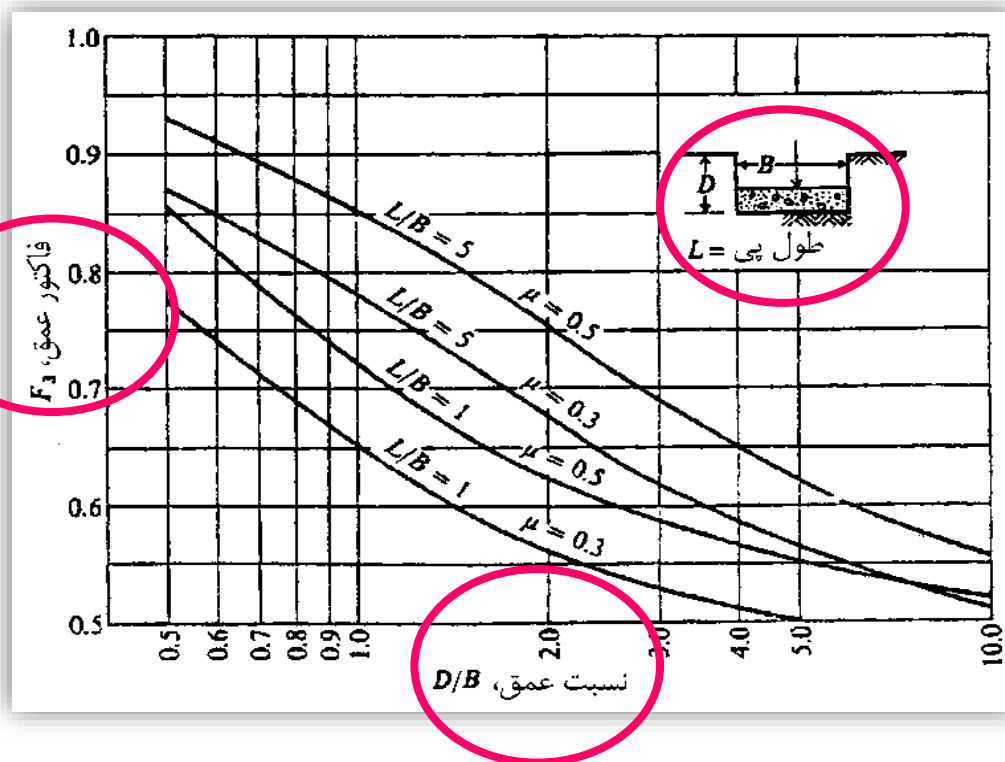
نقاط هم تنش در عمق و در زیر پی های
مربعی و نواری بر اساس روابط
بوسینسک

نشست آنی

ملاحظه فاکتورها: عمق استقرار، محدودیت عمق لایه نشست پذیر، عمق گستره تنش، میانگین گیری منطقی مقدار سختی خاک زیر پی، اصطکاک جداری پی

$$S_i = \frac{qB(1-\nu^2)}{E_s} I_o \cdot I_F$$

$$I_o = I_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu} I_2$$



ضریب تصحیح برای عمق استقرار پی

نشست تحکیمی

$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e_o} \log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_o}$$

$$Cc \cong 0.009 (LL - 10)$$

$$C_c = 0.4 (e_o - 0.25)$$

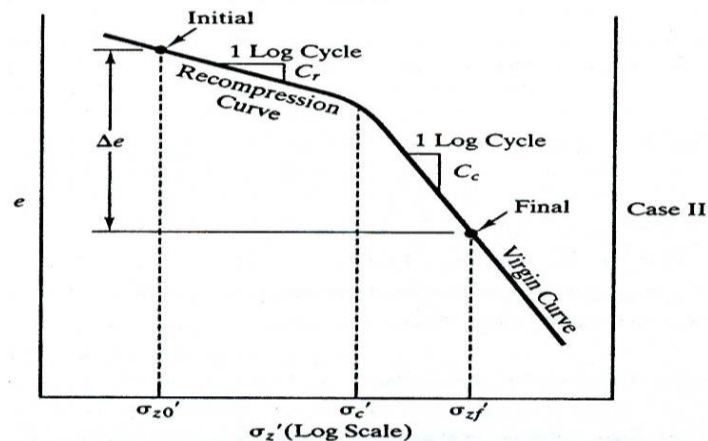
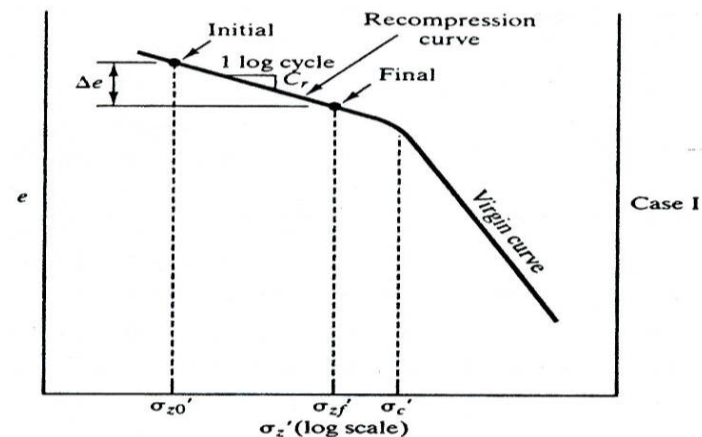
$$C_c = 0.01 (\omega - 5)$$

$$C_c = 0.002 G_s$$

$$\sigma'_o \langle \sigma'_c \langle \sigma'_1 \rightarrow S_c = \frac{C_r}{1 + e_o} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} + \frac{C_c H}{1 + e_o} \log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_c}$$

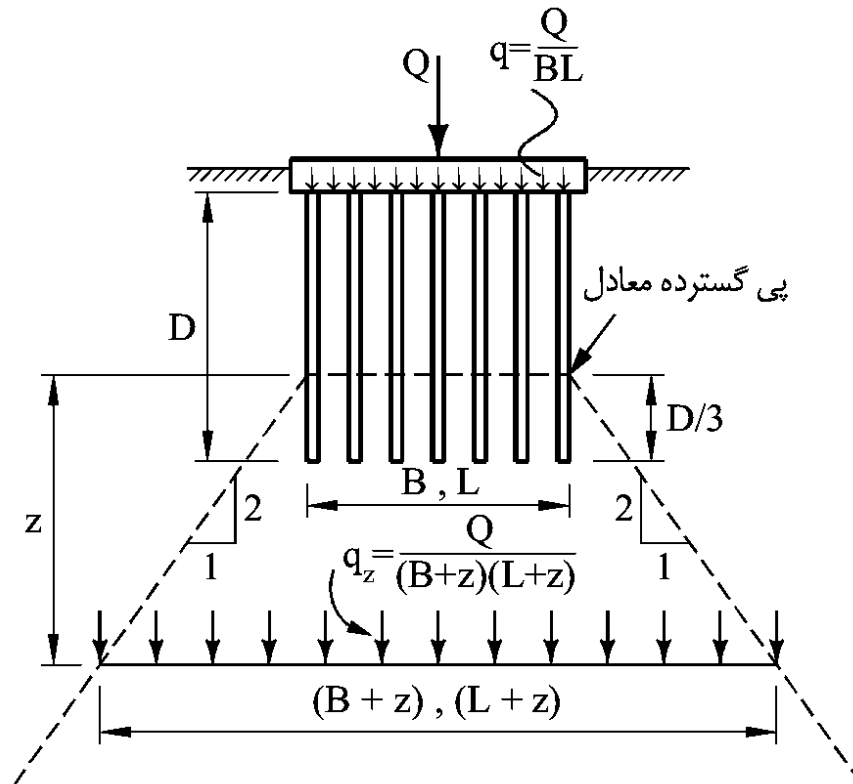
$$C_r \cong \left(\frac{1}{10} - \frac{1}{5} \right) C_c$$

$$S_c = \Delta H = H \cdot m_v \cdot \Delta \sigma'$$



نمونه هایی از منحنی تحکیم با شرایط مختلف تنش های موثر اولیه، پیش تحکیمی، اضافه تنش حاصله از بارگذاری

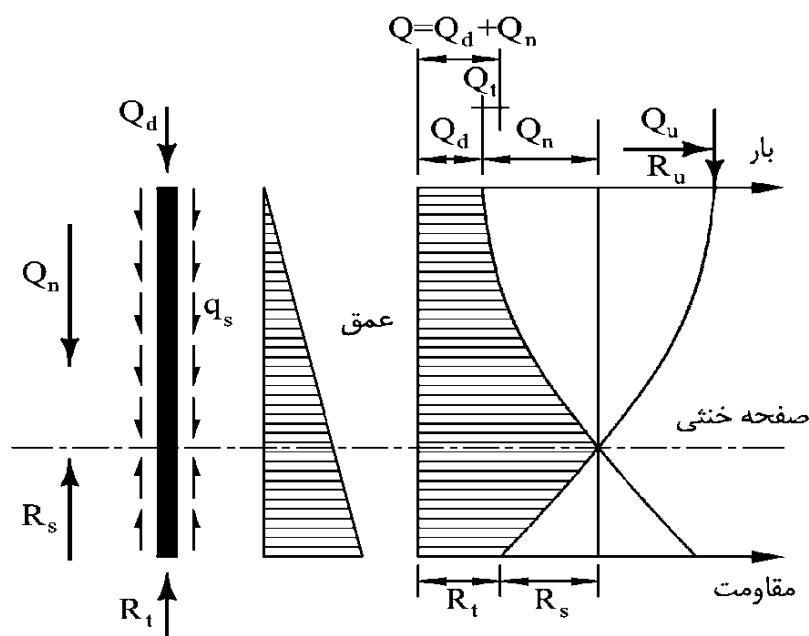
تئوری صفحه خنثی: نشست شمع و گروه شمع



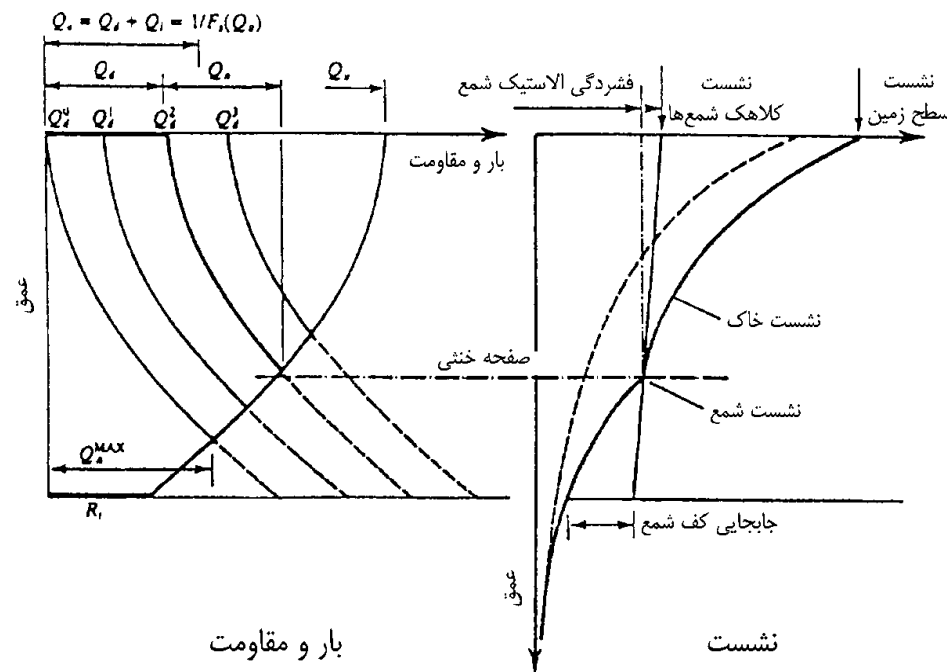
مدل ساده ارائه شده توسط ترزاقی و پک
جهت تعیین نشست گروه شمع

در هر شمع بارهای مرده وارد شده به سر شمع و اصطکاک منفی از یک سو و مقاومت اصطکاکی مثبت و مقاومت نوک از سوی دیگر در تعادل با یکدیگرند. محل تعادل این نیروها در طول شمع صفحه خنثی نامیده شده و عمقی از شمع است که تنش برشی جدار شمع از منفی به مثبت تغییر علامت می دهد. در این عمق تغییر مکان نسبی بین شمع و خاک برابر صفر است. این نکته بسیار حائز اهمیت است و در تحلیل نشست گروه شمع از آن استفاده می شود.

تئوری صفحه خنثی: نشست شمع و گروه شمع



اصطکاک منفی در اطراف شمع و چگونگی
تعیین صفحه خنثی (Fellenius, 1989)



ارزیابی نشست شمع و خاک اطراف آن و عوامل موثر
در عمق قرارگیری صفحه خنثی

اندرکنش و محاسبات مکرر جهت همگرایی نشست،
ظرفیت باربری و طراحی سازه های در طراحی پی

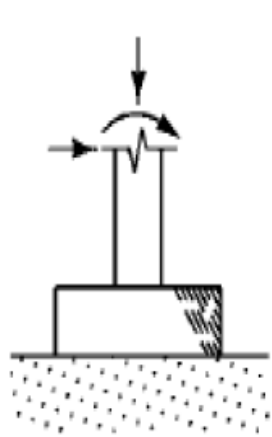
طراحی سازه‌ای

تعیین نیروهای داخلی

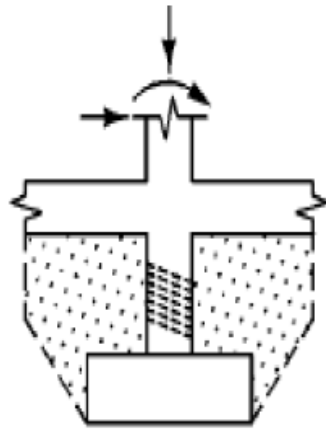
خرابی‌های خمشی، برشی و لهیدگی

عوامل موثر بر صلبیت و انعطاف پذیری

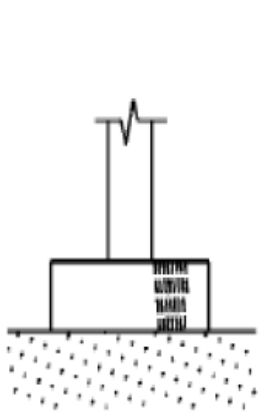
- مدول عکس العمل بستر
- اختلاف بار ستون‌ها
- مدول الاستیسیته خاک
- اثر روسازه
- ضخامت پی
- ممان اینرسی پی
- مدول الاستیسیته بتن



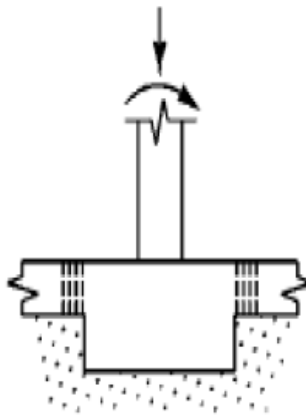
گسیختگی برشی در پی



گسیختگی برشی در پای ستون



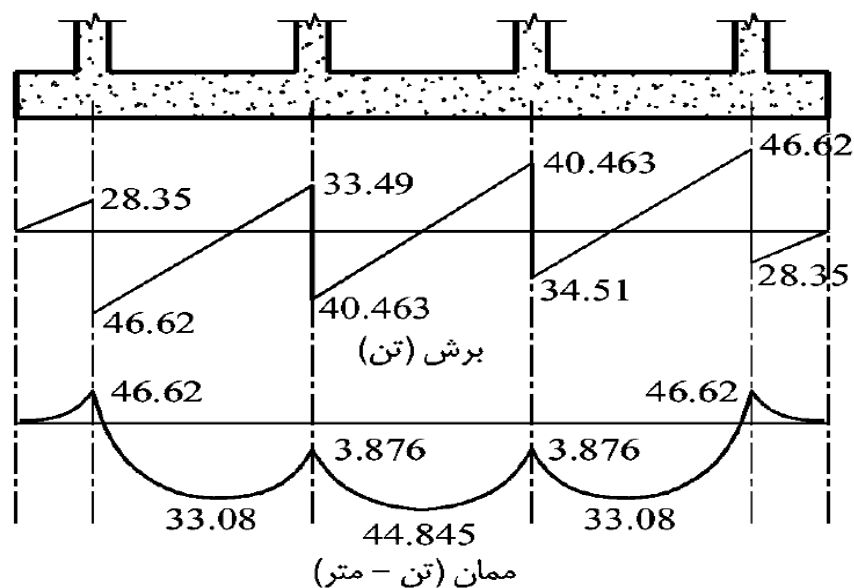
گسیختگی خمشی در پی



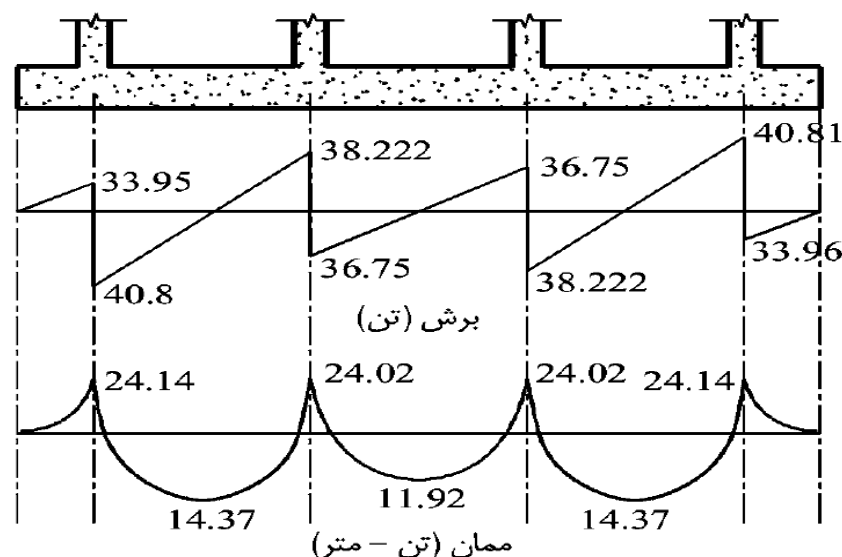
گسیختگی خمشی در تیرهای رابط پی

آنالیز پی نواری با فرض حالت های صلب و انعطاف پذیر

صلب



انعطاف پذیر



متد جدولی در تعیین ضخامت و آرماتور مورد نیاز (اسلامی، ۱۳۹۲)

جداول آماده شده برای طراحی پی‌ها را می‌توان برای طراحی پی‌های منفرد تحت اثر بار محوری به کار برد که برای سه حالت مختلف به شرح زیر تنظیم گردیده است:

جدول ۱-۵ برای	$f_y = 3000 \text{ kg / cm}^2$	$f'_c = 210 \text{ kg / cm}^2$
جدول ۲-۵ برای	$f_y = 3000 \text{ kg / cm}^2$	$f'_c = 250 \text{ kg / cm}^2$

برای هر کدام از حالت‌های فوق سه جدول داریم :

الف: جدول A مربوط به محاسبه $d_{\min}$ بر اساس برش دوطرفه

ب: جدول B مربوط به محاسبه $d_{\min}$ بر اساس برش یکطرفه

ج: جدول C مربوط به محاسبه میلگردهای خمشی، A_s

در جداول، حداقل عمق مؤثر بقرار 15cm، اعداد صفر مبین نیاز به میلگرد فشاری

$\rho > \rho_{\max}$ و مکانهای خالی بیانگر عمق مؤثر خیلی کوچک است. برای نمونه، مثال ۱-۵ را به

کمک جداول طراحی مجدداً حل می‌شود.

متد جدولی در تعیین ضخامت و آرماتور مورد نیاز (اسلامی، ۱۳۹۲)

جدول A-1-0: تعیین عمق مؤثر d_{min} بر اساس برش دو طرفه													
$f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ & $f_y=3000 \text{ kg/cm}^2$ A_F/A_C بتون پی به ستون													
$q_u(\text{kg/cm}^2)$	$d/b=0.5$	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
1	41.4	52.7	65	78.4	92.9	109	125	143	161	181	202	224	247
1.5	28.4	36	44.3	53.4	63.1	73.6	84.8	96.8	109	123	137	152	167

جدول B-1-0: تعیین عمق مؤثر d_{min} بر اساس برش یکطرفه													
$f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ & $f_y=3000 \text{ kg/cm}^2$													
$q_u(\text{kg/cm}^2)$	$a_b=20(\text{cm})$	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	15	15	15	15	15	15.9	18.6	21.3	23.9	26.6	29.2	31.9	34.5
1.5	15	15	15	15	18.7	22.4	26.2	29.9	33.6	37.4	41.1	44.8	48.6
2	15	15	15	18.8	23.5								
2.5	15	15	16.6	22.2	27.7								
3	15	15	18.9	25.2	31.5								
3.5	15	15	20.9	27.9	34.9								
4	15	15.2	22.8	30.4	38								
4.5	15	16.3	24.5	32.6	40.8								
5	15	17.3	26	34.7	43.4								
5.5	15	18.3	27.4	36.6	45.7								
6	15	19.2	28.7	38.3	47.9								
6.5	15	20	29.9	39.9	49.9								
7	15	20.7	31	41.4	51.7								
7.5	15	21.4	32.1	42.8	53.5								
8	15	22	33	44.1	55.1								
8.5	15	22.6	33.9	45.2	56.6								
9	15	23.2	34.8	46.4	58								
9.5	15	23.7	35.6	47.4	59.3								
10	15	24.2	36.3	48.4	60.9								
10.5	15	24.7	37	49.3	61.7								
11	15	25.1	37.7	50.2	62.8								
11.5	15	25.5	38.3	51	63.8								
12	15	25.9	38.9	51.8	64.8								
12.5	15	26.3	39.4	52.6	65.7								
13	15	26.6	39.9	53.3	66.6								
13.5	15	27	40.4	53.9	67.4								
14	15	27.3	40.9	54.6	68.2								
14.5	15	27.6	41.4	55.2	69								
15	15	27.9	41.8	55.7	69.7								

جدول C-1-0: تعیین مقادیر A_s بر حسب سائی متر مربع مورد نیاز برای عرض یک متر																		
$f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ & $f_y=3000 \text{ kg/cm}^2$																		
$q_u \cdot a_b^2(\text{ton})$	$d=15\text{cm}$	20	25	30	35	40	45	50	55cm	60	65	70	75	80	85			
5	6.4	4.7	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
6	7.7	5.7	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
7	9.1	6.7	5.3	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
8	10.5	7.7	6	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
9	11.9	8.6	6.8	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
10	13.3	9.7	7.6	6.3	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
12	16.3	11.7	9.2	7.6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
14	19.4	13.8	10.8	8.9	7.5	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
16	22.6	15.9	12.4	10.2	8.6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
18	26	18	14	11.5	9.8	8.5	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
20	29.6	20.2	15.6	12.8	10.9	9.4	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
30	0	32.1	24.2	19.6	16.5	14.3	12.6	11.3	11	12	13	14	15	16	17			
40		45.9	33.4	26.7	22.4	19.3	17	15.2	13.8	127	13	14	15	16	17			
50		0	43.4	34.1	28.4	24.4	21.4	19.1	17.3	15.8	14.5	14	15	16	17			
60		0	54.4	42	34.6	29.6	25.9	23.1	20.9	19	17.5	16.2	15.1	16	17			
70			0	50.3	41.1	35	30.5	27.2	24.5	22.3	20.5	18.9	17.6	16.5	17			
80			0	59.2	47.8	40.5	35.2	31.3	28.1	25.6	23.5	21.7	20.2	18.9	17.7			
90			0	68.8	54.8	46.5	40	35.4	31.9	29	26.6	24.5	22.8	21.3	20			
100			0	0	62.2	52	44.9	39.7	35.6	32.3	29.6	27.4	25.4	23.7	22.3			
120				0	78.2	64.2	55	48.4	43.3	39.2	35.8	33.1	30.7	28.6	26.9			
140				0	0	77.4	65.7	57.4	51.1	46.2	42.2	33.8	36	33.6	31.5			
160				0	91.8	76.9	66.7	59.2	53.4	48.6	44.7	41.4	38.6	36.2				
180				0	0	88.8	76.5	67.6	60.7	55.2	50.7	46.2	43.7	40.9				
200				0	102	86.7	76.2	68.3	61.9	56.8	52.5	48.8	45.6					
220				0	0	97.4	85.2	76	68.8	63	58.1	54	50.4					

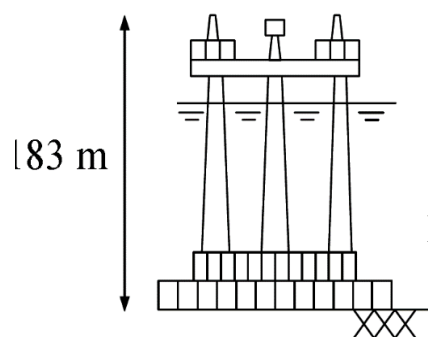
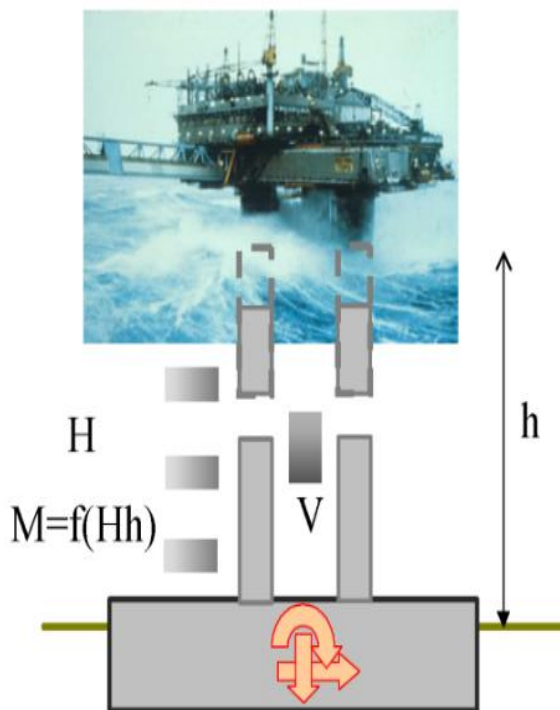
معضلات نا پایداری

ضعف پی های سطحی در مقابل بارهای جانبی، لنگر و برکنش

وزن سازه و فونداسیون (V) + نیروهای باد و امواج و جریان ها (M, H)

=

بار VMH فونداسیون



maximum storm loads

2006 MN V 1500 MN

495 MN H 29 MN

18850 MNm M 3255 MNm

35% extra V

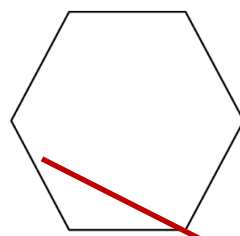
1600% extra H

500% extra M

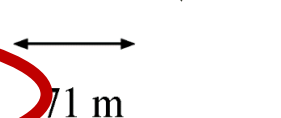
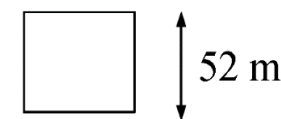
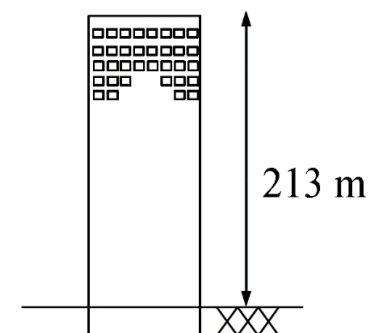
foundation plan

9173 m² A 3692 m²

150% bigger foundation area



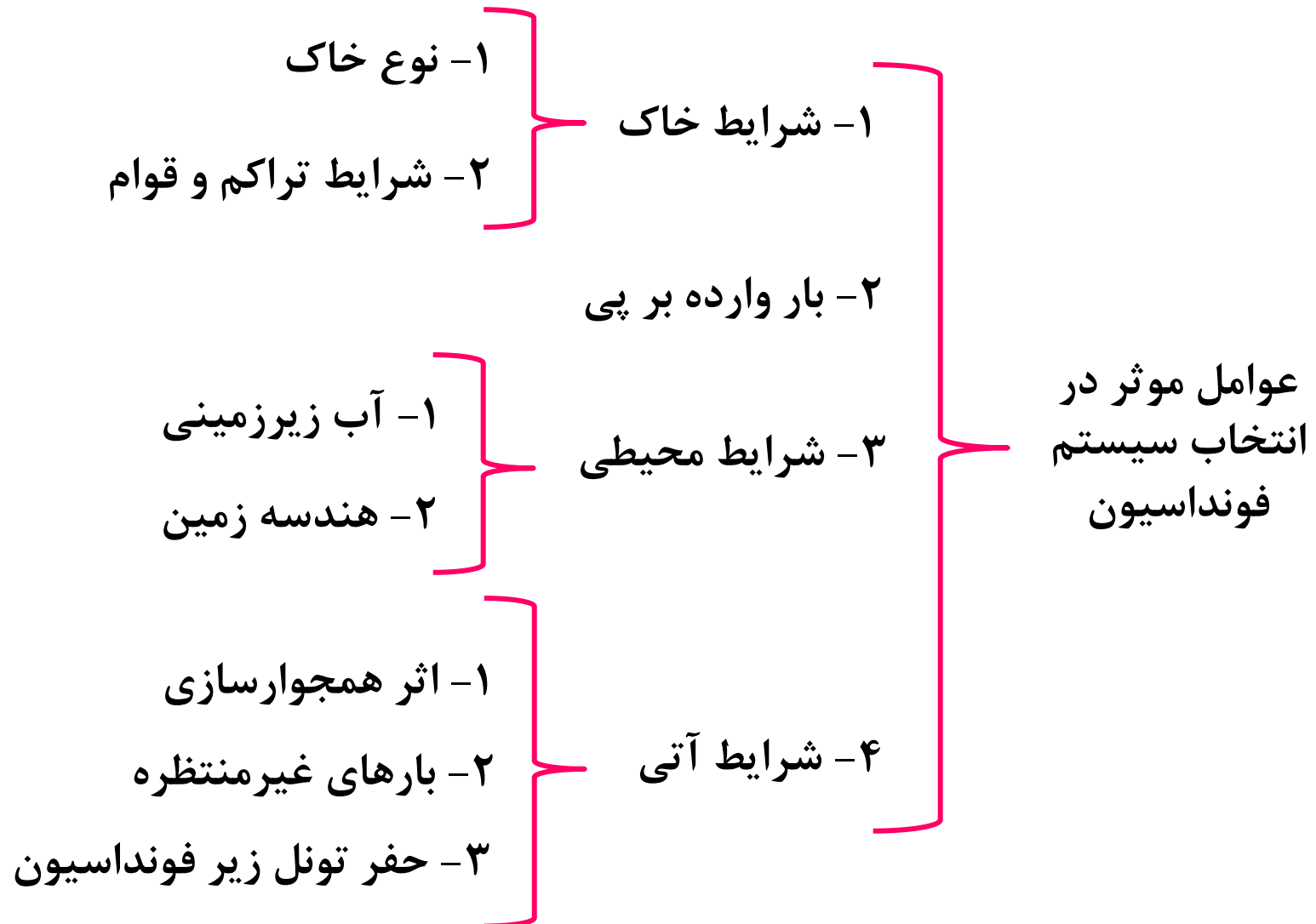
168 m



Taywood Seltrust

One Shell Plaza
Houston

عوامل موثر در انتخاب سیستم فونداسیون



مثال کاربردی شماره ۱

برای یک ساختمان هفت طبقه در زمینی به شکل مستطیل به ابعاد پلان 15×25 اگر از پی منفرد استفاده شود و دانسیته متوسط خاک محل برابر 18 تن بر مترمکعب و تراز آب زیرزمینی پایین‌تر از 25 متر باشد. با فرض فشار معادل هر طبقه متشکل از بارهای مرده یا زنده و دیوارها به قرار 1 تن بر مترمربع، عمق و گستره مطالعات ژئوتکنیک چه محدوده‌ای را در بر می‌گیرد؟

(وزن پی با خاک گودبرداری شده معادل فرض شده و در محاسبات اضافه تنش منظور نشده است).

مثال کاربردی شماره ۱

راه حل

گام اول: محاسبه q_{avg} :

$$q_{avg} = 7 \times 1 = 7 \text{ ton/m}^2$$

گام دوم: محاسبه H عمق مناسب شناسایی با استفاده از شکل ۲-۳-ب یا جدول ۲-۳-ب

$$q_{avg} = 7 \text{ ton/m}^2$$

$$\frac{L}{B} = \frac{25}{15} = 1.7, \quad \frac{q_{avg}}{B} = \frac{7}{15} = 0.47 \frac{t}{m^3} \Rightarrow \frac{H}{B} = 1.3$$

$$H = 1.3 \times 15 = 19.5 \text{ m} \approx 20 \text{ m}$$

گام سوم: تعیین گستره حفاری در پلان با فرض توزیع ۲ به ۱ تنش در عمق

$$\frac{B'}{B} = 1 + \frac{H}{B}, \quad \frac{B'}{B} = 1 + \frac{20}{15} = 2.33, \quad B' = 35 \text{ m}$$

$$\frac{L'}{L} = 1 + \frac{H}{L} = 1 + \frac{20}{25} = 1.8, \quad L' = 1.8 \times 25 = 45 \text{ m}$$

ساورز و ساورز (1972) Sowers & Sowers رابطه کلی زیر را در تعیین عمق مناسب شناسایی ها پیشنهاد نمودند (شکل کلی روابط مندرج در جدول ۲-۲):

$$d = AS^{0.7} + D_f \quad (2-8)$$

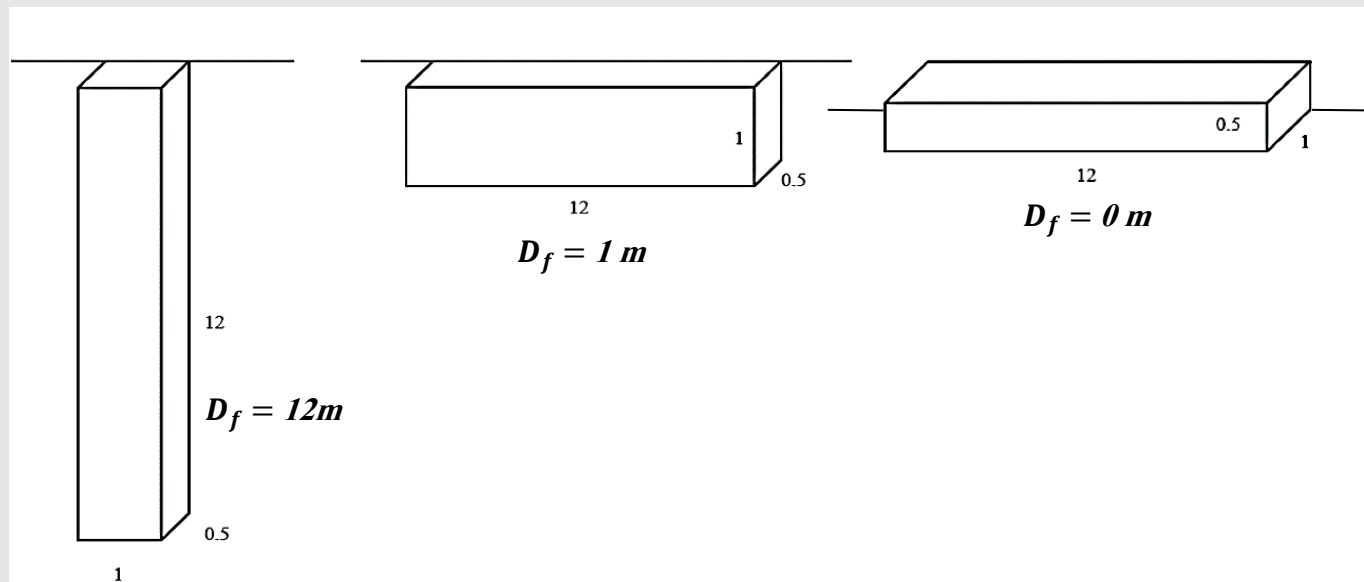
که در رابطه فوق s تعداد طبقات و A ضریبی است که بر حسب نوع خاک مقدار آن بین ۳ تا ۶ پیشنهاد شده است و D_f عمق پیش بینی شده استقرار پی می‌باشد. برای مثال فوق، با فرض مقادیر متوسط A و فرض ۱ متر برای عمق استقرار پی عمق مناسب اکتشافی به قرار ۱۸/۵ متر به دست می‌آید که همخوانی مناسبی با پاسخ به دست آمده در فوق دارد.

مثال کاربردی شماره ۲

ظرفیت باربری یک المان پی به ابعاد $0.5 \times 2 \times 12 \text{ m}$ در سه حالت اجرایی مختلف مطابق شکل را تعیین نمایید.

$$\gamma = 18 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}, \quad S_u = z + 4 \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \right), \quad \alpha = 1,$$

$N_c = 5, 9 \text{ and } 12 \text{ (from shallow to deep condition)}$



مثال کاربردی شماره ۲

a) Shallow foundation

$$q_{ult} = S_u N_c + \bar{q}$$

$$z = 0.5m \rightarrow S_u = 0.5 + 4$$

$$= 4.5 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$q_{ult} = 4.5 \times 5 + 0$$

$$= 22.5 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$P_{ult} = 22.5 \times 12 \times 1$$

$$= 270 \text{ ton}$$

پایداری و نشست؟

b) Semi-deep foundation

$$q_{ult} = S_u N_c$$

$$z = 1m$$

$$q_{ult} = 5 \times 9 = 45 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$Q_{base} = 45 \times 12 \times 0.5$$

$$= 270 \text{ ton}$$

$$q_s = \alpha \cdot S_u$$

$$z = 0.5 m$$

$$q_s = \alpha \cdot S_u = 1$$

$$Q_{shaft}$$

$$= 4.5 \times 2 \times (12 + 0.5) \times 1$$

$$= 112.5 \text{ ton}$$

$$Q_{total} = Q_{base} + Q_{shaft}$$

$$= 270 + 112.5 = 382.5 \text{ ton}$$

c) Deep foundation

راه حل

$$q_{ult} = S_u N_c$$

$$z = 12m \rightarrow S_u = 12 + 4 = 16 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$N_c = 12$$

$$q_{ult} = 16 \times 12 = 192 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$Q_{base} = 192 \times 1 \times 0.5 = 96 \text{ ton}$$

$$q_s = \alpha \cdot S_u$$

$$z = 6 m \rightarrow S_u = 6 + 4 = 10 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$q_s = \alpha \cdot S_u = 1 \times 10 = 10 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$Q_{shaft} = 10 \times 2 \times (1 + 0.5) \times 12$$

$$= 360 \text{ ton}$$

$$Q_{total} = Q_{base} + Q_{shaft}$$

$$= 96 + 360 = 456 \text{ ton}$$

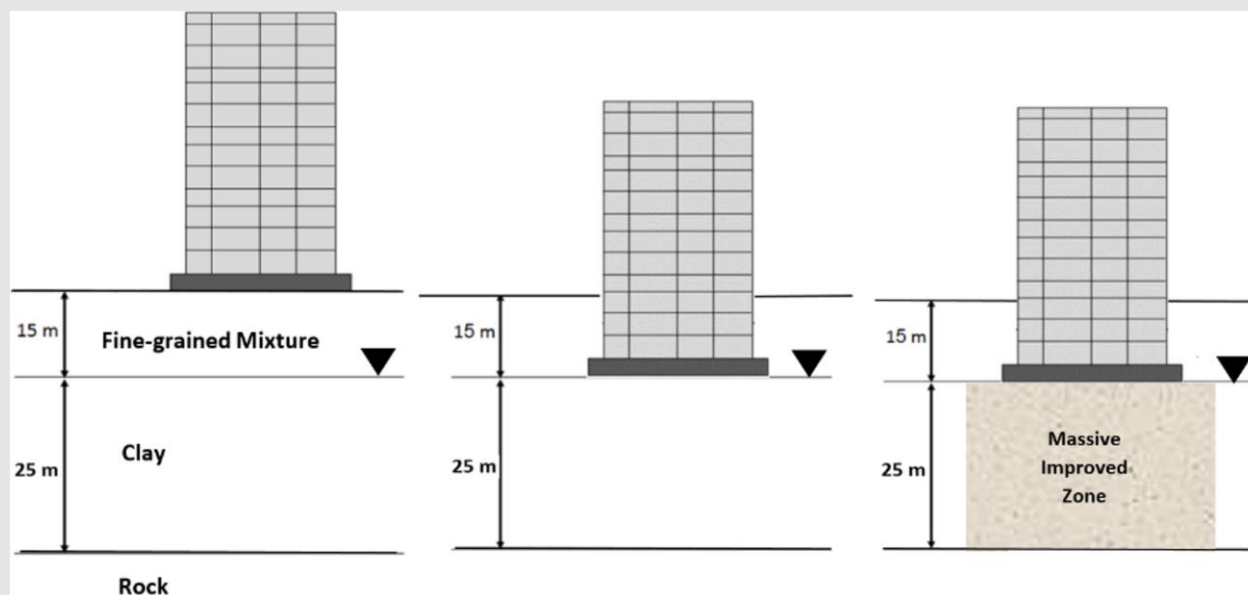
مثال کاربردی شماره ۳

ظرفیت باربری و نشست یک ساختمان ۴۰- طبقه در سه حالت زیر را محاسبه نمایید:

الف) رادیه مربعی به بعد ۲۵ متر و مستقر روی زمین

ب) رادیه مربعی به بعد ۲۵ متر و به صورت پی شناور با عمق مدفون ۱۵ متر

ج) رادیه مربعی به بعد ۲۵ متر، عمق مدفون ۱۵ متر و در ترکیب با بهسازی انبوهی



Soil Layer	γ (ton/m ³)	e_0	C_c	K	$S_{u,avg}$ (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
Fine-grained Mixture	2	-	-	0.4	0.5	200
Clay (Pre Improvement)	1.2	2	0.7	-	0.25	-
Clay (Post Improvement)	1.5	2	0.22		0.4	

مثال کاربردی شماره ۳

راه حل

a) $q_{ult} = N_c S_u + \sigma'_0$, The average of S_u between the ground surface to $Z=40$ m should be used.

$$S_{u_{avg}} = \frac{15 \times 0.5 + 10 \times 0.25}{25} = 0.4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 4 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$q_{ult} = 5.14 \times 4 + 0 = 20.6 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$q = 40 \times 1 = 40 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

Fine-grained mixture:

$$S_{\text{Fine-grained mixture}} = \frac{K \times q \times B}{E} = \frac{0.4 \times 40 \times 25}{200 \times 10} = 0.2 \text{ m} = 200 \text{ mm}$$

Clay:

$$\sigma'_0 = 15 \times 2 + 12.5 \times (1.2 - 1) = 32.5 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta q = \frac{q \times B^2}{(B + Z)^2} = \frac{40 \times 25^2}{(25 + 27.5)^2} = 9.1 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_0 + \Delta q = 32.5 + 9.1 = 41.6 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$S_{\text{Clay}} = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0} = \frac{0.7 \times 25}{1 + 2} \log \frac{41.6}{32.5} = 0.625 \text{ m} = 625 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total}} = 200 + 625 = 825 \text{ mm}$$

مثال کاربردی شماره ۳

راه حل

b) $q_{ult} = N_c S_u + \sigma'_0$, The S_u of the clay layer should be used.

$$q_{ult} = 5.14 \times 2.5 + 15 \times 2 = 42.9 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$q_{net} = 40 \times 1 - 15 \times 2 = 10 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

Clay:

$$\sigma'_0 = 15 \times 2 + 12.5 \times (1.2 - 1) = 32.5 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta q = \frac{q \times B^2}{(B + Z)^2} = \frac{10 \times 25^2}{(25 + 12.5)^2} = 4.4 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_0 + \Delta q = 32.5 + 4.4 = 36.9 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$S_{\text{Clay}} = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0} = \frac{0.7 \times 25}{1 + 2} \log \frac{36.9}{32.5} = 0.322 \text{ m} = 322 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total}} = 322 \text{ mm}$$

مثال کاربردی شماره ۳

راه حل

c) $q_{ult} = N_c S_u + \sigma'_0$, The S_u of clay layer after improvement should be used.

$$q_{ult} = 5.14 \times 4 + 15 \times 2 = 50.6 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$q_{net} = 40 \times 1 - 15 \times 2 = 10 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

Clay:

$$\sigma'_0 = 15 \times 2 + 12.5 \times (1.5 - 1) = 36.3 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta q = \frac{q \times B^2}{(B + Z)^2} = \frac{10 \times 25^2}{(25 + 12.5)^2} = 4.4 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_0 + \Delta q = 36.3 + 4.4 = 40.7 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

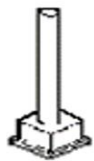
$$S_{\text{clay}} = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0} = \frac{0.22 \times 25}{1 + 2} \log \frac{40.7}{36.3} = 0.091 \text{ m} = 91 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total}} = 91 \text{ mm}$$

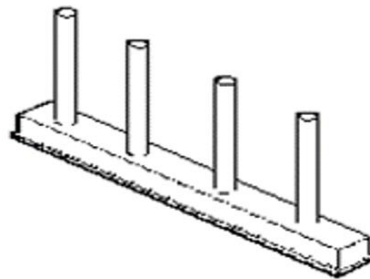
مثال کاربردی شماره ۴

صلبیت و انعطاف پذیری پی های زیر را ارزیابی نمایید.

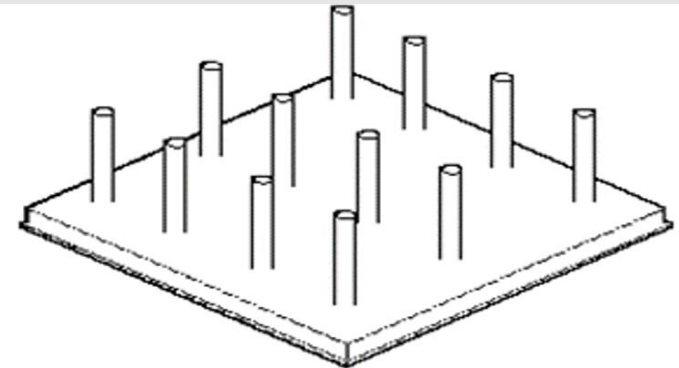
$$K_s = 30 \frac{\text{MPa}}{\text{m}}, \quad E_s = 60 \text{ MPa}, \quad f'_c = 25 \text{ MPa}, \quad E_c = 23 \text{ GPa}$$



$$B \times L = 2 \times 2 \text{ m}, t = 0.8 \text{ m}$$



$$B \times L = 2 \times 15 \text{ m}, t = 0.8 \text{ m}$$



$$B \times L = 15 \times 15 \text{ m}, t = 1 \text{ m}$$

مثال کاربردی شماره ۴

راه حل

 λL method

$$\text{Single: } \lambda = \sqrt[4]{\frac{K_s B}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{30 \times 2}{4 \times 23 \times 10^3 \times \frac{1}{12} \times 2 \times 0.8^3}} = 0.3 \rightarrow \lambda L = 0.6 < \frac{\pi}{4} \rightarrow \text{Rigid}$$

$$\text{Strip: } \lambda = \sqrt[4]{\frac{K_s B}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{30 \times 2}{4 \times 23 \times 10^3 \times \frac{1}{12} \times 2 \times 0.8^3}} = 0.3 \rightarrow \lambda L = 4.5 > \pi \rightarrow \text{Flexible}$$

$$\text{Mat: } \lambda = \sqrt[4]{\frac{K_s B}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{30 \times 15}{4 \times 23 \times 10^3 \times \frac{1}{12} \times 15 \times 1^3}} = 0.25 \rightarrow \lambda L = 3.75 > \pi \rightarrow \text{Flexible}$$

 $\bar{k}$ method

$$\text{Single: } \bar{K} = \frac{1}{12} \left(\frac{E_c}{E_s} \right) \left(\frac{t}{L} \right)^3 = \frac{1}{12} \left(\frac{23 \times 10^3}{60} \right) \left(\frac{0.8}{2} \right)^3 = 2.04 > 0.5 \rightarrow \text{Rigid}$$

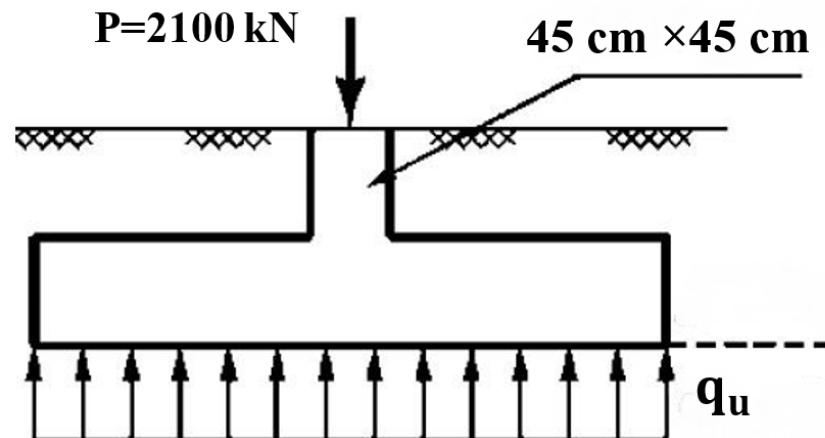
$$\text{Strip: } \bar{K} = \frac{1}{12} \left(\frac{E_c}{E_s} \right) \left(\frac{t}{L} \right)^3 = \frac{1}{12} \left(\frac{23 \times 10^3}{60} \right) \left(\frac{0.8}{15} \right)^3 = 0.005 < 0.5 \rightarrow \text{Flexible}$$

$$\text{Strip: } \bar{K} = \frac{1}{12} \left(\frac{E_c}{E_s} \right) \left(\frac{t}{L} \right)^3 = \frac{1}{12} \left(\frac{23 \times 10^3}{60} \right) \left(\frac{1}{15} \right)^3 = 0.0095 < 0.5 \rightarrow \text{Flexible}$$

مثال کاربردی شماره ۵

برای یک پی تک با توجه به داده های موجود، بر اساس متد جدولی ضخامت و فولاد مورد نیاز را تعیین نمایید.

Live load = 900 kN	Dead load = 1200 kN
Column dimensions: 45 × 45 cm	$f'_c = 21 \text{ MPa}$
Foundation dimensions: 280 × 280 cm	$f_y = 300 \text{ MPa}$



Determining the effective depth based on two-way shear:

$$\frac{A_F}{A_C} = \frac{280 \times 280}{45 \times 45} = 38.7, \quad q_u = \frac{1.7 \times D + 1.4 \times D}{A_f} = \frac{1.7 \times 1200 + 1.4 \times 900}{2.8^2} = 0.41 \text{ MPa}$$

Based on Table A and using $\frac{A_F}{A_C} = 39.3, q_u = 0.4 \text{ MPa}$

$$\frac{d}{b} = 1.2 \rightarrow d = 1.2 \times 45 = 54 \text{ cm}$$

Determining the effective depth based on one-way shear:

$$a_b = \frac{(280 - 45)}{2} = \frac{235}{2} = 117.5 \text{ cm}$$

Based on Table B and using $q_u = 0.4 \text{ MPa}$

Δa_b	Δd
120-100	45.6-38
117.5-100	$X=?$

$$d = 38 + X = 38 + 6.5 = 44.65 \text{ cm}$$

Determining the required reinforcement:

$$q_u \times a_b^2 = 4.09 \times 117.5^2 = 56467.6 \text{ kg} = 565 \text{ kN}$$

Based on Table C and using $q_u \times a_b^2 = 565 \text{ kN}, d = 55 \text{ cm}$

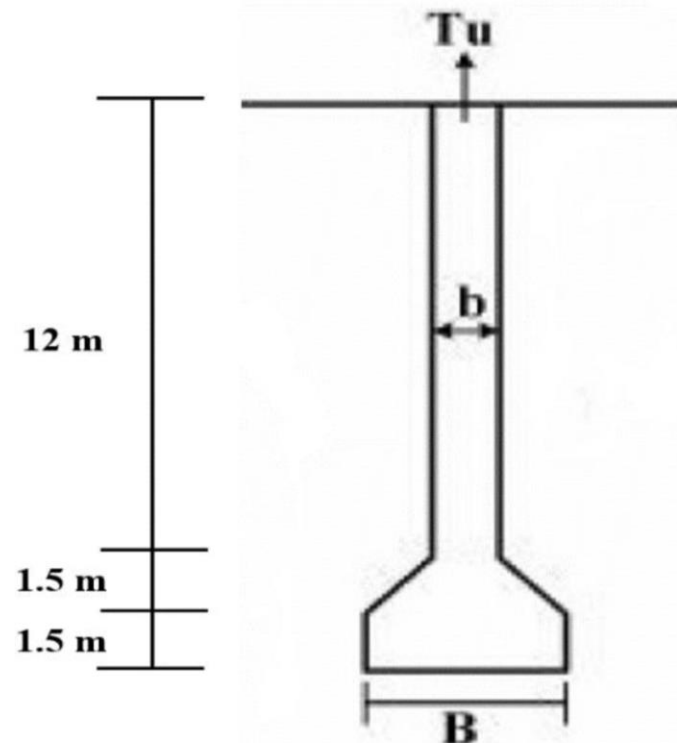
$q_u \times a_b^2$	A_s
60-50	20.9-17.3
56.5-50	$X=?$

$$A_s = 17.3 + X = 17.3 + 2.34 = 19.64 \text{ cm}^2$$

مثال کاربردی شماره ۵**راه حل**

مثال کاربردی شماره ۶

ظرفیت پی عمیق درجاریز پافیلی با مشخصات زیر در برابر بارهای کششی را تعیین نمایید.



$$b = 80 \text{ cm}, B = 200 \text{ cm}, S_u = 20 \text{ kPa}, \gamma_{\text{sat}} = 1.95 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}, \gamma_{\text{con}} = 2.45 \text{ t/m}^3$$

مثال کاربردی شماره ۶

راه حل

Foundation's weight (W_f):

$$V_f = \left[\frac{\pi}{4} \times 0.8^2 \times 12 \right] + \left[\frac{\pi}{4} \times \left(\frac{0.8 + 2}{2} \right)^2 \times 1.5 \right] + \left[\frac{\pi}{4} \times 2^2 \times 1.5 \right] = 13.053 \text{ m}^3$$

$$W_f = V_f \times \gamma' = 13.053 \times (2.45 - 1) = 18.927 \text{ ton}$$

Soil's weight (W_s):

$$V_s = \left[\frac{\pi}{4} \times (2^2 - 0.8^2) \times 12 \right] + \left[\frac{\pi}{4} \times \left(2^2 - \left(\frac{0.8 + 2}{2} \right)^2 \right) \times 1.5 \right] = 34.071 \text{ m}^3$$

$$W_s = V_s \times \gamma' = 34.071 \times (1.95 - 1) = 32.367 \text{ ton}$$

Shear resistance (τA_s):

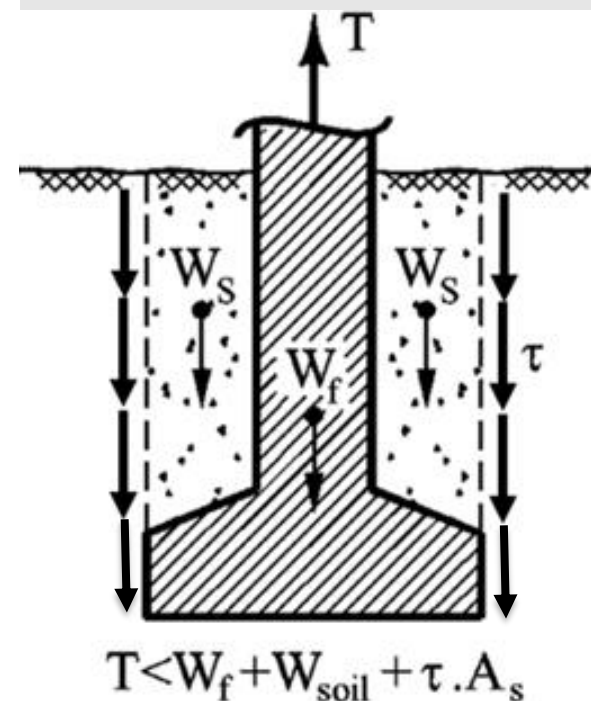
$$S_u = 20 \text{ kPa} \leq 25 \text{ kPa} \rightarrow \alpha = 1$$

$$\tau = \alpha \times S_u = 1 \times 2 = 2 \text{ t/m}^2$$

$$A_s = \pi \times 2 \times 15 = 94.248 \text{ m}^2$$

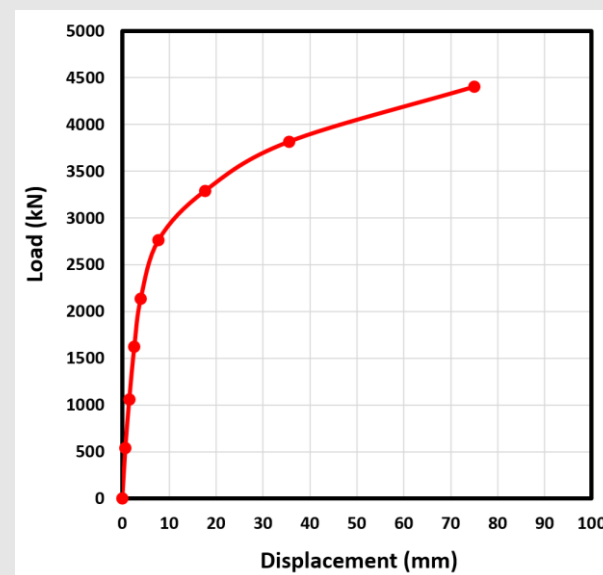
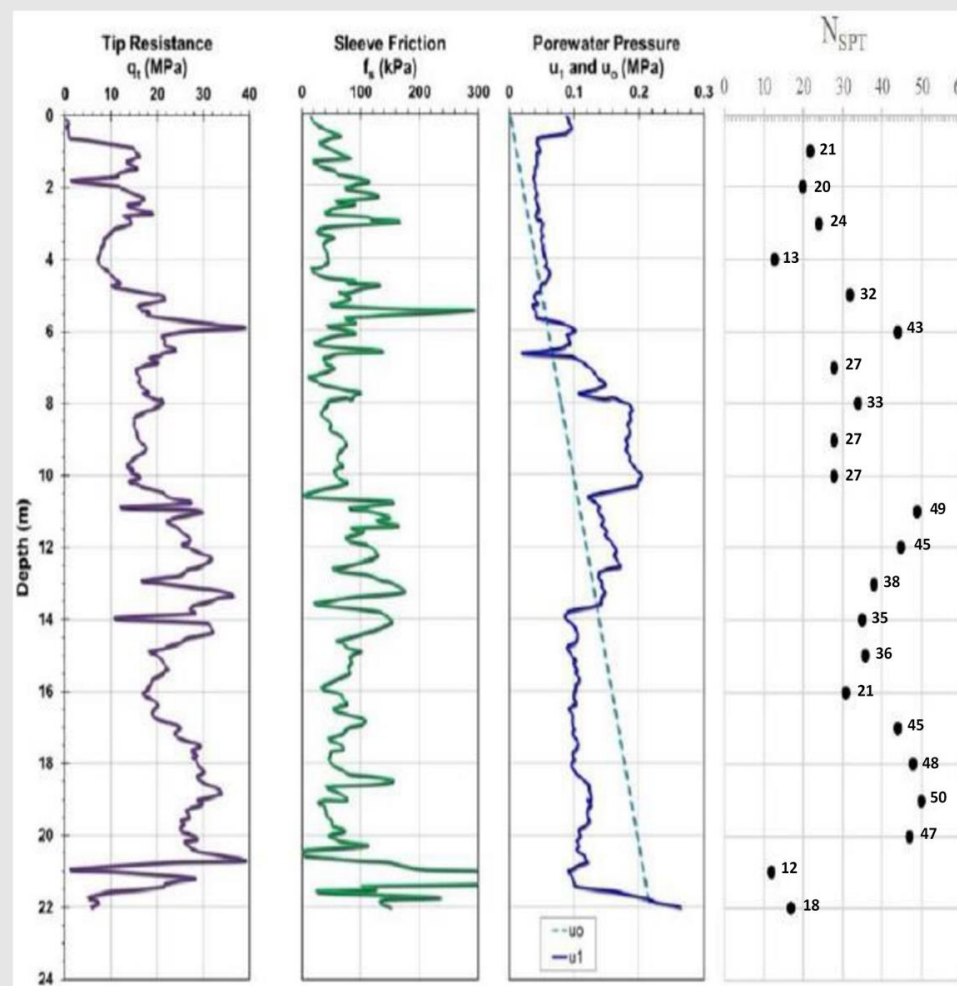
$$\tau \times A_s = 2 \times 94.248 = 188.496 \text{ ton}$$

$$T_u = W_f + W_s + \tau A_s = 13.053 + 34.071 + 188.496 = 235.62 \text{ ton}$$



مثال کاربردی شماره ۷

نتایج حاصل از تست‌های درجای SPT و CPT و تست بارگذاری استاتیکی در یک سایت اجرای شمع به صورت زیر گزارش شده‌است. شمع مورد استفاده از نوع لوله‌ای ته‌بسته فولادی به قطر ۴۱۰ میلیمتر و طول مدفون ۱۴/۵ متر می‌باشد. با توجه به نمونه‌های اخذشده و نتایج سایر تست‌ها، نهشته به صورت کلی از نوع ماسه سیلت‌دار (Silty Sand) گزارش شده‌است.



مثال کاربردی شماره ۷

راه حل

Meyerhof (1983)

Shaft Resistance:

$$N_{\text{ave-shaft}} = \frac{21 + 20 + 24 + 13 + 32 + 43 + 27 + 33 + 27 + 27 + 49 + 45 + 38 + 35}{14} = 31$$

$$r_s = 2N_{\text{ave}} = 2 \times 31 = 62 \text{ kPa}$$

$$A_s = \pi DL = \pi(0.41)(14.5) = 18.677 \text{ m}^2$$

$$R_s = r_s A_s = 62 \times 18.677 = 1157.974 \text{ kN} = 115.8 \text{ ton}$$

Tip Resistance:

$$\text{Effect Zone} = [D - 8B, D + 3B] = [11.22 \text{ m}, 15.7 \text{ m}]$$

$$N_{\text{ave-base}} = \frac{45 + 38 + 35 + 36}{4} = 38.5$$

$$C_1 = C_2 = 1$$

$$r_t = 400C_1C_2N_{\text{ave-base}} = 400 \times 38.5 = 15400 \text{ kPa}$$

$$A_t = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \times 0.41^2}{4} = 0.132 \text{ m}^2$$

$$R_t = r_t A_t = 15400 \times 0.132 = 2032.8 \text{ kN} = 203.3 \text{ ton}$$

Total Bearing Capacity:

$$R_u = R_t + R_s = 203.3 + 115.8 = 319.1 \text{ ton}$$

مثال کاربردی شماره ۷

راه حل

Eslami & Fellenius (1997)

Shaft Resistance:

$$q_{E-geomean} = 16.25 \text{ MPa}$$

Silty Sand: $C_s = 0.01$

$$r_s = C_s q_{E-geomean} = 0.01 \times 16.25 = 162.5 \text{ kPa}$$

$$A_s = \pi DL = \pi(0.41)(14.5) = 18.677 \text{ m}^2$$

$$R_s = r_s A_s = 162.5 \times 18.677 = 3035.013 \text{ kN} = 303.5 \text{ ton}$$

Toe Resistance:

$$\text{Effect Zone} = [D - 4B, D + 4B] = [12.86 \text{ m}, 16.14 \text{ m}]$$

$$q_{E-geomean} = \sqrt[3]{27.88 + 24.9 + 19.9} = 24 \text{ MPa}$$

$$r_t = q_{E-geomean} = 24000 \text{ kPa}$$

$$A_t = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \times 0.41^2}{4} = 0.132 \text{ m}^2$$

$$R_t = r_t A_t = 24000 \times 0.132 = 3168 \text{ kN} = 316.8 \text{ ton}$$

Total Bearing Capacity:

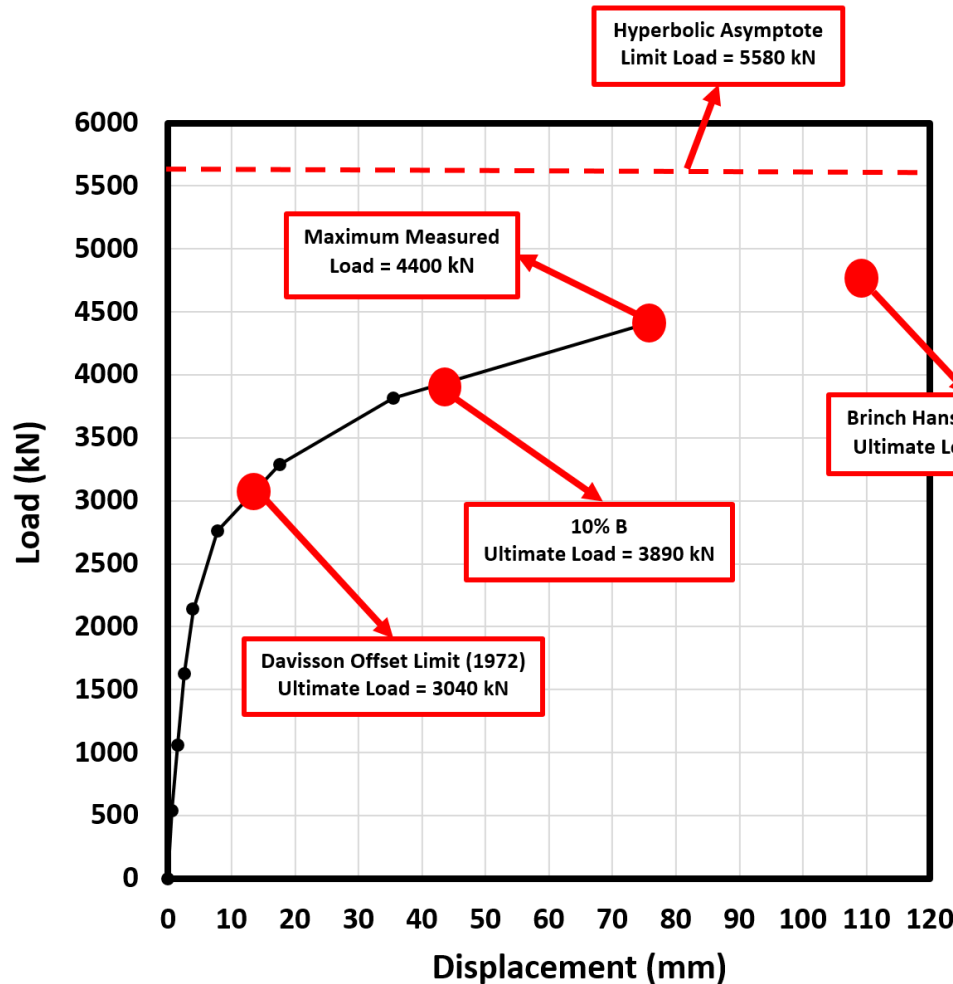
$$R_u = R_t + R_s = 316.8 + 303.5 = 620.3 \text{ ton}$$

Z (m)	q_t (MPa)	u_2 (MPa)	q_E (MPa)
0 - 1	5	0.07	4.93
1 - 2	12	0.04	11.96
2 - 3	15	0.04	14.96
3 - 4	8	0.05	7.95
4 - 5	9	0.05	8.95
5 - 6	24	0.05	23.95
6 - 7	21	0.09	20.91
7 - 8	17	0.125	16.875
8 - 9	16	0.18	15.82
9 - 10	16	0.18	15.82
10 - 11	20	0.16	19.84
11 - 12	25	0.15	24.85
12 - 13	26	0.15	25.85
13 - 14	29	0.125	28.875
14 - 14.5	30	0.1	29.9

Z (m)	q_t (MPa)	u_2 (MPa)	q_E (MPa)
13 - 14	28	0.12	27.88
14 - 15	25	0.1	24.9
15 - 16	20	0.1	19.9

مثال کاربردی شماره ۷

راه حل



۴. خرابی‌ها و خسارات پی‌ها

4. Failures & Damages of Foundations

عوامل خرابی

عوامل خرابی
و آسیب
فونداسیون‌ها

شرایط ژئوتکنیکی (وجود خاک مسئله‌دار)

عوامل سازه‌ای

عوامل پیرامونی (اثر همجواری، حفاری زیرسطحی، گودبرداری و ...)

نواقص اجرایی

بارگذاری نامتعارف

حوادث غیرمترقبه (روانگرایی، انحلال و ...)

R. Peck (1967) - The Man of Judgment:

پروژه‌های عمرانی تنها به یک دلیل دچار خرابی نمی‌شوند!

خرابی ژئوتکنیکی: ضعف ظرفیت باربری

انواع گسیختگی برشی

- کلی
- موضعی
- سوراخ کننده (پانچ)



(a)



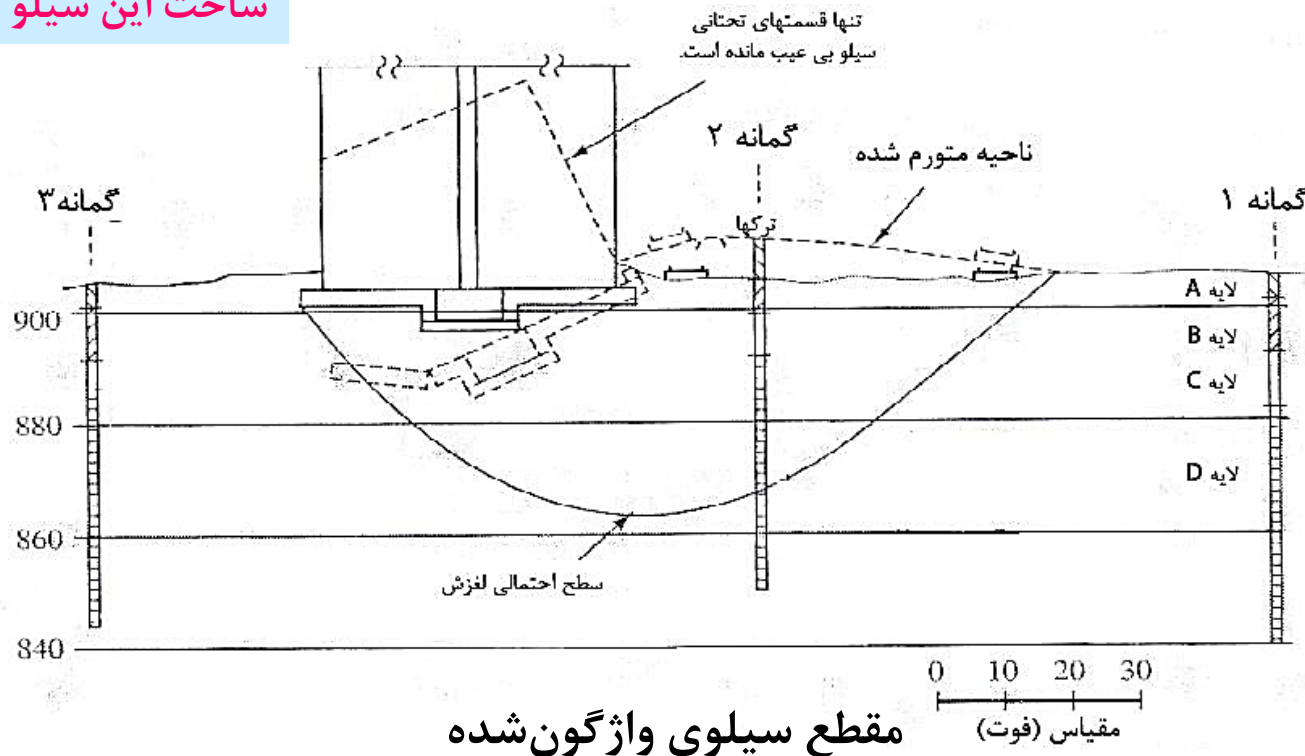
(b)

Bearing capacity failure of a) silo foundation (Kimmerling, 2002)
and b) shallow foundation (Prakash, 2007)

مورد عملی شماره ۴ – سیلوی گندم Fargo (Nordlund and Deere, 1970)

- سیلوی گندم فارگو در سال ۱۹۵۴ ساخته و در سال ۱۹۵۵ واژگون شد.
- سازه از نوع بتن مسلح با ۲۰ کندوی استوانه‌ای و سایر تاسیسات الحاقی بوده است.
- پی گسترده با پهنای ۱۵/۸ متر، طول ۶۶/۴ متر و ضخامت ۰/۷۱ متر
- مقاومت برشی زهکشی نشده: ۳۰ تا ۵۰ کیلو پاسکال

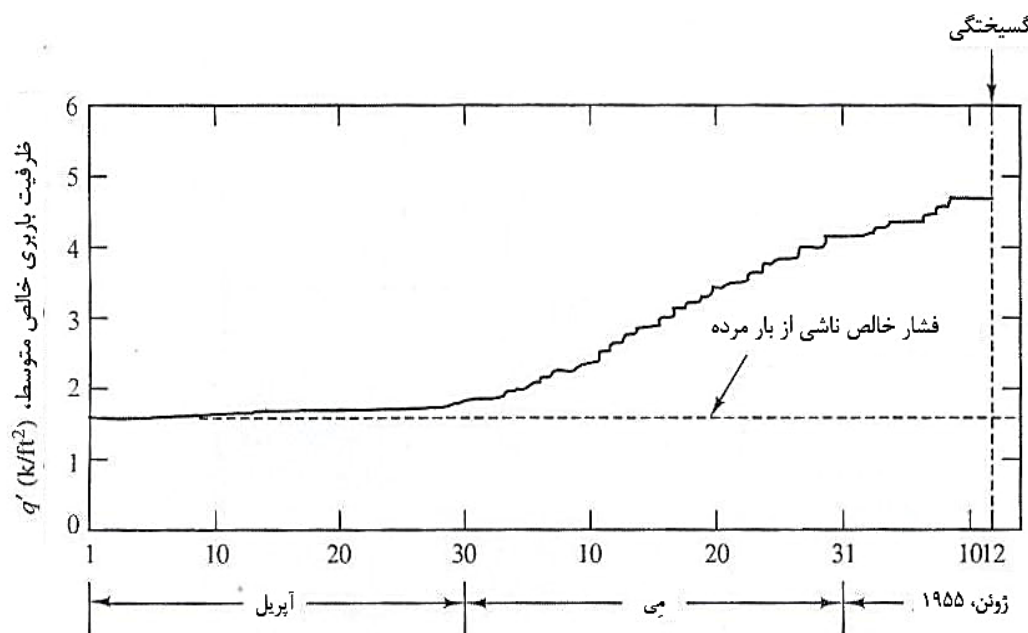
نکته قابل توجه: هیچگونه مطالعات ژئوتکنیکی قبل از ساخت این سیلو انجام نشده بود.



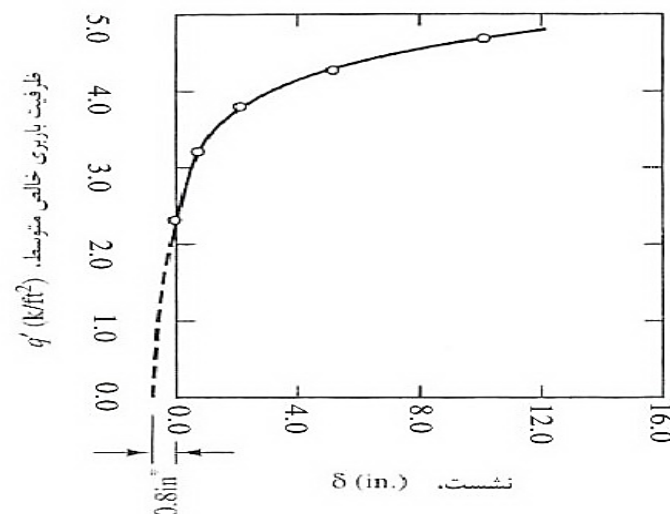
مورد عملی شماره ۴ – سیلوی گندم Fargo (Nordlund and Deere, 1970)

- با شروع بارگیری انبار گندم در سال ۱۹۵۵، q' (ظرفیت باربری خالص متوسط) افزایش یافته است.
- مقدار بار زنده در این پروژه به 227 KPa رسید.
- به دلیل افزایش متوسط فشار اعمالی خالص حاصل از بارگیری سیلو، این سازه با سرعتی بالا آغاز به نشست نمود.

$$S_{u-\text{avg}} = 40 \text{ kPa} \rightarrow q_{\text{ult}} = 5.14 \times 40 = 205.6 \text{ kPa} < q_{\text{live}} = 227 \text{ kPa} \text{ Failure!!!}$$



روند نشست سازه

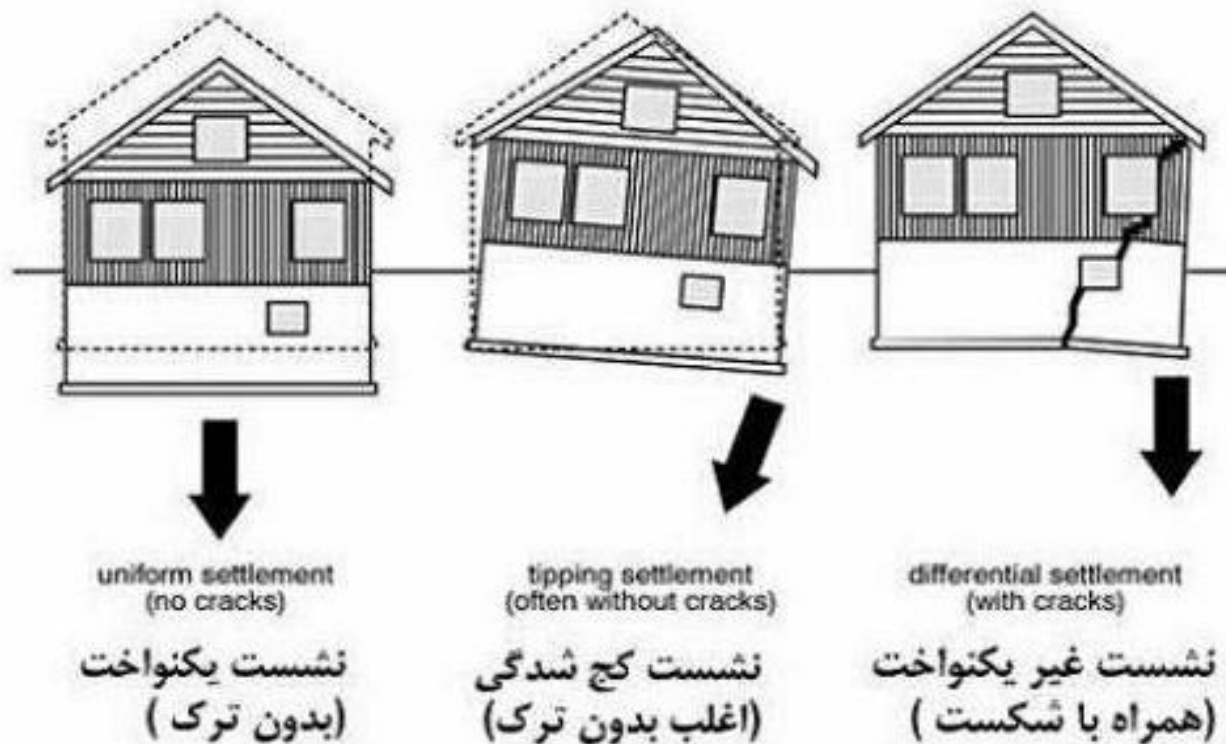


افزایش متوسط فشار اعمالی خالص
حاصل از بارگیری سیلو

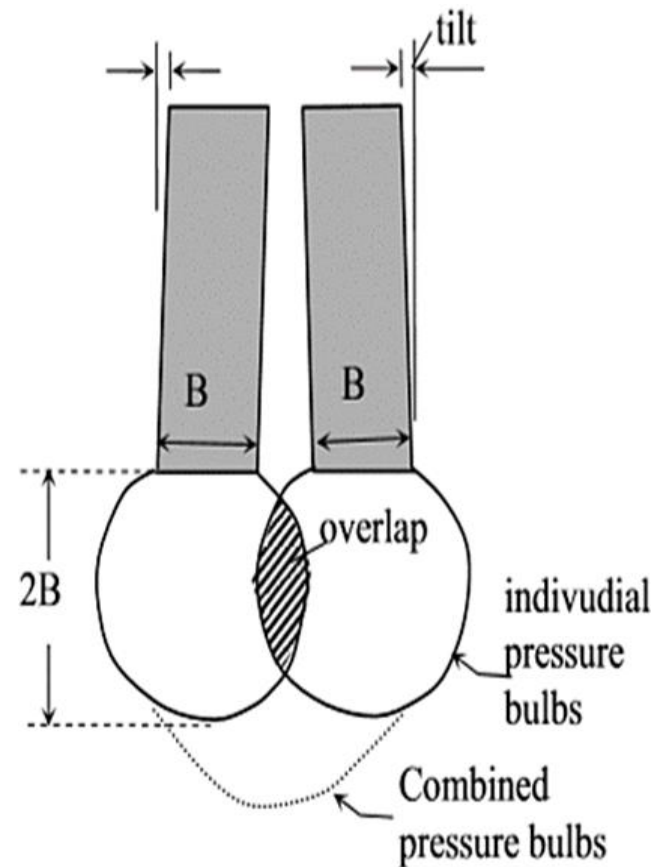
خرابی ژئوتکنیکی: نشست

انواع خرابی ناشی از نشست

- یکنواخت
- کج شدگی
- نامتقارن (غیر یکنواخت)

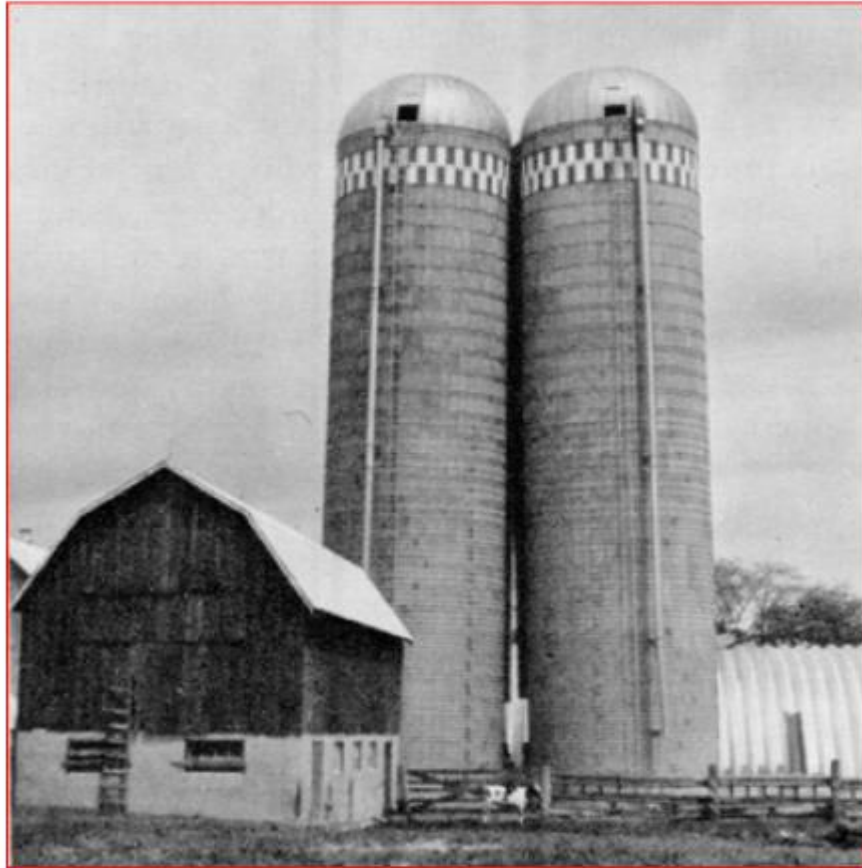


مورد عملی شماره ۵ – سیلوهای مجاور (عوارض همجوار سازی)

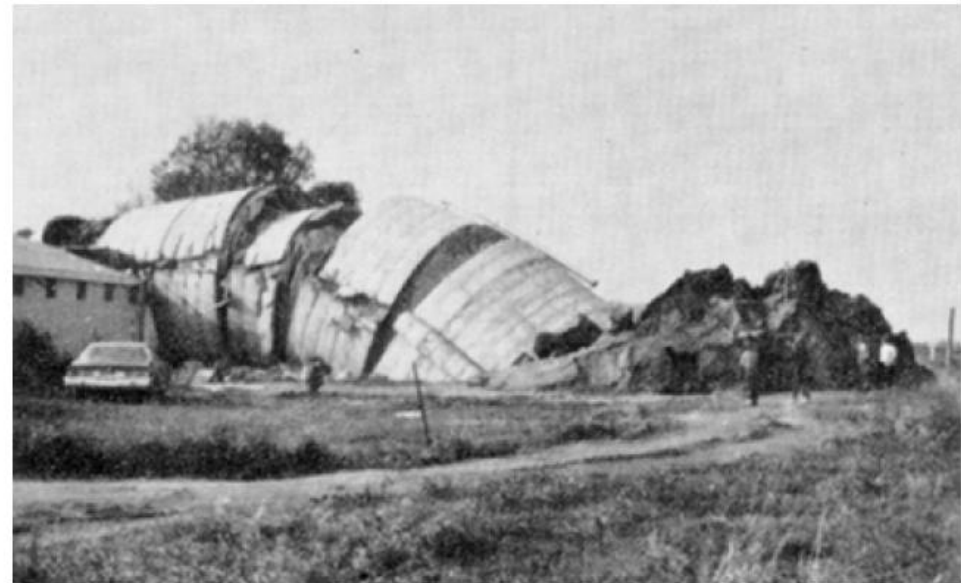


حباب های تنش در زیر فونداسیون گسترده
بزرگ و کوچک

مورد عملی شماره ۵ – سیلوهای مجاور (عوارض همجوار سازی)

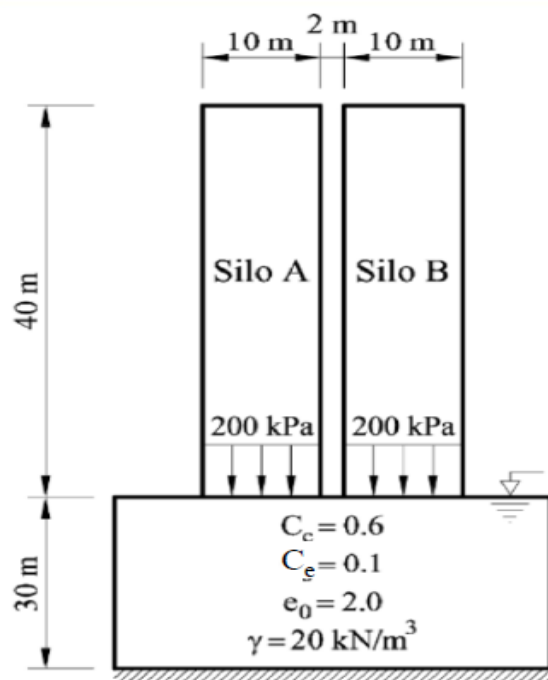


Leaning twin silos caused by non uniform settlement in zone of overlapping pressure bulbs.



Failure of a 2500-ton capacity silo damaging adjacent barns

مورد عملی شماره ۵ - سیلوهای مجاور (عوارض همجوار سازی)



• when $p_1 \geq \sigma_p$

$$S = \frac{H}{1+e_1} C_c \lg\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

• when $p_1 < \sigma_p$ and $p_2 > \sigma_p$

$$S = \frac{H}{1+e_1} \left(C_c \lg\left(\frac{\sigma_p}{p_1}\right) + C_c \lg\left(\frac{p_2}{\sigma_p}\right) \right)$$

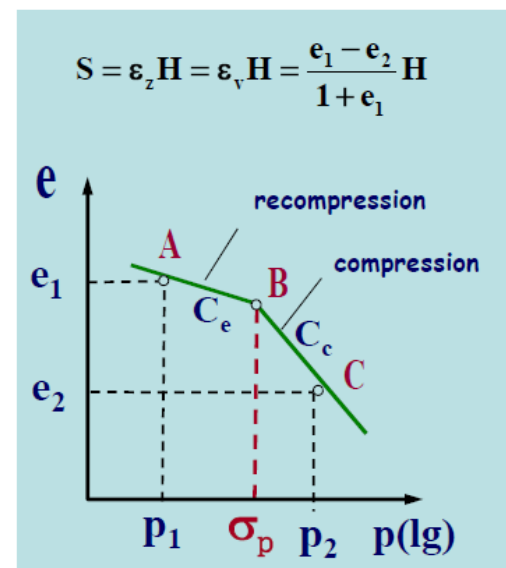


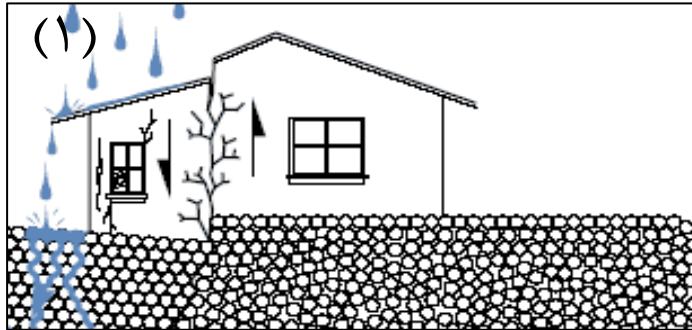
Table 1.1 Calculated settlements under Point E₁.

i (-)	z_i (m)	ΔH_i (m)	γ' (kN/m ³)	σ'_0 (kN/m ²)	$\Delta\sigma_{A1}$ (kN/m ²)	$\Delta\sigma_{B1}$ (kN/m ²)	$\Delta\sigma_{tot}$ (kN/m ²)	$\Delta\rho$ (cm)
1	5	10	10	50	80	1	81	83.6
2	15	10	10	150	29	6	35	18.2
3	25	10	10	250	13	6	19	6.4
Total settlement								108.2

خرابی ژئوتکنیکی: ناپایداری – وجود خاک مسئله دار ماسه شل اشباع – وقوع روانگرایی



خرابی ژئوتکنیکی: وجود خاک مسئله دار – خاک های فروریزشی (لس)



مشکلات ناشی از لس ها عبارتند از:

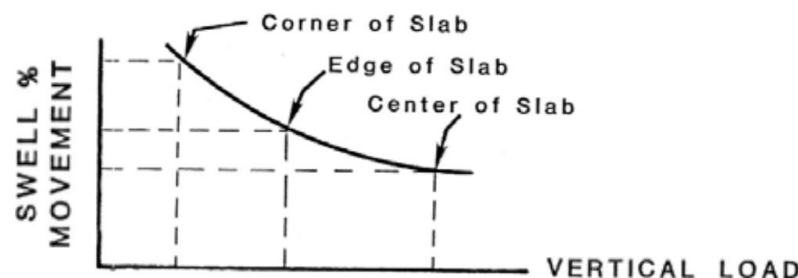
- کاهش ظرفیت باربری پی های سطحی (عکس ۱ و ۲)
- نشست و خرابی در کانال ها، جاده ها و ... (عکس ۳ و ۴)



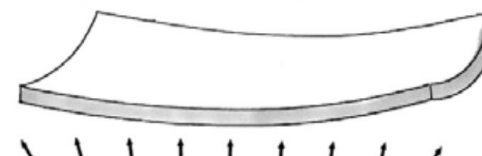
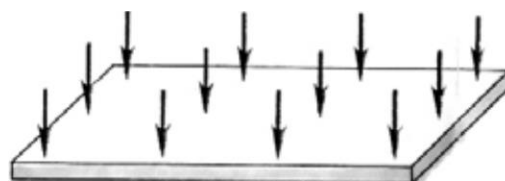
خرابی ژئوتکنیکی: وجود خاک مسئله‌دار – خاک‌های انبساطی

مشکلات ناشی از خاک‌های انبساطی

پی‌هایی که بر روی این خاک‌ها قرار دارند، به علت تورم خاک تحت نیروهای برگشتی قابل توجهی قرار دارند؛ این نیروها باعث مشکلاتی از قبیل **بالا آمدگی، ترک، شکست اجزای فونداسیون و دال کف می‌گردد.**



Uniformly Loaded Rectangular Slab



Uniform Swell Pressure
Non-Uniform Direction and Movement

خرابی ژئوتکنیکی: وجود خاک مسئله دار – خاک های مستعد یخ زدگی



This damaged building in Dawson City, Canada, shows what can happen when the warm interior of a building causes the permafrost underneath to thaw.
Credit: Andrew Slater

(۱) سست شدن خاک

Uneven thawing damaged this road in Tibet. *Credit: Tingjun Zhang*



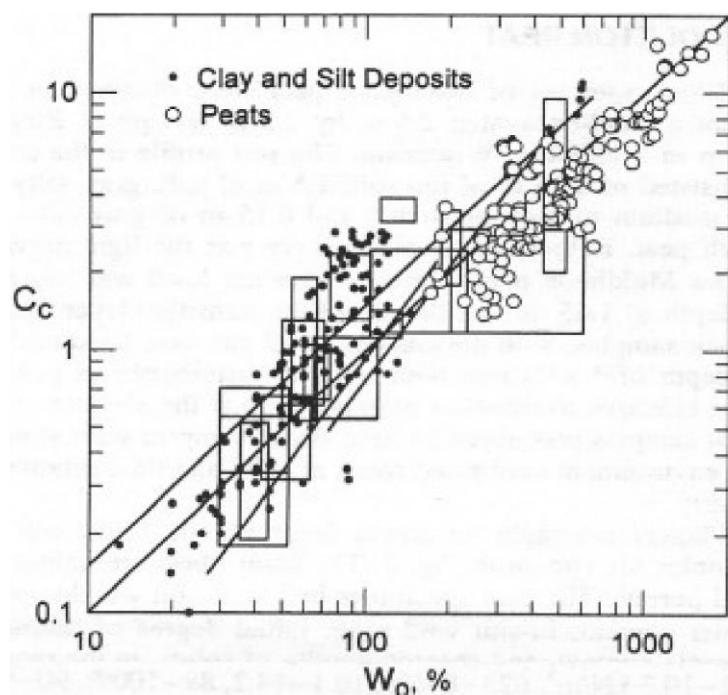
(۲) ایجاد فرورفتگی

خرابی ژئوتکنیکی: وجود خاک مسئله‌دار – خاک‌های آلی و نباتی

مشکلات ناشی از خاک‌های آلی

رس‌ها و سیلت‌های آلی ← مقاومت برشی زهکشی‌نشده کم و تراکم‌پذیری بالا

بیشترین شاخص فشردگی را در بین مصالح ژئوتکنیکی و بخش اعظم نشست در دراز مدت



خرابی به دلیل اشکالات اجرایی

- روش اجرا نادرست
- طراحی پیچیده پی و صعوبت اجرا
- عدم مقاومت کافی در مصالح اجرایی (تنش تسلیم فولاد و مقاومت مشخصه بتن)



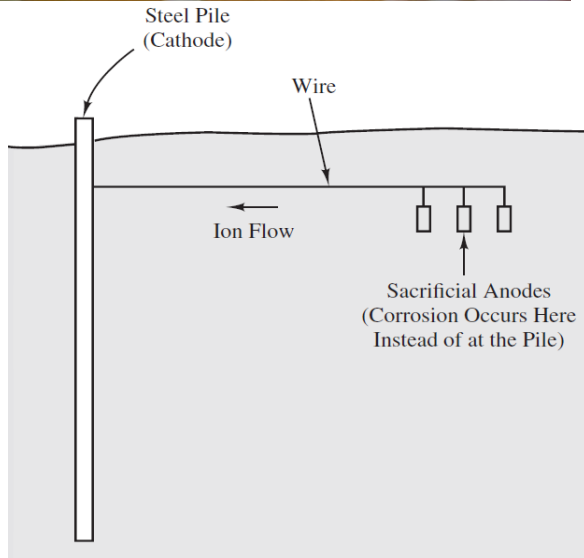
خرابی به سبب خوردگی پی های فولادی

وقوع خوردگی در پی های از جنس فولاد

- هم برای پی های واقع در خشکی و هم در مجاورت آب
- لزوم توجه بیشتر به پی های واقع در محیط آبی به ویژه آب شور-نرخ خوردگی: 0.075 تا 0.175 میلی متر بر سال

روش های مقابله

- افزایش ضخامت برابر با مقدار خوردگی پیش بینی شده
- استفاده از پوشش محافظ برای فولاد
- تعبیه سیستم حفاظت کاتدی



خرابی به سبب خوردگی پی های بتنی



وقوع حمله سولفاتی در پی های از جنس بتن

- وقوع در پی های در مجاورت با خاک یا آب زیرزمینی حاوی غلظت بالایی از سولفات (SO_4)
- واکنش سیمان درون بتن با سولفات و متعاقباً افزایش حجم، وقوع ترک و تخریب پی



روش های مقابله

- کاهش نفوذپذیری بتن:
 - کاهش نسبت آب به سیمان
 - افزایش مقدار سیمان
- استفاده از سیمان ضد سولفات
- پوشش بتن با لایه محافظ

خرابی به دلیل آب‌شستگی در اثر وقوع سیلاب

- از بین رفتن عمق مدفون پی
- کاهش پارامترهای مقاومتی خاک موجود
- اعمال بارهای پیش‌بینی نشده و خارج از مرکز
- کاهش ظرفیت باربری و پایداری فونداسیون
- کاهش ضریب اطمینان در برابر بارهای واژگون‌کننده



مورد عملی شماره ۶- پل بتنی عابر پیاده بابلسر

مشخصات پل

- پل بتنی عابر پیاده بر روی بابلرود در سال ۱۹۵۹ و به منظور تسریع در رفت و آمد مردم و اتصال نیمه شرقی شهر به نیمه غربی آن ساخته شد.
- این پل از بتن مسلح ساخته شده‌است و شامل اجزای زیر می‌باشد:
 - چهار پایه در رودخانه
 - پنج دهانه با تکیه‌گاه‌های مفصلی و طول‌های تقریباً مساوی
- طول پل بابلسر ۱۰۱ متر و عرض آن ۲ متر و یک پی سطحی زیر هر یک از پایه‌ها



مورد عملی شماره ۶- پل بتنی عابر پیاده بابلسر

عوامل موثر در خرابی پل: سیلاب ۱۹۶۴ میلادی

عوامل ژئوتکنیکی

- نهشته های نرم و باتلاقی ته نشین شده در بستر رودخانه
- شسته شدن خاک اطراف پایه های پل در حین سیلاب
- تداوم نشست پایه های پل

عوامل هیدرولیکی

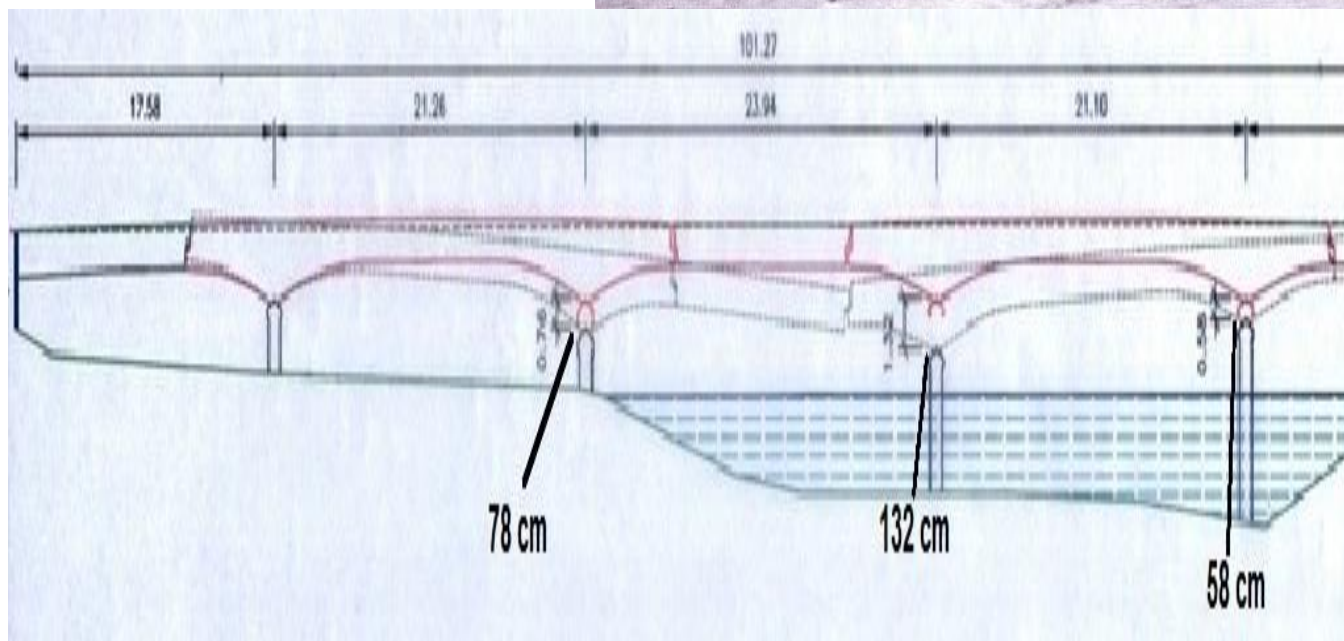
- هدایت آب های ناشی از سیلاب به سمت پایه های میانی پل
- تغییر وضعیت بارگذاری بر روی پل به علت سیلاب

عوامل سازه ای

- خارج شدن عرشه پل از حالت تعادل
- نشست نامتقارن پایه های کناری

مورد عملی شماره ۶- پل بتنی عابر پیاده بابلسر

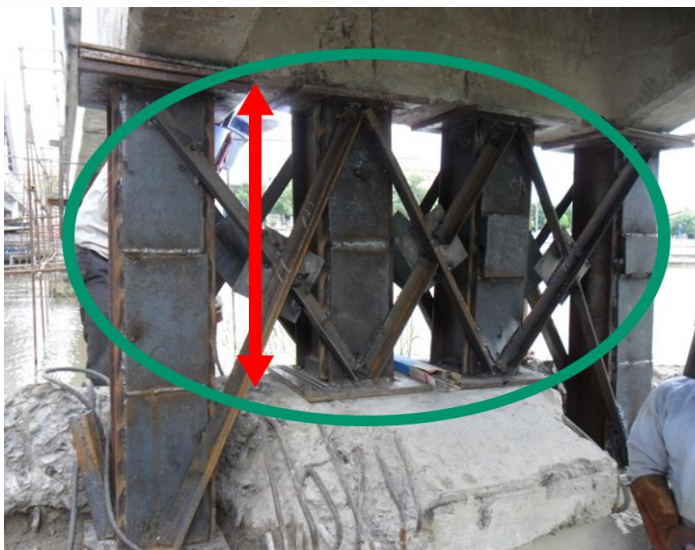
تصویر پل شکسته عابر
پیاده بابلسر بعد از
سیلاب ۱۹۶۴



میزان نشست نامتقارن در
هر یک از پایه های پل بعد
از سیلاب ۱۹۶۴

مورد عملی شماره ۶- پل بتنی عابر پیاده بابلسر

عملیات مرمت پل



۵. ترمیم و تقویت

5. Retrofit & Strengthening

روش‌های کلی تعمیر و تقویت

راهکارهای اجرایی جهت بهسازی و ترمیم زیرسازه

- اصلاح خاک کف و اطراف پی
- اصلاح هندسه پی
- اصلاح پیوستگی پی با روسازه
- ارتباط پی با پی‌های مجاور
- ارتباط پی با زمین
- ارتباط پی با روسازه

بهسازی خاک

راهکارهای پیش رو در مواجهه با خاک‌های مسئله‌دار در پروژه‌ها:

• اجتناب از محل مورد نظر برای پروژه

• طراحی سازه مورد نظر متناسب با شرایط موجود

• برداشت و جایگزینی خاک مسئله‌دار

• تلاش برای تغییر خصوصیات خاک موجود

• Soil Improvement

• Soil Treatment

• Soil Stabilization

• Ground Modification

بهسازی خاک

بیش از ۵۰ روش بهسازی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به ۵ کلاس عمده زیر تقسیم نمود:



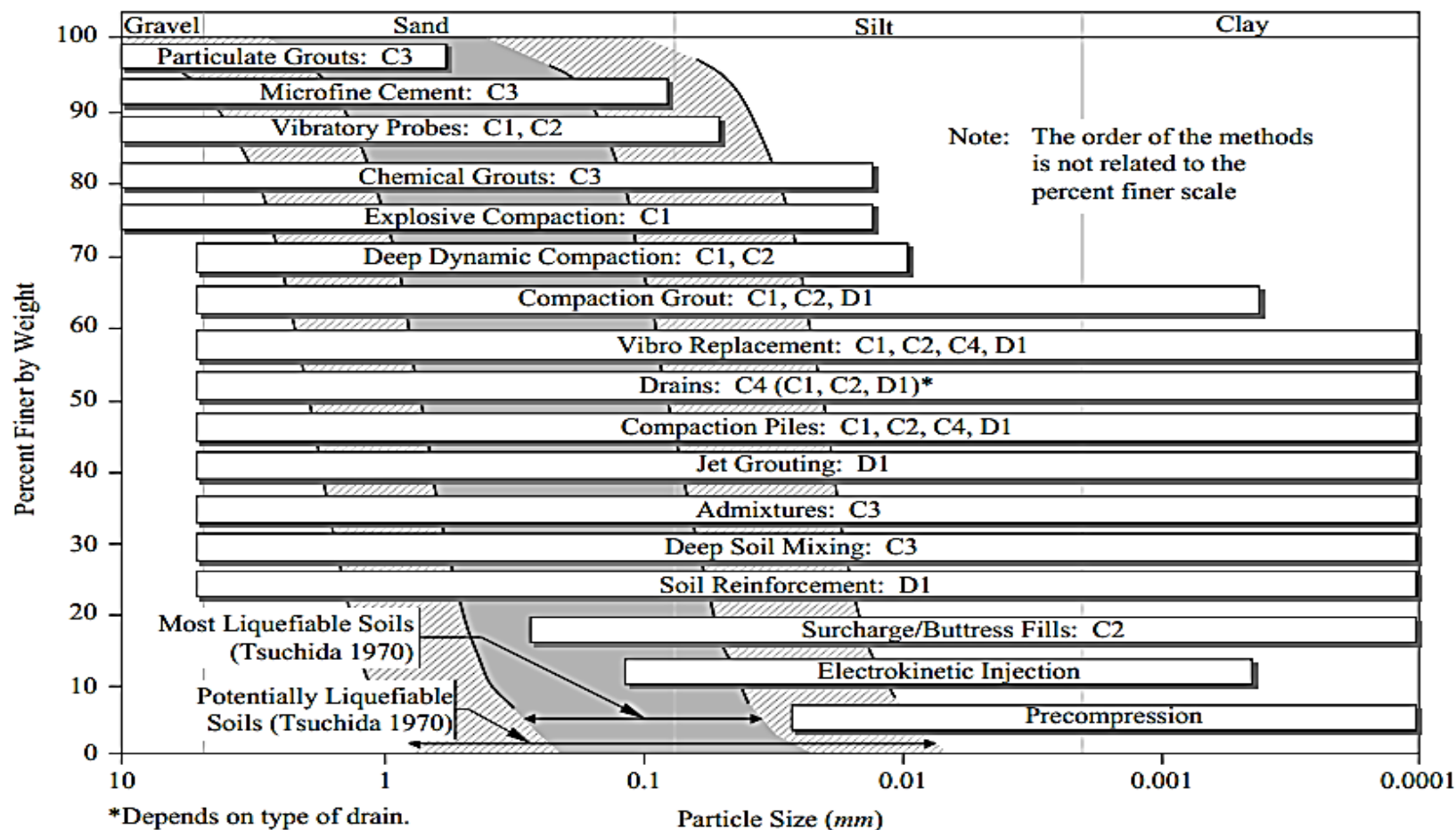
بهسازی خاک

روش‌های معمول

General Soil Treatment Methods

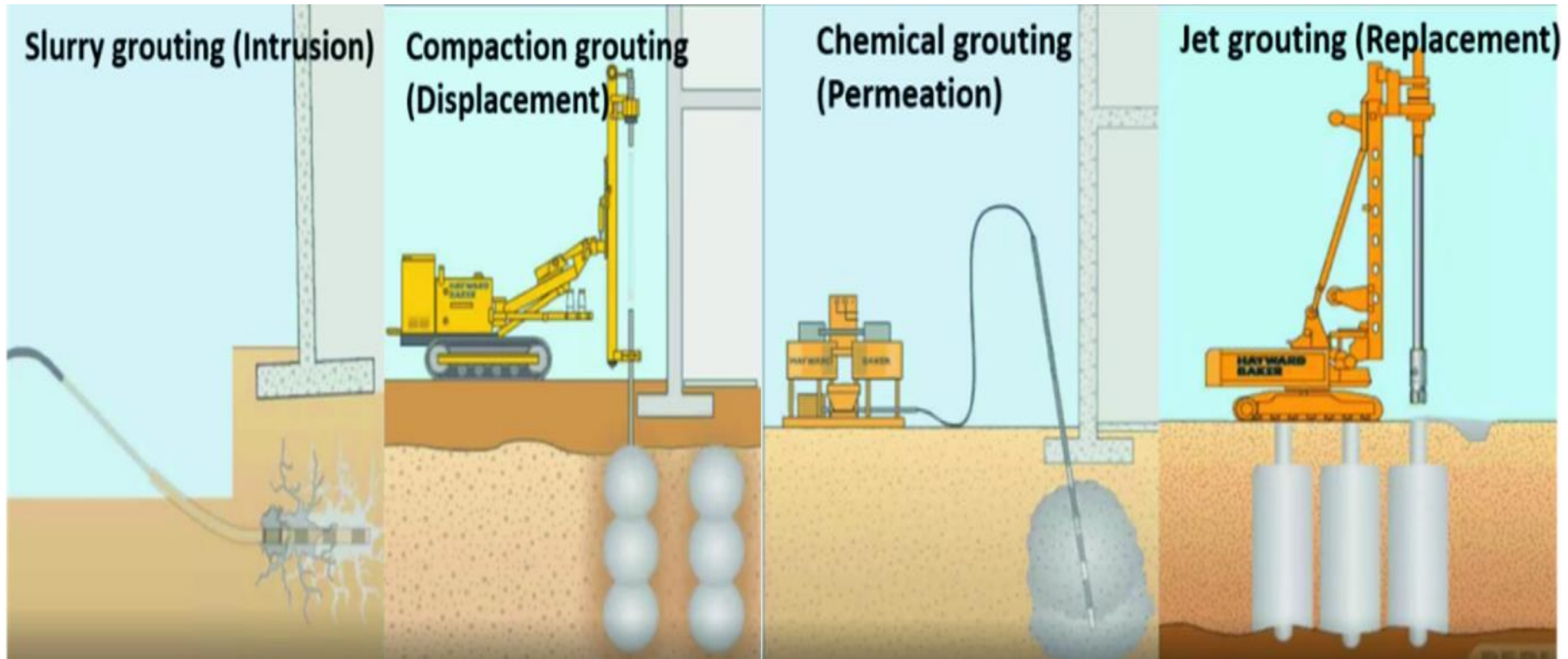
1	Sheet piling	11	Sump pumping	21	Surcharge fills	31	Soil nailing
2	Slurry trenches	12	Wellpoint systems	22	Pre-wetting	32	Cement-clay grouts
3	Diaphragm walls	13	Bored shallow wells	23	Hydrocompaction	33	Silicate grouts
4	Bored pile walls and secant piles	14	Deep-bored filtre wells	24	Vibrocompaction	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

بهسازی خاک



**Applicable grain-size ranges for liquefiable soil improvement methods
(Mitchell and Gallagher, 1998)**

تزریق جهت بهسازی خاک و اصلاح کجی پی



افزایش ابعاد پی موجود

مراحل اجرای راهکار افزایش ابعاد فونداسیون به شرح زیر می‌باشد:

۱. خالی کردن اطراف پی از تراز روی آن تا تراز زیر بتن مگر به اندازه عرضی بیشتر از عرض مورد نیاز مقاوم‌سازی
۲. مضرس کردن سطح بتن در بالا و وجوه عمودی شالوده
۳. ایجاد سوراخ‌های افقی در اطراف شالوده برای کاشت شاخک (میخچه) در صورت لزوم
۴. اجرای بتن مگر اضافی در ناحیه افزایش ابعاد
۵. تمیز و مضرس کردن سطوح تماس اجرای چسب پلیمری بر روی سطوح نمایان پی
۶. اجرای آرماتورهای اضافی به روش کاشت میلگرد و آرماتور برای بتن مسلح جدید مطابق نقشه‌های اجرایی
۷. اجرای بتن جدید
۸. جدا کردن قالب‌ها و مراقبت از پی با پوشاندن سطح بتن با گونی‌های خیس (هرگز نباید پی را مستقیماً با آب خیس نمود، زیرا منجر به شستن لایه‌های زیر آن می‌شود)
۹. مقاوم‌سازی ستون با ژاکت (در صورت لزوم)
۱۰. پرکردن مجدد پی ترجیحاً با خاک‌های درشت‌دانه در لایه‌های مختلفی که کاملاً متراکم شده باشند.
۱۱. کامل کردن کف و سنگ فرش روی پی

مراحل افزایش ابعاد پی موجود



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

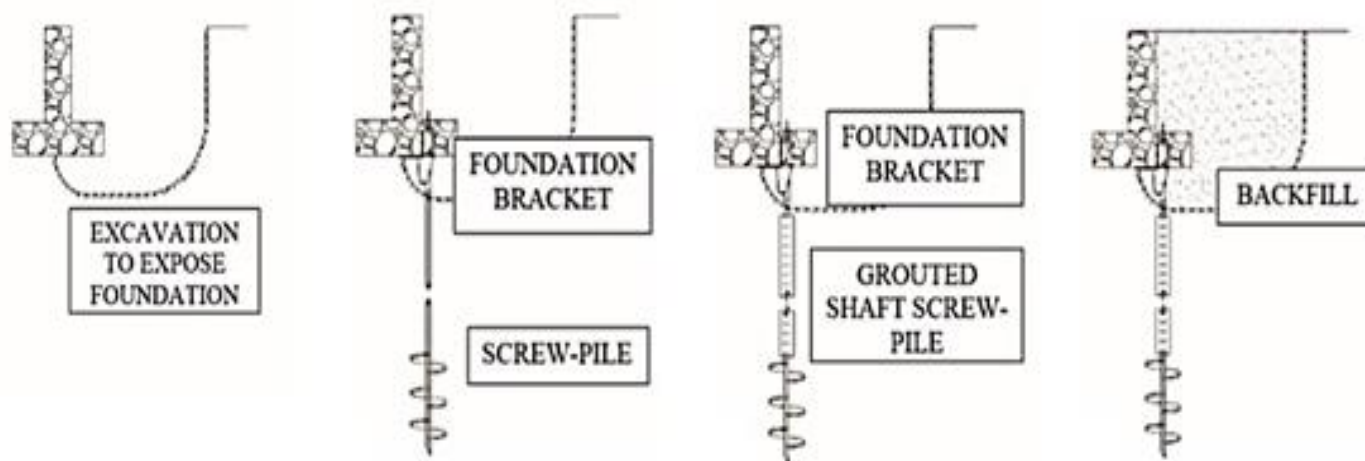
Foundation sectional enlargement: a) excavation around the footing, b) drilled holes, c) inserted dowels bars, d) plain concrete in the extended area, e) reinforcement bars arranged surrounding the footing, and f) fresh concrete cast in the enlarged area of the footing (Zumrawi & Aldawi, 2019)

افزایش ابعاد پی موجود

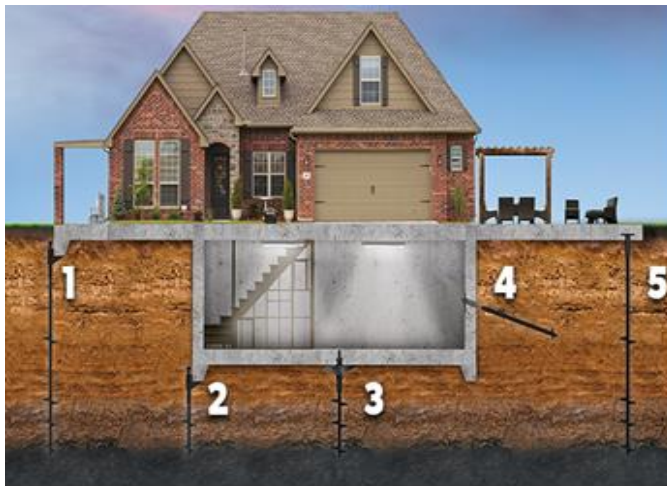
نمونه هایی از افزایش ابعاد پی موجود



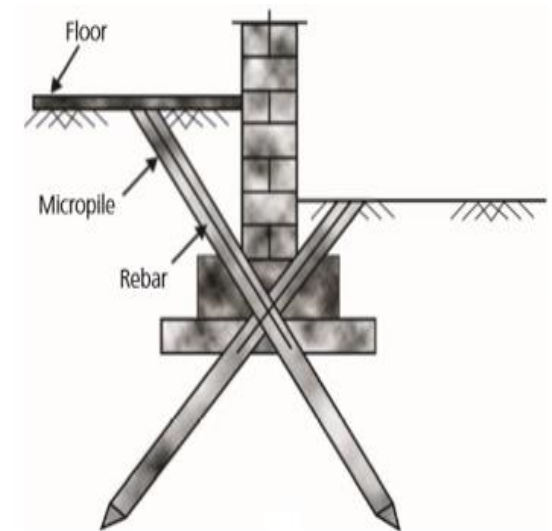
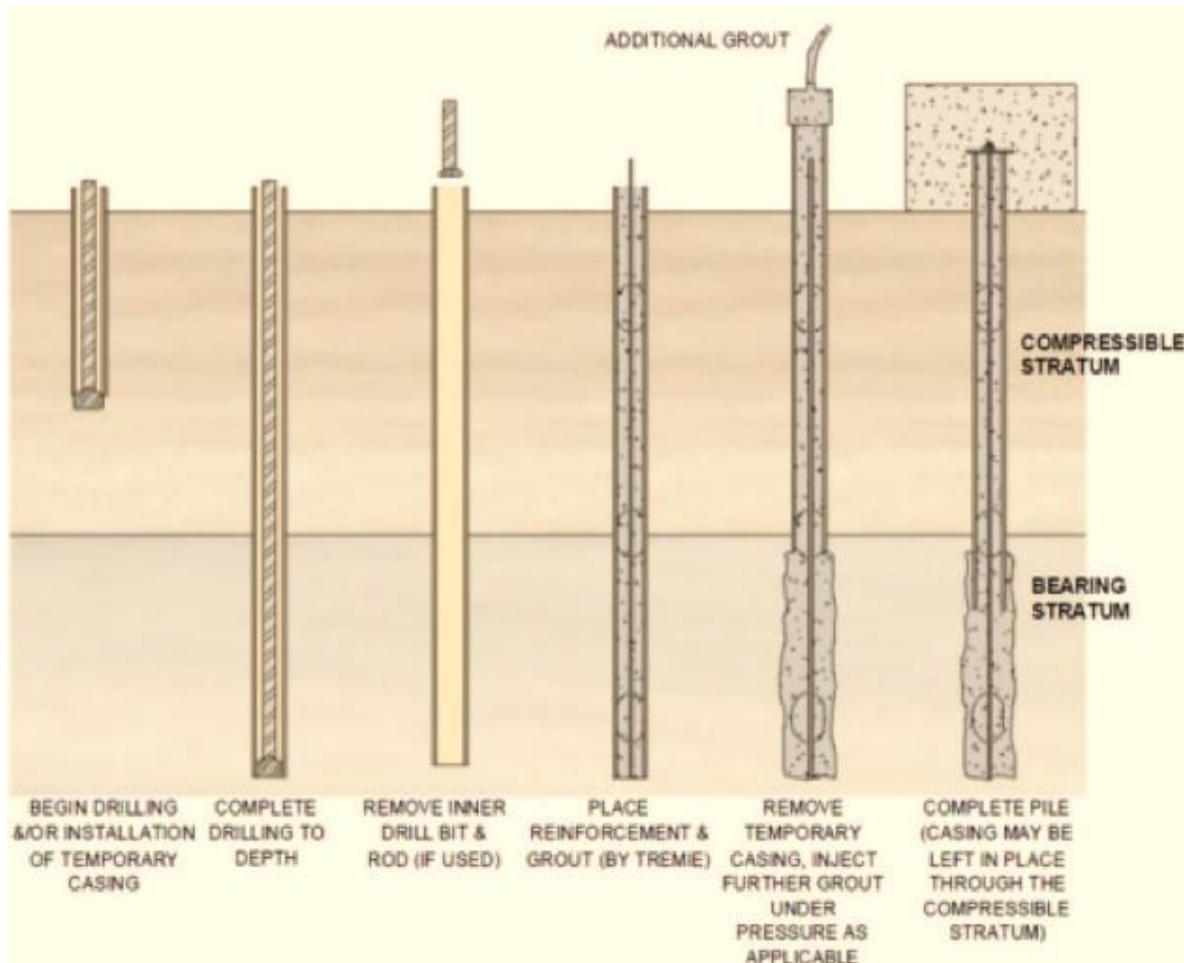
استفاده از شمع های پیچی - پر های (هلیکال)



Sequence of the helical pile underpinning of existing foundations (Lutenegger & Kemper, 2008) and performing helical piles



استفاده از ریزشمع (میکروپایل)



مورد عملی شماره ۷- شمال ایران (استفاده از شمع درجا)

کج‌شدگی و پانچ ستون ساختمان ۵ طبقه

❖ عوامل موثر در وقوع پانچ و کج‌شدگی:

- وجود لایه ضعیف در بستر فونداسیون
- ضخامت کم فونداسیون
- ناهمگونی خاک
- کمبود فاصله مناسب بین لبه ستون تا لبه پی
- انباشت بار حاصل از مصالح ساختمانی در قسمت جلویی طبقات ساختمان

❖ راه کار اجرایی:

- اجرای ستون‌های موقت و ژاکت فولادی تقویت ستون‌ها
- اجرای شمع و اتصال به فونداسیون
- اجرای شاسی‌کشی و جکینگ جهت شاقولی نمودن ستون‌ها
- اجرای مش تقویتی با اتصال به فونداسیون رادیه

مورد عملی شماره ۷- شمال ایران (استفاده از شمع درجا)

کج شدگی و پانچ ستون ساختمان ۵ طبقه



مورد عملی شماره ۸ – شهر مکزیکوسیتی (عوارض همجوار سازی و وجود خاک مسئله‌دار)

Shelly et al. (1997)

کلیسای El Sagrario و Metropolitan



مورد عملی شماره ۸- شهر مکزیکوسیتی (عوارض همجوار سازی و وجود خاک مسئله دار)

کلیسای El Sagrario و Metropolitan

دلایل محتمل نشست:

- لوله های زهکش عمیق و تونل مترو
- تحکیم لایه رسی

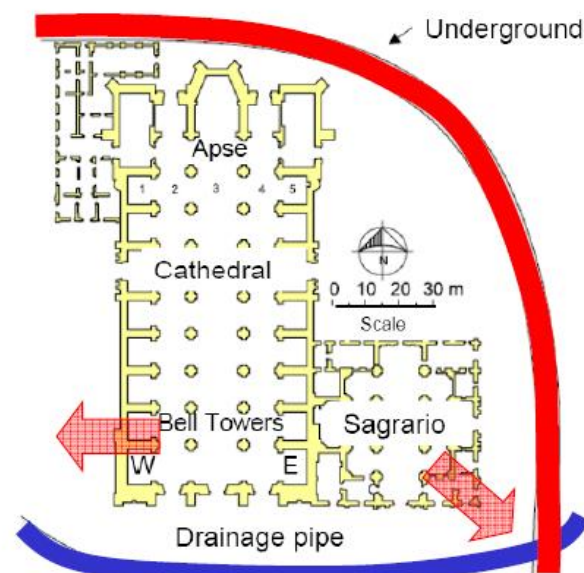
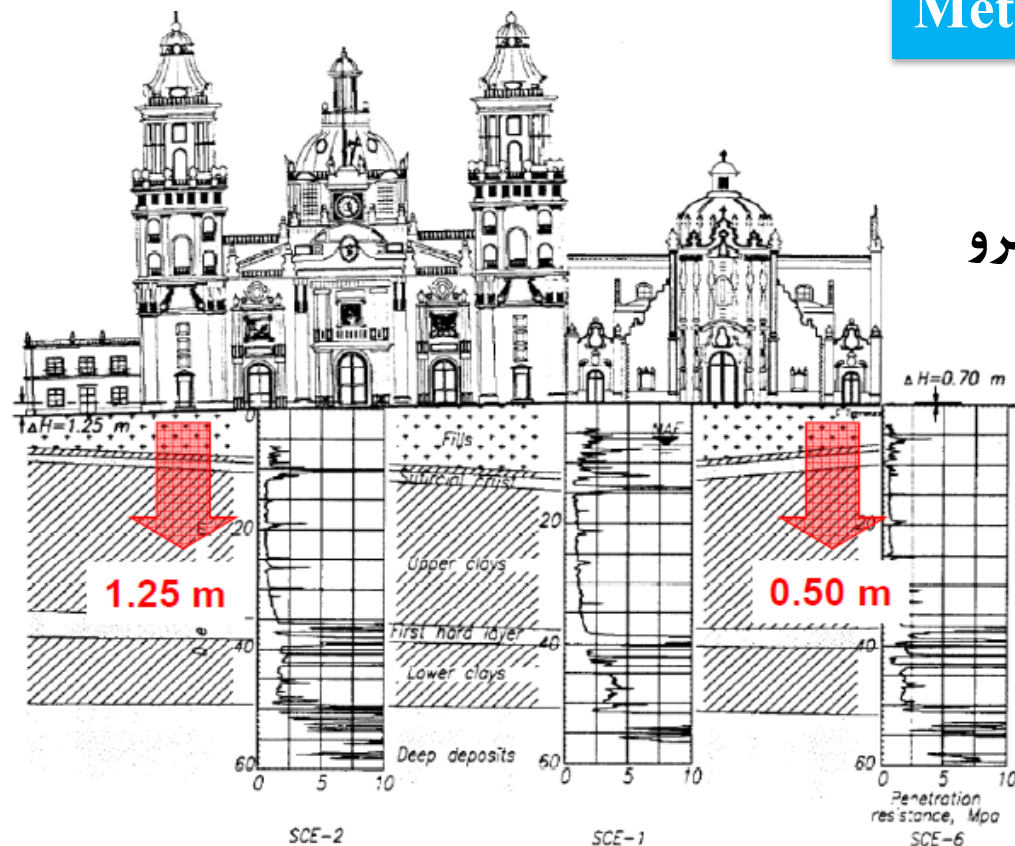


FIG. 2. Results of CPT Borings and Stratigraphical Cross Section along Cathedral's and Sagrario's Southern Atrium

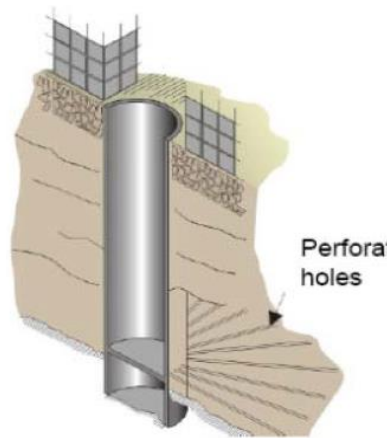
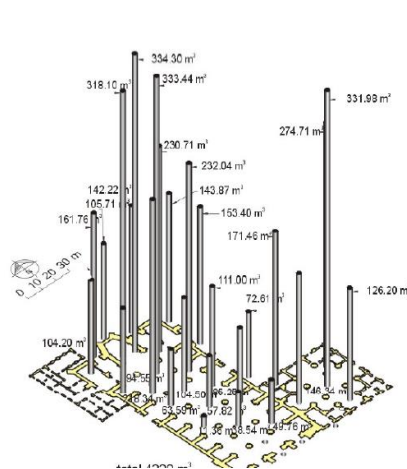
مورد عملی شماره ۸ – شهر مکزیکوسیتی (عوارض همجوار سازی و وجود خاک مسئله‌دار)

Shelly et al. (1997)

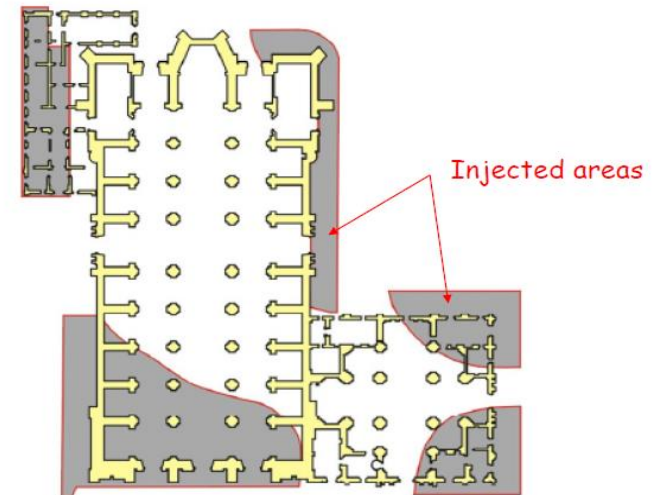
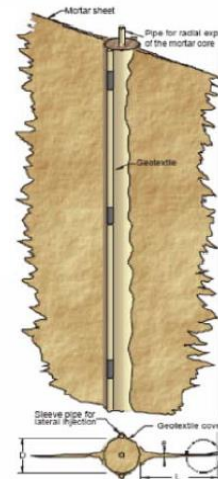
کلیسای El Sagrario و Metropolitan

راهکارها:

- Addition of 1500 piles
- Construction of 240 shafts some 60 m deep and 2.4 m in diameter
- Construction of an impervious barrier along with water injection walls
- Underexcavation (2200 m^3 of soil)



A vertical shaft



۶. جمع‌بندی و چشم‌انداز

6. Summary & Prospect

جمع‌بندی

❖ **مهندسی ژئوتکنیک:** ❖ **Geotechnical Engineering:**

- مشتمل بر مصالح طبیعی و مصنوعی
- داده‌محور و دانش‌بنیان
- از ارکان مهندسی پی
- لزوم بهره‌بردن از ژئوسیستم‌ها
- میدانی و عملیاتی

❖ **سیستم فونداسیون:** ❖ **Foundation System:**

- اجزای سازه‌ای
- عنصر پی
- مصالح خاکی و سنگی پیرامون

❖ طبقه‌بندی متداول پی‌ها: Conventional Classification: ❖

- پی‌های اصلی: سطحی و عمیق
- پی‌های حد واسط: بهسازی و نیمه‌عمیق

❖ Novel Categorization:

❖ نگرش نوین:

مکانیزم انتقال بار:

فرم هندسی:

- | | |
|-----------------------------|---------------------|
| • برداری (Vector-acting) | • خطی (Linear) |
| • مقطعی (Section-acting) | • صفحه‌ای (Planar) |
| • پوسته‌ای (Surface-acting) | • حجمی (Volumetric) |
| • بلوکی (Block-acting) | |

جمع‌بندی

❖ ملاحظات طراحی بهینه: Optimum Design: ❖

- نوع، ابعاد و ترکیب بارهای روسازه
- سنتز داده‌ها و اطلاعات ژئوتکنیکی شالوده
- شرایط پیرامونی و آتی
- کنترل عملکرد با آزمایش‌های بارگذاری در مراحل مختلف
- بازنگری ضریب اطمینان از حدود ۳ به ۲

❖ چالش‌ها: Challenges : ❖

- توسعه ساخت و ساز در زمین‌های متروکه
- ساختمان‌های بلند و سازه‌های خاص
- ملاحظه شرایط محیطی غیرعادی و همجوارسازی
- ملاحظات زیست‌محیطی و توسعه پایدار
- **People**
- **Planet**
- **Profit**

جمع‌بندی

❖ عوامل خرابی‌ها و آسیب‌های پی:

❖ Causes of Failures & Damages:

- ژئوتکنیکی
- سازه‌ای
- اجرایی
- محیطی

❖ تعمیر و تقویت پی: ❖ Repair & Retrofit:

- اصلاح خاک بستر (بهسازی خاک)
- اصلاح هندسه پی یا افزودن المان‌ها
- تقویت اتصال پی به روسازه

Advanced Foundation Engineering;

Principles, Performance & Prospect

By:

Dr. Moses Karakouzan

Dr. Abolfazl Eslami

TOPICS		SECTIONS		CHAPTERS	
A	Background	I	Context	1	An Introduction to Foundation Engineering
				2	Performance Based Design and Sustainability
		II	Geotechnical Engineering	3	Geotechnical Site Investigation
				4	Soil and Rock Parameters for Foundations
B	Shallow Foundations	III	Spread Footings and Mats	5	Types and Construction Methods
				6	Geotechnical Design Aspects
				7	Structural Analysis and Design
		IV	Ground Modifications	8	Difficult Soils and Improvements
				9	Foundations on Stabilized Soils
C	Semi-Deep Foundations	V	Hybrid, Floating and Shell Foundations	10	Types and Construction Approach
				11	Hybrid and Skirted Foundations
				12	Floating (Balanced) Foundations
				13	Shell Foundations
D	Deep Foundations	VI	Single Piles and Drilled Shafts	14	Types and Installation
				15	Geotechnical Design
				16	In-Situ Penetration Testing Applications
				17	Lateral Loading and Structural Aspects
		VII	Group Actions & Extreme Conditions	18	Combined Loading and Pile Group
				19	Piled Raft Foundations
				20	Performance under Extreme Conditions
E	Complementary Issues	VIII	Testing & Numerical Approaches	21	Full Scale Load Testings and Inspections
				22	Numerical Analysis
F	Recent Advances and Developments	IX	Trends and Prospects	23	Uncertainty and Reliability
				24	LRFD Approach and Codes Review
				25	Data Mining-Based Design
		X	Sustainable Development	26	Foundation Damages; Preventions and Repair
				27	Foundation Selection & Value Engineering

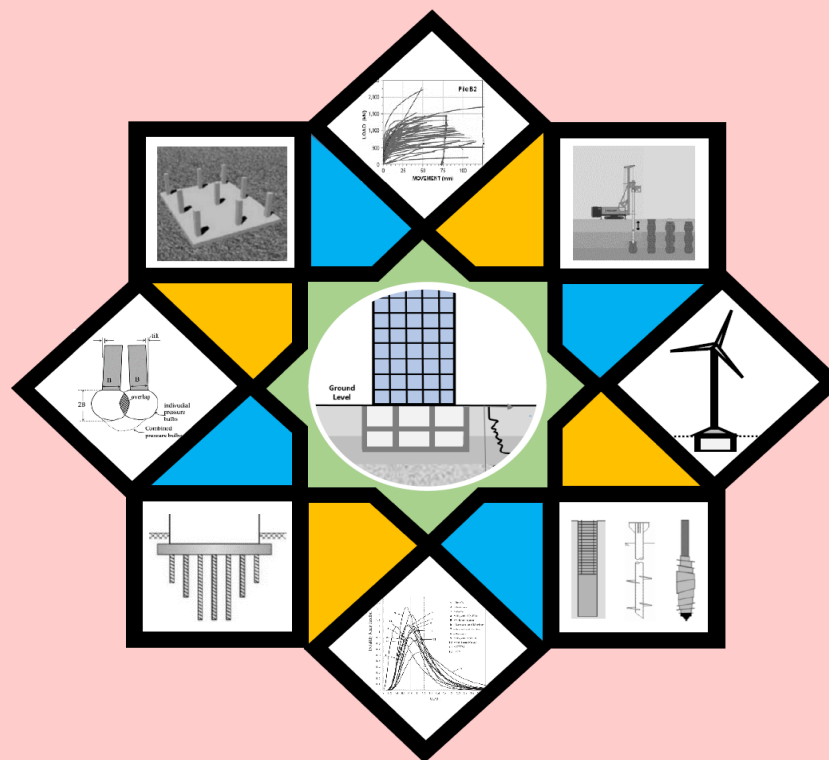
چشم‌انداز

Issues & Novel Points

مباحث شاخص و بارز

- New Insight of Foundations Classification
 - Special Semi-Deep Foundation
 - Foundations on Stabilized Soils
 - In-Situ Tests Application in Design
 - Deep Foundations under Extreme Conditions
 - Performance of Piled Raft Foundations
 - Uncertainties and Probabilistic Approach
 - Failures & Damages of Foundations
 - Foundation Repair, Retrofit & Reuse
 - Foundation Selection Criteria
- نگرش نوین در طبقه‌بندی پی
 - پی‌های خاص نیمه‌عمیق
 - فونداسیون بر بسترهای بهسازی شده
 - کاربرد آزمایش‌های درجا در ژئوتکنیکی
 - رفتار پی‌های عمیق در شرایط خاص
 - عملکرد سیستم پی رادیه – مرکب
 - عدم قطعیت و مباحث احتمالاتی
 - خرابی و آسیب‌های پی‌ها
 - تعمیر، تقویت و استفاده مجدد از پی موجود
 - معیارهای انتخاب سیستم بهینه

Advanced Foundation Engineering; Principles, Performance and Prospect

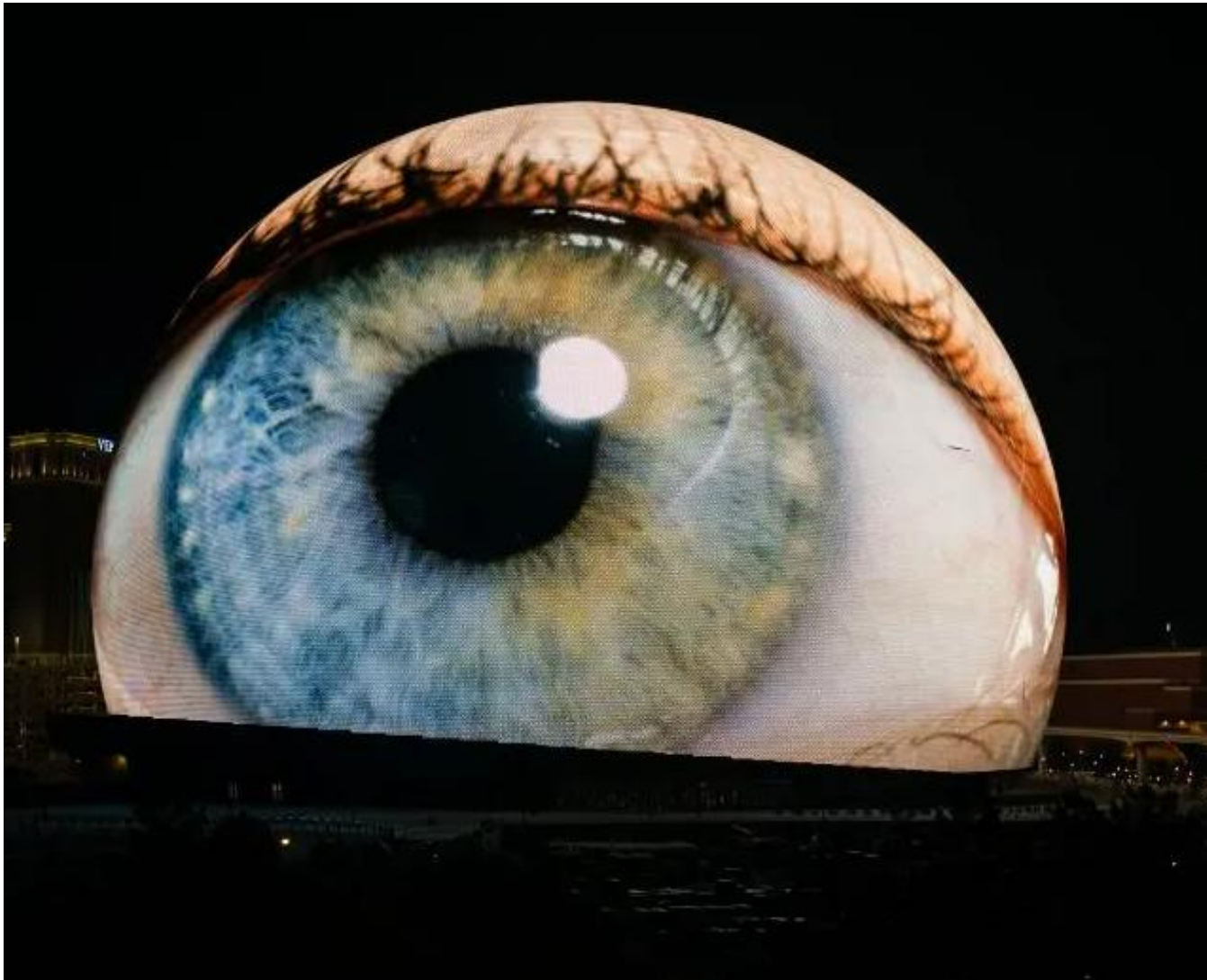


Dr. Moses Karakouzian

Dr. Abolfazl Eslami

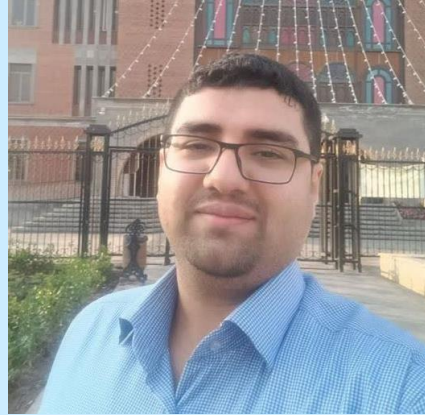
WILEY 2024

چشم‌انداز ...



با تشکر ویژه از:

مهندس امیر حسین ابراهیمی پور



با تقدیر از:

مهندس مهدی غلامی آهنگران



مهندس دنیا افشار



دکتر سارا حیدری کلفزانی



با سپاس از همراهی و التفات شما

Thanks for Your Attention

abolfazleslami.com / Link