



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
دانشگاه صنعتی سیرجان



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
دانشگاه صنعتی سیرجان

# بهبودی خاک

## فصل نهم: تزریق و اختلاط عمیق

دکتر علی رضا غنی زاده

استادیار دانشگاه مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سیرجان

### مقدمه



- ✓ افزودنی‌های شیمیایی می‌توانند آهک، سیمان، ژل حاوی سیلیکات و محلول‌های شیمیایی باشند.
- ✓ دو روش کلی برای وارد نمودن و ترکیب افزودنی‌ها به خاک وجود دارد که عبارتند از اختلاط و تزریق.
- ✓ در روش اختلاط از مخلوط‌کن‌های مکانیکی یا مته زنی استفاده می‌شود.
- ✓ در روش تزریق از لوله‌های تزریق با فشار بالا استفاده می‌شود.
- ✓ اختلاط می‌تواند در نزدیکی سطح زمین (عمدتاً برای بهبود مصالح اساس و زیراساس) و یا در عمق (برای تشکیل ستون یا دیوار) انجام شود.

© Ali Reza Ghanizadeh

## اختلاط عمیق

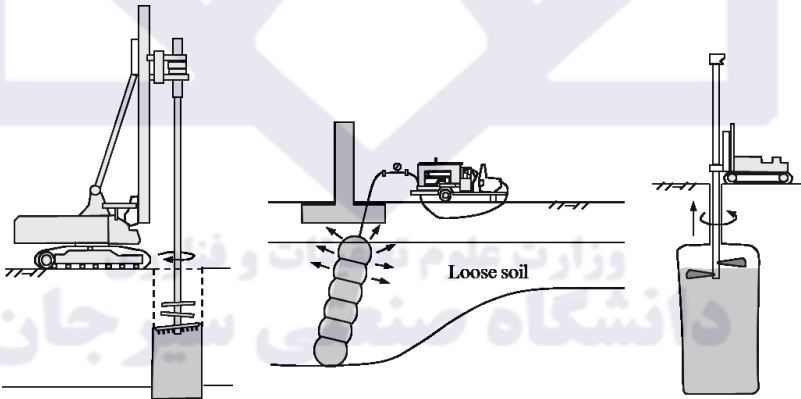


۴

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## مقدمه



(a) Deep mixing

(b) Grouting

(c) Jet grouting

۳

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

### روش های مختلف اختلاط عمیق

The diagram illustrates three methods of deep soil mixing:

- Wet Method:** Shows a vertical shaft with a nozzle at the bottom. Labels include "Wet Method", "Blades", "Nozzle", and "Slurry". Below it is a box with the Persian text "روش مرطوب" and the number "۵".
- Dry Method:** Shows a vertical shaft with a mixing head at the bottom. Labels include "Dry Method" and "Powder". Below it is a box with the Persian text "روش خشک" and the Persian text "پهسازی خاک".
- Cutter Soil Mixing:** Shows a vertical shaft with a mixing head featuring two large cutters. Labels include "Cutter Soil Mixing" and "اختلاط خاک به روش برش". Below it is a box with the Persian text "دانشگاه صنعتی سیرجان".

### انواع مخلوط کردن عمیق

The diagram illustrates two types of deep mixing:

- T-shape Deep Mixing:** Shows a vertical shaft with a T-shaped mixing head. Labels include "Foldable blades" and "اختلاط T شکل". Below it is a box with the Persian text "T-shape Deep Mixing" and the number "۶".
- Stiffened DM Column or Composite Column:** Shows a vertical shaft with a rigid inclusion inside. Labels include "Rigid inclusion" and "DM column". Below it is a box with the Persian text "ستون سخت DM یا ستون کامپوزیت" and "Stiffened DM Column or Composite Column". Below this box is a box with the Persian text "پهسازی خاک" and "دانشگاه صنعتی سیرجان".

© Ali Reza Ghanizadeh

## انواع اختلاط عمیق

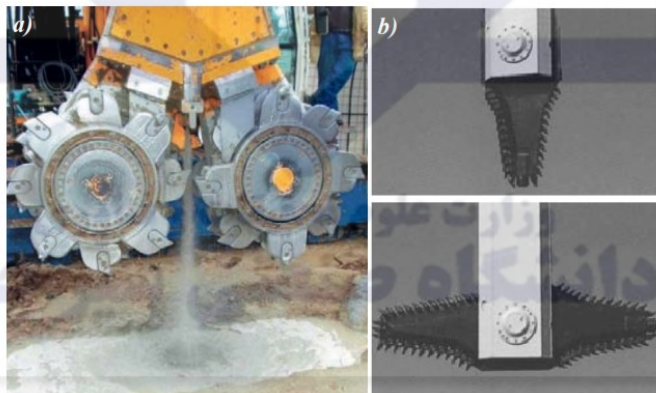


Sirjan University of Technology

Ground Improvement

7

## انواع اختلاط عمیق



Sirjan University of Technology

Ground Improvement

8

© Ali Reza Ghanizadeh

## انواع اختلاط عمیق



Sirjan University of Technology

Ground Improvement

9

## انواع اختلاط عمیق



Sirjan University of Technology

Ground Improvement

10

© Ali Reza Ghanizadeh

## خاک مناسب جهت اختلاط عمیق



اختلاط عمیق معمولاً برای بهسازی مشخصات خاک‌های چسبنده نرم استفاده می‌شود، اما گاهی اوقات برای کاهش نفوذپذیری و کاهش پتانسیل روانگرایی خاک‌های غیرچسبنده نیز بکار می‌رود.

Property	Favorable Soil Chemistry
pH	Should be greater than 5
Natural water content	Should be less than 200% (dry method) and less than 60% (wet method)
Organic content	Should be less than 6% (wet method)
Loss on ignition	Should be less than 10%
Humus content <sup>a</sup>	Should be less than 1.0%
Electrical conductivity	Should be greater than 0.04 mS/mm

۷۰ متر در کار دریایی و  
۳۰ متر برای عملیات زمینی.

گیاه‌خاک (Humus): بخش ترکیب آلی خاک است. گیاه‌خاک باقیمانده گیاهان و اجساد جانوران پس از مرگ آنها است.

۷

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## کاربرد اختلاط عمیق



- ✓ حفاظت از انواع سازه های فوقانی، از جمله ساختمان‌ها و خاکریزها
- ✓ کاربردهای دریایی و اسکله‌سازی
- ✓ تثبیت شیروانی‌ها،
- ✓ حفاظ جانبی به عنوان دیوار نگهبان
- ✓ مهار آب و آلودگی
- ✓ کاهش پتانسی روانگرایی
- ✓ کاهش ارتعاش
- ✓ تعریض جاده برای حفاظت از خاکریزها
- ✓ کاهش تورم زمین ناشی از وجود خاک‌های متورم شونده

۸

بهسازی خاک

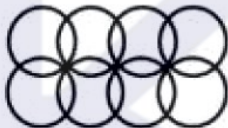
دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## الگوهای اجرایی اختلاط عمیق



**ستون‌های تکی** معمولاً برای افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست بکار می‌روند.



**الگوی بلوکی** بیشتر برای بهبود ثبات سازه‌های دریایی بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد.  
**الگوی بلوکی** همچنین برای محصور نمودن مواد زائد و جلوگیری از نشست مواد شیمیایی خطرناک به خاک اطراف بکار می‌رود.

۹

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## الگوهای اجرایی اختلاط عمیق



**الگوی پانل یا دیوار** به طور معمول به عنوان دیوار حائل برای حفاظت جانبی، دیوار آبنند جهت ممانعت از تراوش، دیوار مانع برای محدود کردن مواد زائد، یا دیواری عمود بر محور خاکریز به منظور افزایش پایداری خاکریز استفاده می‌شود.



**الگوی شبکه‌ای** می‌تواند برای کاربردهای مناسب برای الگوهای دیوار و بلوک مورد استفاده قرار گیرد. کاربرد ویژه و اصلی این الگو، کاهش پتانسیل روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای است.

۱۰

بهبودی خاک

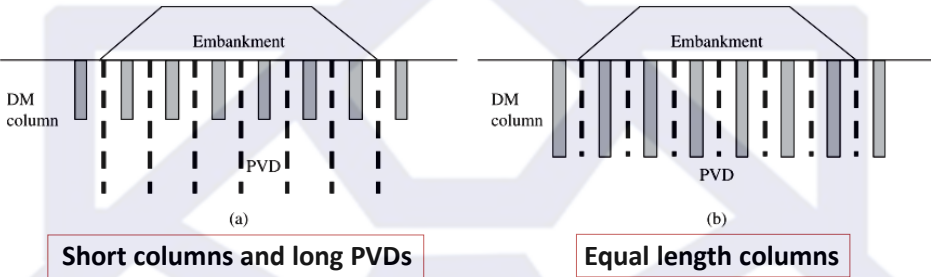
دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## کاربرد اختلاط عمیق



### Deep mixed column–PVD combined method



Sirjan University of Technology

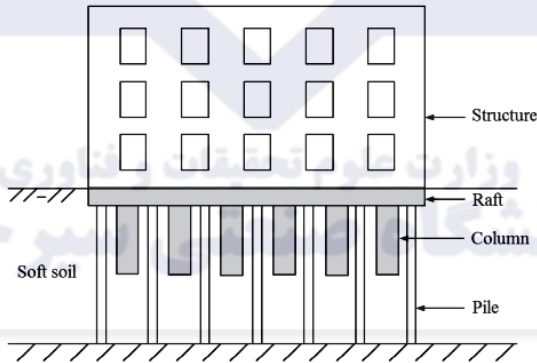
Ground Improvement

15

## کاربرد اختلاط عمیق



### Column–pile combined method



Sirjan University of Technology

Ground Improvement

16



© Ali Reza Ghanizadeh

## مزایا و محدودیت ها



### مزایای

- مناسب برای اکثر خاک‌ها
- قابلیت اجرا در عمق زیاد
- اجرای نسبتاً سریع
- سطح سر و صدا و لرزش کم
- دیوار اختلاط عمیق به صورت هم زمان به عنوان دیوار نگهدارنده و دیوار آبنده عمل می‌کند.
- تولید گل و لای کمتر در زمان اجرا

### محدودیت‌ها

- هزینه تجهیز کارگاه نسبتاً بالا
- تغییرات زیاد در کیفیت ستون
- فقدان روش‌های کنترل کیفیت استاندارد

۱۳

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## عوامل مؤثر بر خصوصیات خاک‌های تثبیت شده



### ۱. ویژگی مصالح چسباننده

- نوع چسباننده
- کیفیت چسباننده
- افزودنی
- مقدار چسباننده

### ۲. مشخصات و شرایط خاک

- خواص فیزیکی، شیمیایی و کانی شناسی
- مقدار مواد آلی
- PH آب منفذی
- درصد رطوبت

۱۴

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## عوامل مؤثر بر خصوصیات خاک‌های تثبیت شده



### ۳. شرایط عمل آوری

- درجه حرارت
- مدت عمل آوری
- رطوبت
- چرخه تر و خشک شدن یا ذوب-یخبندان

### ۴. شرایط اختلاط

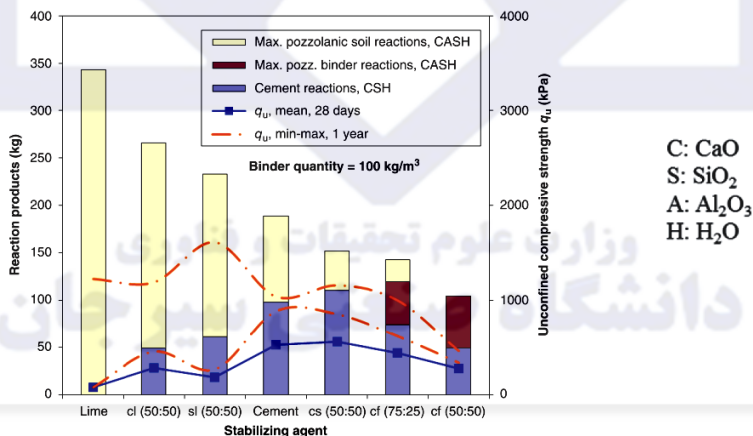
- نوع تیغه مخلوط‌کن
- درجه اختلاط
- مدت اختلاط و اختلاط مجدد
- آب اضافه شده جهت اختلاط

۱۵

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## تأثیر نوع چسباننده



۱۶

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## تأثیر نوع چسباننده



Soil type	Silt Organic Content = 0–2%	Clay Organic Content = 0–2%	Organic Soils (e.g., Gytija, Organic Clay) Organic Content = 2–30%	Peat Organic Content = 50–100%
Cement	B	C	C	B
Cement + gypsum	C	C	B	B
Cement + furnace slag	B	B	B	A
Lime + cement	B	B	C	D
Lime + gypsum	B	B	B	D
Lime + slag	C	C	C	D
Lime + gypsum + slag	B	B	B	D
Lime + gypsum + cement	B	B	B	D
Lime	D	D	B	D

*"A, very good in many cases; B, good in many cases; C, good in some cases; and D not suitable. Source: EuroSoilStab (2001).*

۱۷

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## تأثیر مقدار چسباننده



درصد وزنی چسباننده خشک

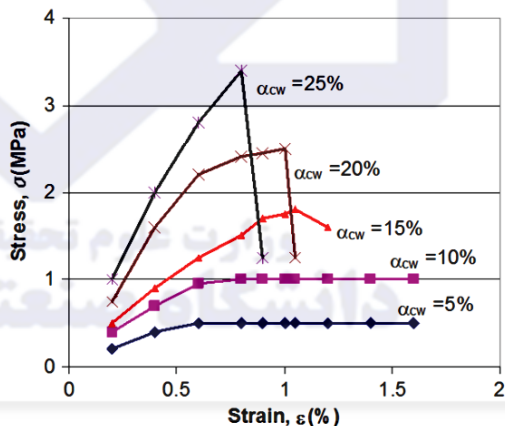
$$a_c = \frac{\text{Mass of dry binder}}{\text{Mass of dry soil}} \times 100\%$$

درصد حجمی چسباننده

$$a_{cv} = \frac{\text{Mass of dry binder}}{\text{Volume of treated soil}}$$

درصد وزنی چسباننده در حالت مرطوب

$$a_{cw} = \frac{\text{Mass of dry binder}}{\text{Mass of natural soil}} \times 100\%$$



۱۸

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## تأثیر افزودنی



✓ لیگنین  $\text{CaCO}_3$  برای کاهش آب استفاده می‌شود و بنابراین اثر ناچیزی بر مقاومت مخلوط دارد.

✓ مقدار لیگنین  $\text{CaCO}_3$  در مخلوط معمولاً ۰/۲ درصد وزنی سیمان است. افزودن گچ یا تری آمینو اتانول یا خاکستر بادی به مخلوط، سبب افزایش مقاومت مخلوط و کاهش میزان سیمان مورد نیاز می‌شود.

✓ مقدار متعارف گچ و تری آمینو اتانول مورد استفاده در مخلوط به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۰۵ درصد وزنی سیمان است.

۱۹

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## تأثیر افزودنی



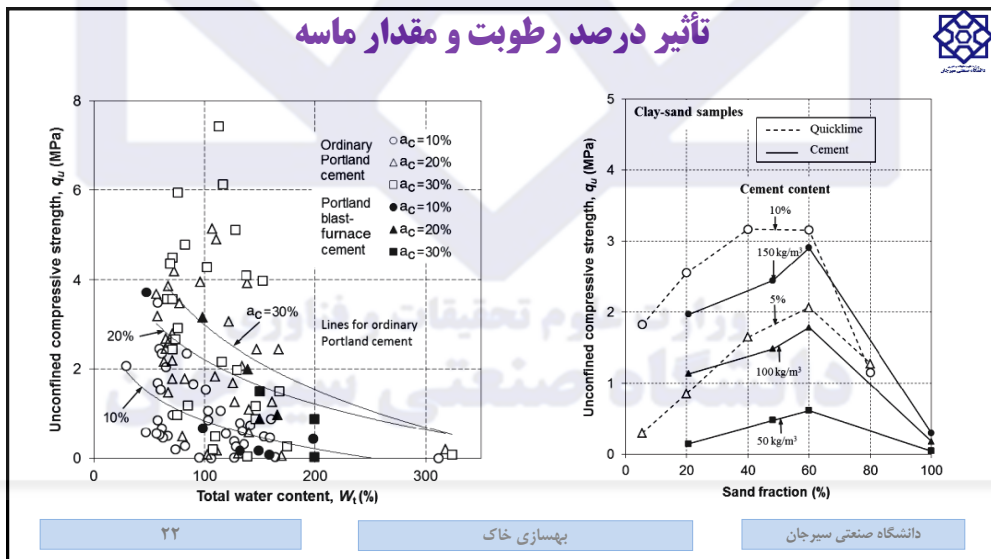
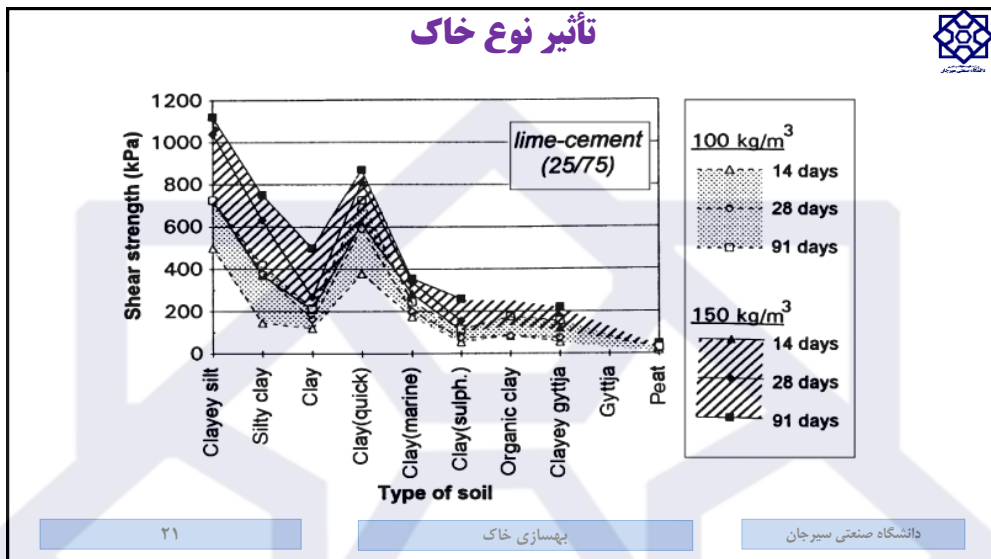
✓ استفاده از آب شیرین موجب می‌شود تا مقاومت (کمتر از ۱۰٪) بیشتر از مقاومت خاک تثبیت شده سیمان با آب دریا شود.

۲۰

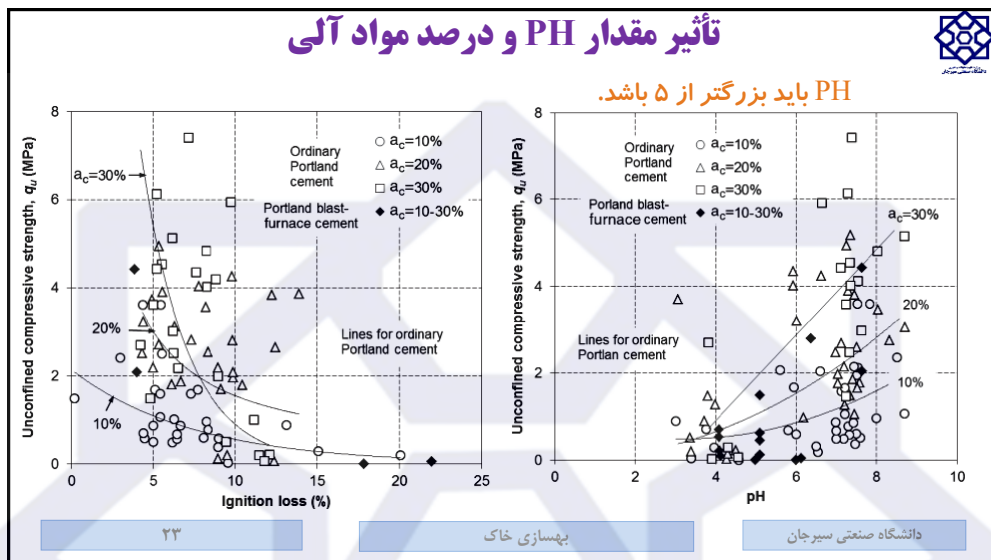
پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh



© Ali Reza Ghanizadeh



### زمان عمل آوری

طبق آیین‌نامه بهسازی خاک چین، مقاومت طراحی باید بر اساس مقاومت فشاری زهکشی نشده یک نمونه خاک تثبیت شده با سیمان که برای مدت ۹۱ روز عمل آوری شده است، تعیین شود.

Ratio	Ordinary Portland Cement	Blast Furnace Slag Cement Type B
$q_{u28}/q_{u7}$	1.49	1.56
$q_{u91}/q_{u7}$	1.97	1.95
$q_{u91}/q_{u28}$	1.44	1.20

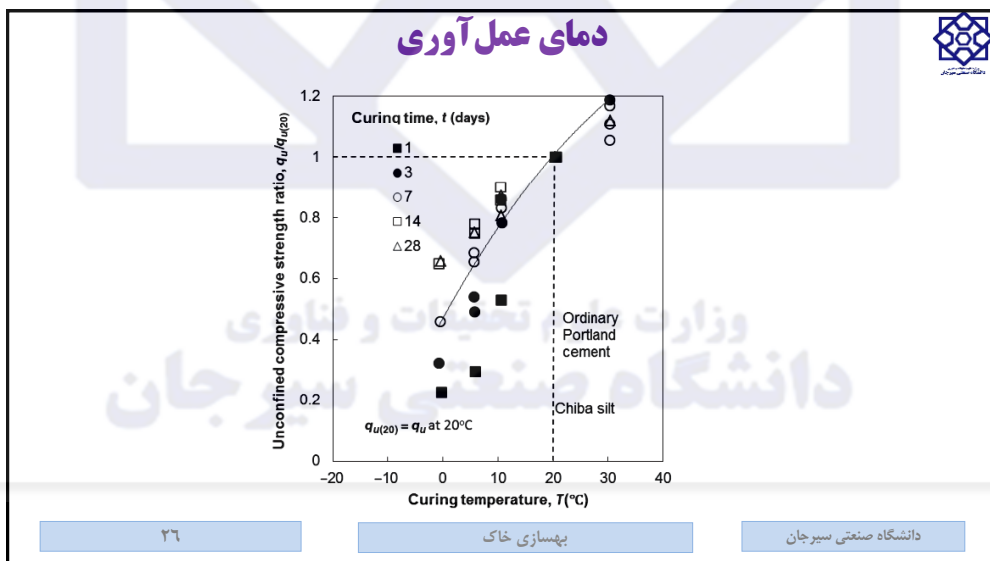
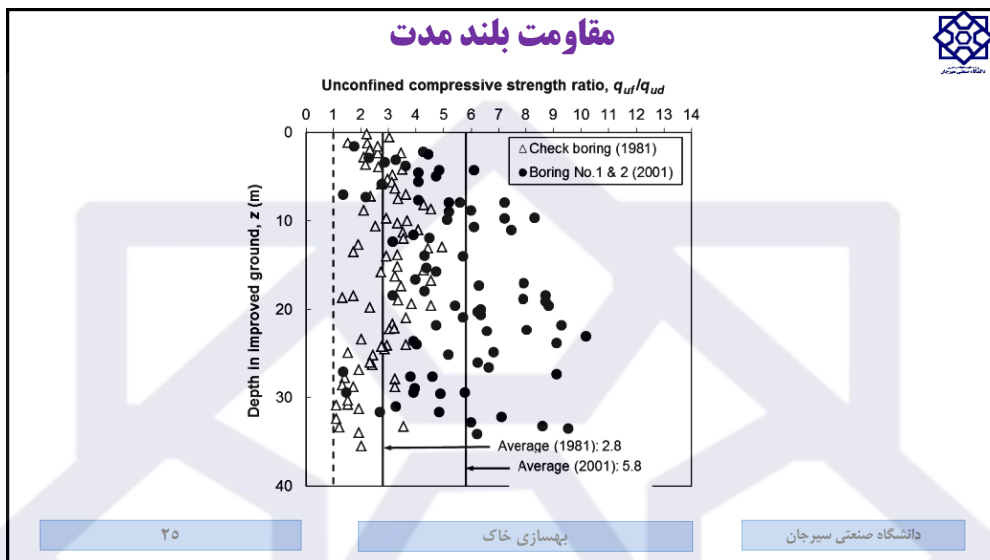
Source: Japanese Cement Deep Mixing Method Association (1999).

۲۴

بهسازی خاک

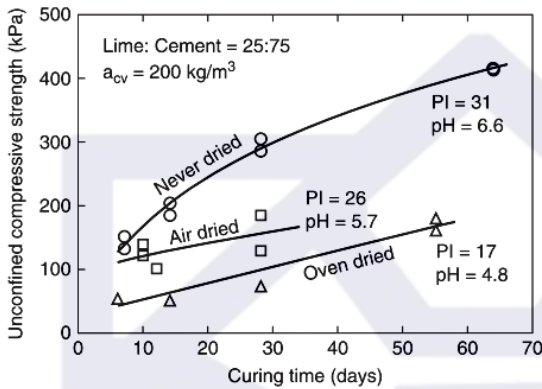
دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh



© Ali Reza Ghanizadeh

## خشک کردن و هیدراتاسیون مجدد



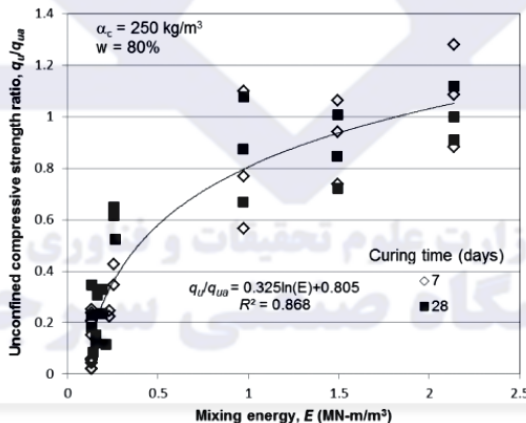
جاکوبسون و همکاران (۲۰۰۵) کاهش مقاومت را به این نسبت دادند که خشک کردن و هیدراتاسیون مجدد باعث حل بهتر مواد عالی می شود که مورد از واکنش سمتهیون جلوگیری می کند.

۲۷

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## انرژی اختلاط



۲۸

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان



© Ali Reza Ghanizadeh

## مقاومت مؤثر



✓ آونبرگ و یوهانسون (۲۰۰۵) دریافتند که میانگین چسبندگی مؤثر یک خاک تثبیت شده حدود  $0.23q_{u1}$  است.

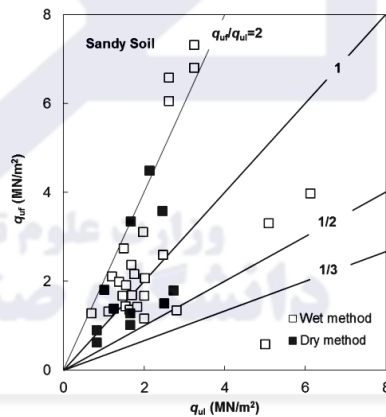
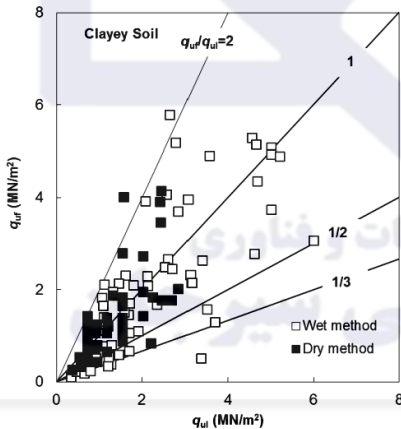
✓ متوسط زاویه اصطکاک مؤثر ۳۱ تا ۳۳ درجه است.

۲۹

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## مقاومت میدانی



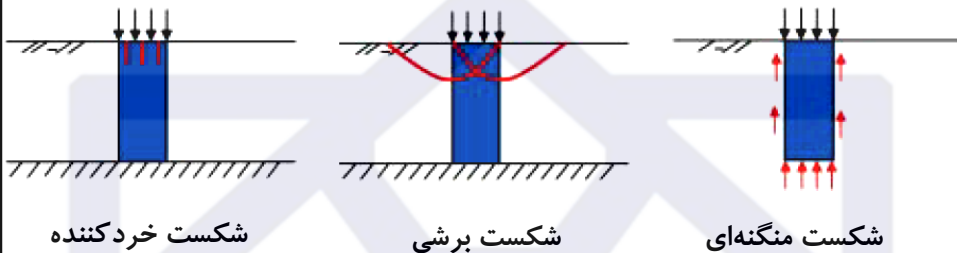
۳۰

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## مدهای شکست ستون های اختلاط عمیق تکی تحت بار عمودی



شکست خردکننده

شکست برشی

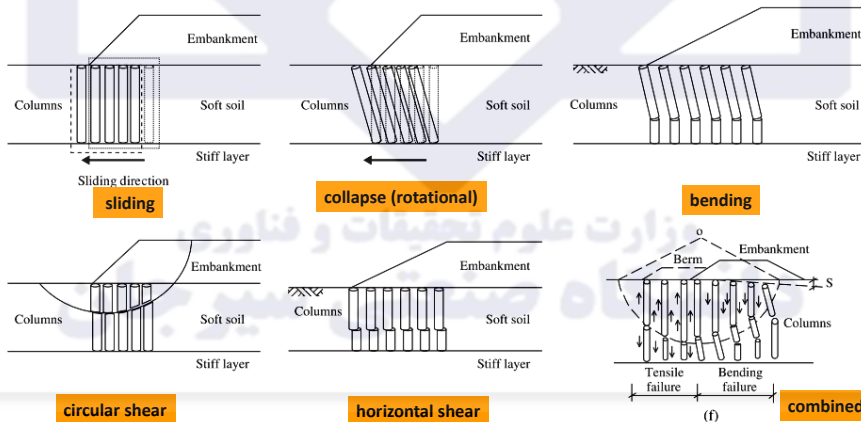
شکست منگنه‌ای

۳۱

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## حالات های شکست احتمالی ستون ها زیر خاکریز



circular shear

horizontal shear

combined

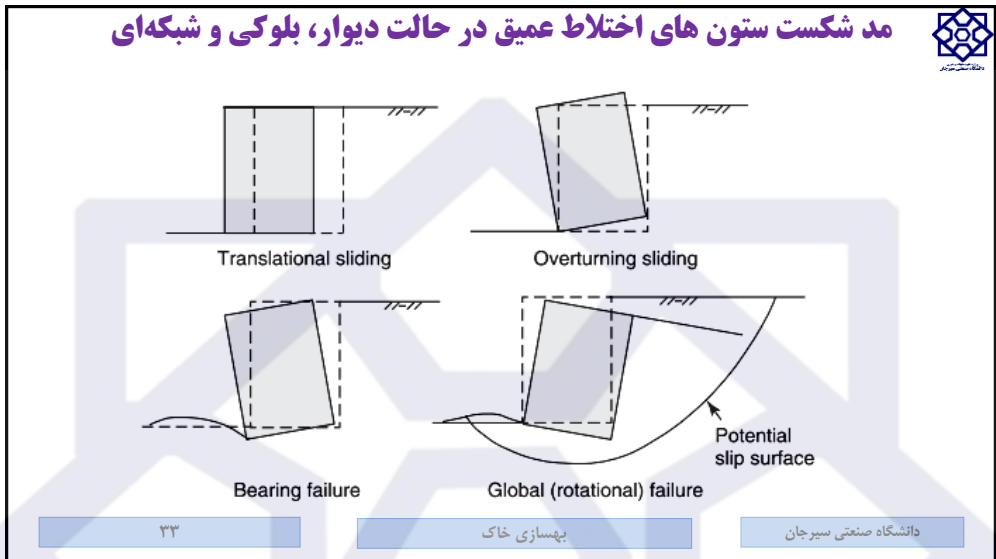
۳۲

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

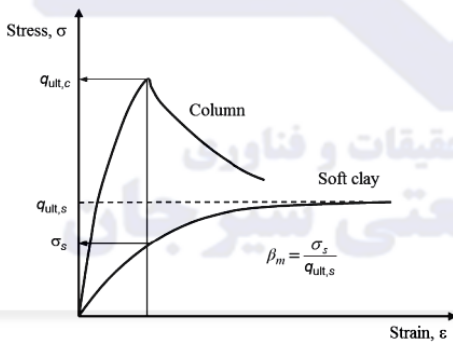
## مد شکست ستون های اختلاط عمیق در حالت دیوار، بلوکی و شبکه‌ای



## انتقال تنش



داده های میدانی نشان می دهد که نسبت تمرکز تنش برای پی های واقع بر روی خاک های مسلح شده با ستون های اختلاط عمیق بین ۵ تا ۱۰ می باشد.



ضریب بسیج شدگی ظرفیت باربری خاک

$$\beta_m = \frac{\sigma_s}{q_{ult,s}}$$

۳۴

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان



## خواص معمول خاک‌های تثبیت شده

مشخصات معمول خاک‌های تثبیت شده (روش مرطوب)

مشخصات معمول خاک‌های تثبیت شده با سیمان یا آهک (روش خشک)

Property	Typical Range
Unconfined compressive strength, $q_u$	Up to 1.2 MPa for organic and very plastic clays, sludges 0.4–1.5 MPa for soft clays 0.7–2.5 MPa for medium/hard clays 1.0–3.0 MPa for silts 1.5–5.0 MPa for fine-medium sands
Permeability, $k_c$	$10^{-6}$ – $10^{-9}$ m/s
Young's modulus ( $E_{50}$ ) (secant modulus at 50% $q_u$ )	(50–1000) $q_u$ for lab samples (Japan) (50–150) $q_u$ for lab samples (US) (100–300) $q_u$ (typical range)
Tensile strength	8–15% of $q_u$
Poisson's ratio	0.20–0.45 (typically 0.26)

Source: Modified from Elias et al. (2006).

Property	Typical Range
Undrained shear strength	(10–50) $c_u$ of soil (0.15–1.0 MPa)
Young's modulus	(50–200) $c_u$ of lime-cement column (50–200) $q_u$ of cement-treated soil
Strain at failure	<2%
Permeability (lime-cement)	About the same as for in situ soil
Permeability (lime)	10–100 × in situ soil permeability

Source: Modified from Elias et al. (2006).

۳۵

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

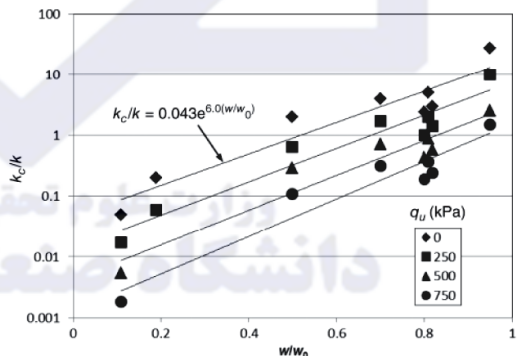
## خواص معمول خاک‌های تثبیت شده



نفوذپذیری

$$\frac{k_c}{k} \approx 0.043 \exp\left(\frac{6w}{w_0} - 0.004 q_u\right)$$

$k_c$  = permeability of the stabilized soil  
 $k$  = permeability of natural soil  
 $w$  = moisture content of the stabilized soil  
 $w_0$  = moisture content of the natural soil  
 $q_u$  = unconfined compressive soil of the stabilized soil (unit: kPa)



۳۶

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## خواص معمول خاک‌های تثبیت شده

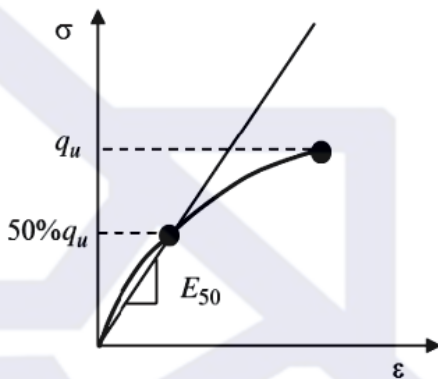


مدول یانگ،  $E_{50}$

$$E_{50} = \alpha_E q_u$$

$\alpha_E$  = constant, which varies in a wide range from 50 to 1000.

$\alpha_E = 100$  has been commonly used and is also mostly conservative.



۳۷

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## شکل‌ها و قطرهای معمول ستون‌ها



circular



dual



quadral



panel

۳۸

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

### شکل‌ها و قطرهای معمول ستون‌ها



- ✓ ستون‌های نصب شده با روش خشک معمولاً به صورت دایره ای و دارای قطر حدود ۰/۹-۰/۶ متر هستند، در حالی که ستون‌های نصب شده با روش مرطوب می‌توانند از شکل‌های مختلف و به قطر معادل حدود ۲/۵ متر ساخته شوند.
- ✓ مخلوط‌کن‌های برش دهنده خاک برای اجرای دیوارهای اختلاط عمیق به کار می‌روند که این دیوارها معمولاً دارای ۲/۸ - ۲/۴ متر طول و ۱/۲ - ۰/۵۵ متر عرض می‌باشند.
- ✓ برای الگوی ستون تکی، نسبت جایگزینی منطقه معمولاً از ۰/۲ تا ۰/۵ است.
- ✓ عمق بهسازی معمولاً کمتر از ۲۰ متر برای روش خشک و ۳۰ متر برای روش مرطوب است.
- ✓ نسبت آب به چسباننده برای روش مرطوب معمولاً بین ۰/۶ تا ۱ است.

۳۹

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

### ظرفیت باربری ستون‌های تکی DM



- ظرفیت بار نهایی یک ستون تکی DM به عوامل زیر بستگی دارد:
- ✓ مقاومت ستون
  - ✓ اصطکاک جانبی بین ستون و خاک،
  - ✓ مقاومت نوک ستون

$$Q_{ult,c} = q_{u,c} A_c$$

$$q_{u,c} = \alpha_1 \alpha_2 q_{ul}$$

۴۰

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## ظرفیت باربری ستون های تکی DM



ظرفیت باربری نهایی ( $Q_{ult,c}$ ) ستون تکی می تواند به صورت کمترین مقدار از بین دو ظرفیت زیر تخمین زده شود:

$$Q_{ult,c} = q_{u,c} A_c$$

$$q_{u,c} = \alpha_1 \alpha_2 q_{ul}$$

$q_{u,c}$  = field unconfined compressive strength of the column

$q_{ul}$  = laboratory unconfined compressive strength of the stabilized soil sample

$\alpha_1$  = laboratory to field strength correction factor (typically 0.3–1.0 for on-land works or 1.0 for marine works)

$\alpha_2$  = small cored sample to full-scale column correction factor (typically 0.70)

$A_c$  = cross-sectional area of columns

$f_s$  = average skin friction between the column and the surrounding soil

$$Q_{ult,c} = f_s U_c L_c + q_{tm} A_c$$

$$q_{tm} = \lambda_E q_t$$

$U_c$  = perimeter of the column

$L_c$  = column length

$\lambda_E$  = mobilization factor of the end-bearing (typically ranging from 0.4 to 0.6)

$q_{tm}$  = modified end-bearing capacity of the column toe

$q_t$  = end-bearing capacity, estimated based on pile toe bearing capacity

۴۱

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## ظرفیت باربری: میانگین اصطکاک جدار



میانگین اصطکاک جدار در آیین نامه بهسازی خاک چین (آکادمی ساختمانی تحقیقات چین، ۲۰۰۰) بر اساس نوع خاک به شرح زیر است:

type I—very soft clay ( $OC > 5\%$ ,  $e_0 > 1.5$ ),  $f_s = 5-8$  kPa;

type II—soft clay ( $OC > 5\%$ ,  $1.0 < e_0 \leq 1.5$ ),  $f_s =$

8–12 kPa; type III—clay ( $OC < 5\%$ ,  $e_0 \leq 1.0$ ),  $f_s =$

12–15 kPa, where OC is the organic content and  $e_0$  is the in situ void ratio.

۴۲

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

### ظرفیت باربری: میانگین اصطکاک جدار



مرکز ساختمان ژاپن (۱۹۹۷) مقادیر زیر را برای اصطکاک جدار و ظرفیت باربری نهایی ارائه کرده است:

For clayey soils:

$$f_s = c_u$$

$$q_{tm} = 6c_{ut}$$

$c_u$  = average cohesion of the soil along the column shaft (kPa)

$c_{ut}$  = cohesion of the soil below the column toe (kPa)

For sandy soils:

$$f_s = \frac{10N}{3} \text{ (kPa)}$$

$$q_{tm} = 75N_t \text{ (kPa)}$$

$N$  = average SPT  $N$  value of the soil along the column shaft

$N_t$  = SPT  $N$  value below the column toe

۴۳

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

### ظرفیت باربری پی متشکل از چندین ستون اختلاط عمیق



$$q_{ult} = a_s \frac{Q_{ult,c}}{A_c} + \beta_m (1 - a_s) q_{ult,s}$$

$a_s$  = area replacement ratio of the column to the soil

$\beta_m$  = mobilization factor of the bearing capacity of the soil (typically varying from 0.5 to 1.0 for frictional columns or 0.1 to 0.4 for end-bearing columns)

$q_{ult,s}$  = ultimate bearing capacity of the surrounding soil

برای محاسبه ظرفیت باربری مجاز می توان ضریب ایمنی ۲-۳ را استفاده کرد.

۴۴

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان



## © Ali Reza Ghanizadeh

## نشست ستون های اختلاط عمیق



✓ روش کاهش تنش (Stress Reduction Method)

✓ روش گروه شمع (Pile-Raft Method)

✓ روش نفوذ ستون (Column Penetration Method)

با توجه به مشخصات ستون های اختلاط عمیق به عنوان ستون های نیمه صلب، روش ها برای ستون های انعطاف پذیر یا صلب، برای ارزیابی نشست های ستون های تقویت شده پی های نرم، بسته به استحکام ستون می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۴۵

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## نشست ستون های اختلاط عمیق

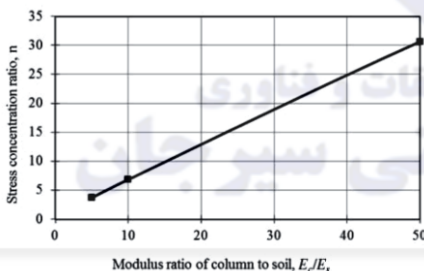


$$S' = \frac{1}{1 + a_s(n-1)} S$$

$S$  = settlement of natural ground  
 $a_s$  = area replacement ratio of columns  
 $n$  = stress concentration ratio.

کیتسومه و تراشی (۲۰۱۳) نشان دادند که نسبت مدول ستون به خاک،  $E_c/E_s$ ، در اکثر موارد مقداری در حدود ۱۰ تا ۲۰ است.

نسبت تمرکز تنش مورد بحث در بالا بر اساس بارگذاری صلب است. اگر ستون های اختلاط عمیق برای بهسازی خاکریز استفاده شوند (بارگذاری صلب نیست)، تمرکز تنش معمولاً بین ۲ تا ۶ است، که کمتر از بارگذاری صلب است.



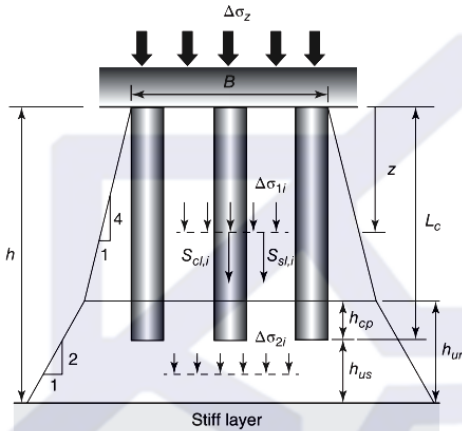
۴۶

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## نشست ستون های اختلاط عمیق



$$h_{cp} = L_c f(\alpha_s) g(\beta_L) h(\gamma_p)$$

$h_{cp}$  = thickness of the column penetration zone (treated as an "unreinforced" layer)

$L_c$  = length of the column

$f(\alpha_s)$  = influence factor of the area replacement ratio

$g(\beta_L)$  = influence factor of the improvement depth

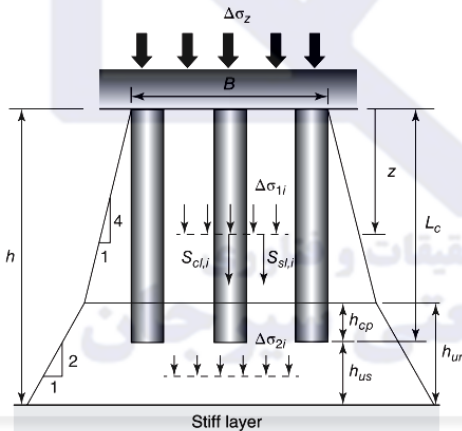
$h(\gamma_p)$  = influence factor of the applied pressure to soil strength ratio

۴۷

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## نشست ستون های اختلاط عمیق



$$f(\alpha_s) = \begin{cases} 0.75 - 2.5\alpha_s, & \alpha_s \geq 0.20 \\ 0.4 - 1.0\alpha_s, & 0.20 < \alpha_s \leq 0.45 \\ 0, & \alpha_s > 0.45 \end{cases}$$

$$g(\beta_L) = \begin{cases} 1.62 - 1.6\beta_L, & 0.2 \leq \beta_L \leq 0.7 \\ 0.5, & 0.7 \leq \beta_L \leq 0.9 \end{cases}$$

$$\beta_L = \frac{L_c}{h}$$

$$h(\gamma_p) = 0.27 \ln(\gamma_p) - 0.41$$

$$\gamma_p = \frac{\Delta\sigma_z p_a^{1.5}}{c_u^{2.5}}$$

$\Delta\sigma_z$  = average applied pressure

$p_a$  = atmosphere pressure (approximately 100 kPa)

$c_u$  = undrained shear strength of the soil

۴۸

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## نشست ستون های اختلاط عمیق



$$S' = S_1 + S_2$$

نشست در منطقه تقویت شده

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma_{1i} h_{1i}}{D_{ci} a_s + (1 - a_s) D_{si}}$$

$D_{ci}$  and  $D_{si}$  = are constrained moduli of the column and the soil

$h_{1i}$  = thickness of a soil sublayer within the reinforced zone

$\Delta\sigma_{1i}$  = additional stress within the reinforced zone induced by the applied pressure,  $\Delta\sigma_c$

نشست زیر منطقه تقویت شده

$$S_2 = \sum_{i=1}^m h_{2i} \frac{C_{ci}}{1 + e_{0i}} \log \left( 1 + \frac{\Delta\sigma_{2i}}{\sigma'_{z0i}} \right)$$

$C_{ci}$  = compression index of the soil sublayer

$e_{0i}$  = initial void ratio of the soil sublayer

$h_{2i}$  = thickness of the soil sublayer within the unreinforced zone

$\sigma'_{z0i}$  = initial effective overburden stress in the sublayer

$\Delta\sigma_{2i}$  = additional stress within the unreinforced zone estimated with a 2(H):1(V) stress distribution

۴۹

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## تحکیم در ستون های اختلاط عمیق



$$m_{v1} = \frac{1}{a_s D_c + (1 - a_s) D_s}$$

$m_{v1}$  = coefficient of volumetric compressibility of the equivalent layer

$D_c, D_s$  = constrained moduli of the column and the soil

$h_1$  = thickness of the equivalent layer

$d_e$  = diameter of the unit cell

$d_c$  = diameter of the column

$k_r, k_v$  = permeability of the soil in the radial and vertical directions

$k_s$  = permeability of the smear zone

$k_c$  = permeability of the column

$N_D$  = diameter ratio of the unit cell to the column

$N_s$  = diameter ratio of the smear zone to the column

$$k_{v1} = \left( 1 + \frac{1.5 h_1^2}{F_m (N_D) d_e^2 k_v} \right) k_v$$

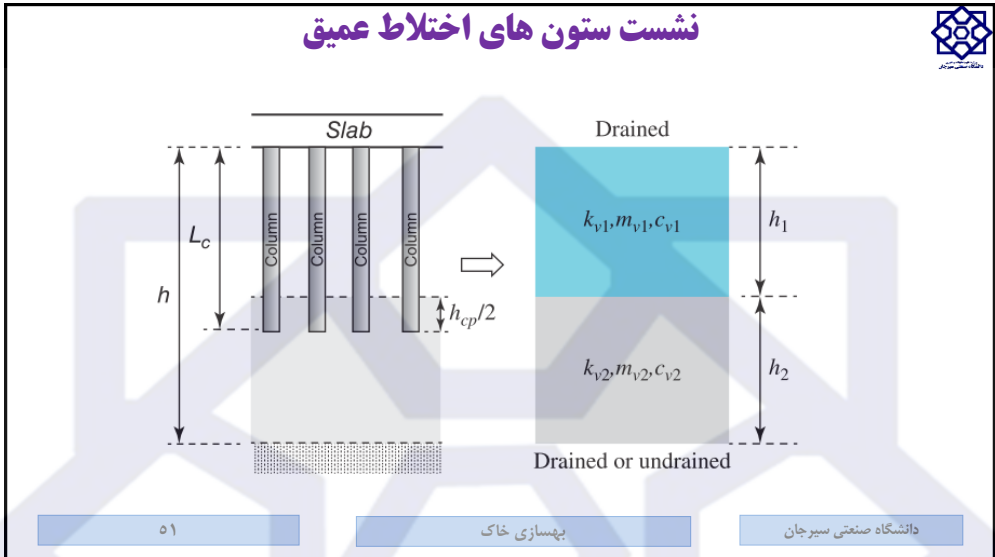
۵۰

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## نشست ستون های اختلاط عمیق

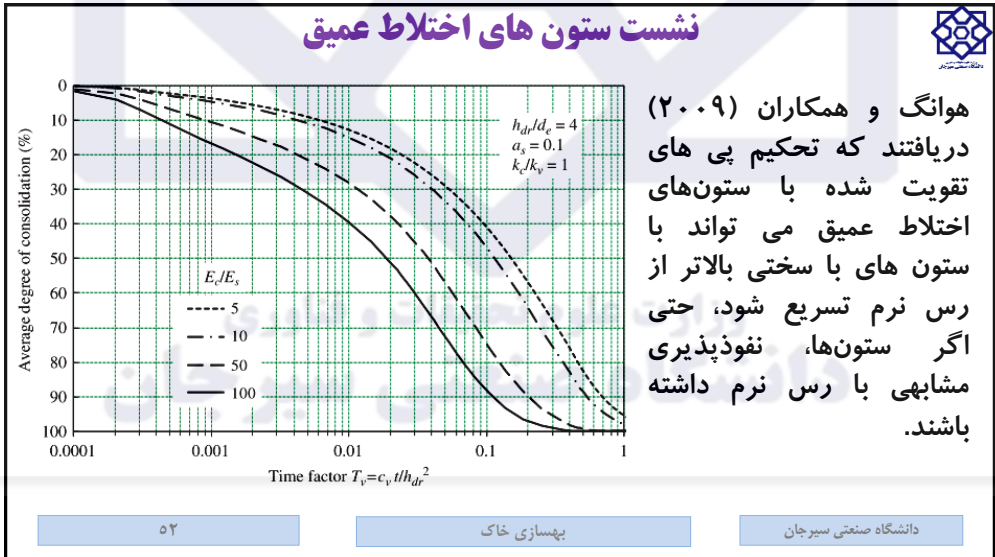


۵۱

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## نشست ستون های اختلاط عمیق



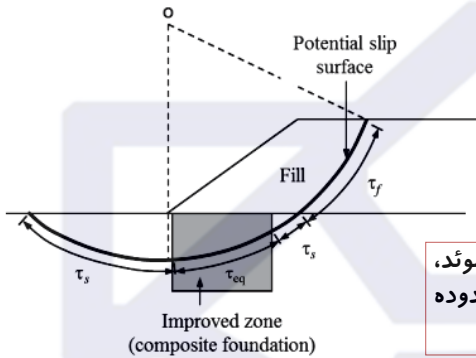
هوانگ و همکاران (۲۰۰۹) دریافتند که تحکیم پی های تقویت شده با ستون های اختلاط عمیق می تواند با ستون های با سختی بالاتر از رس نرم تسریع شود، حتی اگر ستون ها، نفوذپذیری مشابهی با رس نرم داشته باشند.

۵۲

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## پایداری شیروانی های حمایت شده بوسیله ستون های DSM



$$c_{u,eq} = a_s c_{u,c} + (1 - a_s) c_{u,s}$$

$c_{u,eq}$  = undrained shear strength of the composite foundation

$c_{u,c}$  = undrained shear strength of the column

$c_{u,s}$  = undrained shear strength of the soil

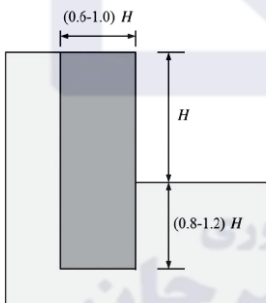
با توجه به تجربیات به دست آمده در کشور سوئد، مقاومت برشی زهکشی نشده ستون باید در محدوده ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلو پاسکال باشد.

۵۳

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## طراحی اختلاط عمیق برای گودبرداری



• ضریب ایمنی در برابر لغزش = ۱/۵

• ضریب ایمنی در برابر واژگونی = ۱/۵

• ضریب ایمنی در برابر برآمدگی پایه = ۱/۵

• ضریب ایمنی در برابر نفوذ = ۱/۵

• ضریب ایمنی در برابر تثبیت کلی = ۱/۳

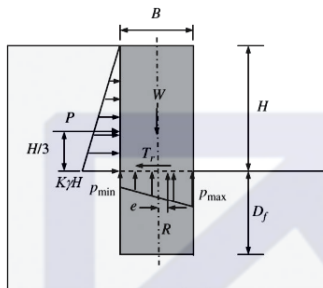
۵۴

پهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## نگرش داخلی



$$FS_{is} = \frac{q_{uf}B}{K\gamma H^2} \quad \text{for an undrained condition}$$

$$FS_{is} = \frac{2(c' + W \tan \phi')}{K\gamma H^2} \quad \text{for a drained condition}$$

$T_r$  = shear resistance by the DM wall

$K$  = coefficient of lateral earth pressure of the soil

$\gamma$  = unit weight of the soil

$q_{uf}$  = field unconfined compressive strength of the stabilized soil

$H$  = depth of excavation

$B$  = width of the wall

$c'$  = effective cohesion of the wall

$\phi'$  = effective friction angle of the wall

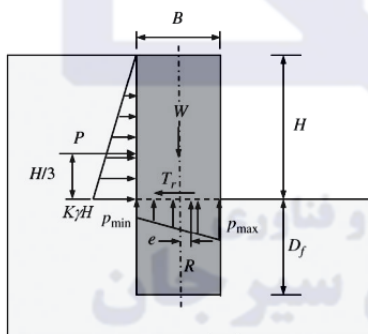
$$FS_{is} = \frac{T_r}{P} = \frac{2T_r}{K\gamma H^2}$$

۵۵

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## چرخش داخلی



$$FS_{io} = \frac{3WB}{2PH} = \frac{3WB}{K\gamma H^3}$$

$$e = \frac{PH}{3W} = \frac{K\gamma H^3}{6W} \quad \text{should be less than } \left(\frac{1}{6}\right) B.$$

The maximum stress at the edge of the wall as calculated below should be less than the allowable strength of the stabilized soil:

$$p_{max} = \frac{W}{B} \left(1 + \frac{6e}{B}\right) \leq q_a \quad (8.39)$$

where  $q_a$  is the allowable strength of the stabilized soil, which is equal to  $q_{uf}/FS$  (typically  $FS = 2.0$ ).

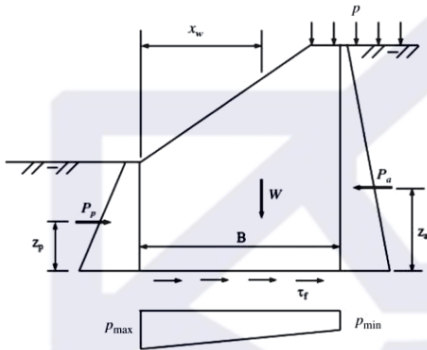
۵۶

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## لغزش پایه



$$FS_{bs} = \frac{P_p + \tau_f B}{P_a}$$

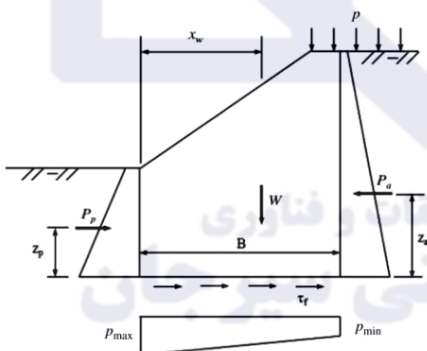
Passive earth pressure,  $P_p$ , is mobilized at a large deformation;  $P_p$  may be reduced by a factor (typically ranging from 1.5 to 2.0) to limit the lateral deformation. For a permanent earth structure, if  $P_p$  is not reliable (e.g., the toe is subjected to scouring), it may be ignored. The shear resistance between the block and the soil,  $\tau_f$ , can be estimated by  $(\frac{2}{3}-1)$  times the shear strength of the soil.

۵۷

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## چرخش خارجی



$$FS_{eo} = \frac{P_p z_p + W x_w}{P_a z_a}$$

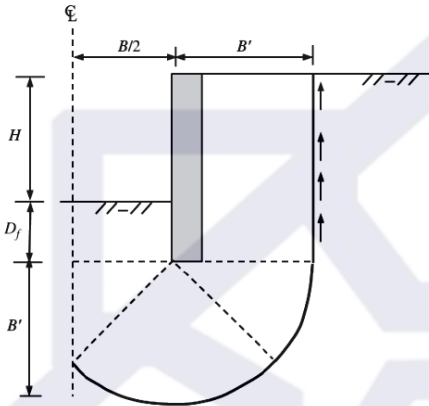
۵۸

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## لغزش داخلی



$$FS_{bh} = \frac{N_c c_u}{\gamma H - c_u(H + D_f)/B' - 2c_u D_f/B}$$

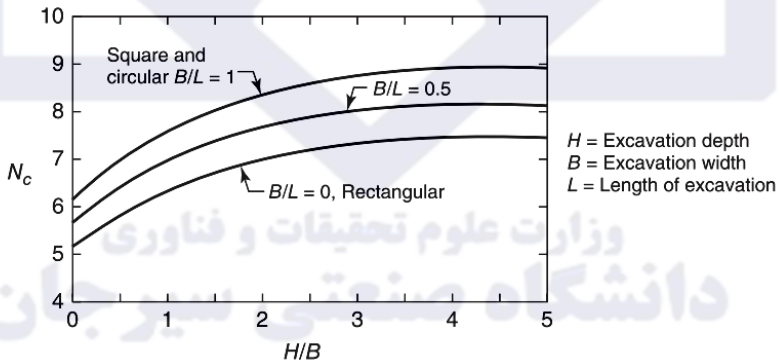
- $c_u$  = undrained shear strength of the soil
- $\gamma$  = unit weight of the soil
- $H$  = depth of excavation
- $D_f$  = embedment depth of wall
- $B'$  = depth of failure surface ( $B' = B/\sqrt{2}$  in uniform soil or limited depth to a firm soil if  $B' < B/\sqrt{2}$ )
- $N_c$  = bearing capacity factor, which can be determined based on Figure 8.42

۵۹

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## لغزش داخلی



ضریب ظرفیت باربری برای پایداری پایه (ترزاقی و همکاران، ۱۹۹۶).

۶۰

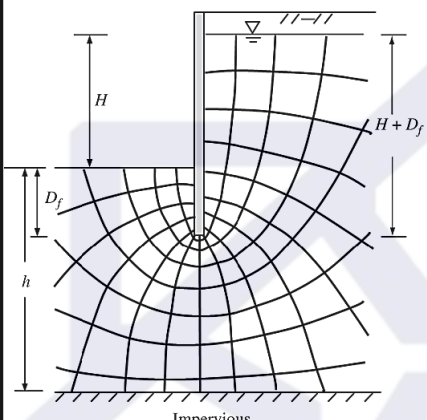
بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان



© Ali Reza Ghanizadeh

### پایداری کف گود



$$FS_{sp} = \frac{i_{cr}}{i_{max}} = \frac{\gamma'}{i_{max} \gamma_w}$$

$i_{cr}$  = critical hydraulic gradient  
 $i_{max}$  = maximum hydraulic gradient  
 $\gamma'$  = effective unit weight of the soil  
 $\gamma_w$  = unit weight of water

Impervious

۶۱

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

### پارامترهای طراحی اختلاط عمیق برای حفاظت شالوده

- ✓ نوع خاک، درصد رطوبت طبیعی، مقدار مواد آلی، سطح آبهای زیرزمینی، نفوذ پذیری یا ضریب تحکیم و مدول و مقاومت خاک
- ✓ عمق بهسازی
- ✓ الزامات پروژه (ظرفیت باربری مجاز، نشست قابل قبول، ضریب ایمنی در برابر گسیختگی شیب خاکریز)
- ✓ وضعیت بارگذاری (فشار اعمال شده)
- ✓ نوع چسباننده (آهک، سیمان، آهک - سیمان)
- ✓ روش اجرا (روش خشک یا مرطوب)
- ✓ مقدار چسباننده
- ✓ مقاومت فشاری زهکشی نشده مورد نیاز خاک تثبیت شده
- ✓ ابعاد و الگوی ستون.

۶۲

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## پارامترهای طراحی DM به عنوان سیستم حائل گودبرداری



- ✓ خصوصیات خاک (وزن واحد، مقاومت برشی زهکشی نشده، زاویه اصطکاک مؤثر و نفوذپذیری)
- ✓ ابعاد حفاری، از جمله عمق، طول و عرض
- ✓ افزایش سطح آبهای زیرزمینی داخل و خارج لوله حفاری
- ✓ عرض دیوار اختلاط عمیق
- ✓ عمق نفوذ دیوار اختلاط عمیق
- ✓ مقاومت خاک تثبیت شده
- ✓ ضریب ایمنی در مقابل لغزش، انحراف، عدم پایداری پایه و نفوذ و بی ثباتی کلی

۶۳

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## پارامترهای معمول برای اختلاط عمیق



Region	Japan	Europe	United States
Reference	Kitazume and Terashi (2013)	Holm (2005)	Elias et al. (2006)
Method	Dry method	Wet method	
Penetration rate (m/min)	1.0–2.0	1.0	2–6
Withdrawal rate (m/min)	0.7–0.9	0.7–1.0	1.5–6
Blade rotation rate—penetration (rpm)	24–32	20	80–200
Blade rotation rate—withdrawal (rpm)	48–64	40	10–30
Blade rotation number (min)	274–284	350–360	100–500
Binder content (kg/m <sup>3</sup> )		100–250	350 for clays; 400 to 450 for peaty soils 150–300

$$N_{br} = N_{mb} \left( \frac{R_p \alpha_{cvi}}{v_p \alpha_{cv}} + \frac{R_w}{v_w} \right)$$

$\alpha_{cvi}$  = binder injection rate during penetration (kg/m<sup>3</sup>)

$\alpha_{cv}$  = total volumetric binder content (kg/m<sup>3</sup>)

$N_{mb}$  = total number of mixing blades

$v_p$  = penetration rate (m/min)

$v_w$  = withdrawal rate (m/min)

$R_p$  = blade rotation rate during penetration

$R_w$  = blade rotation rate during withdrawal

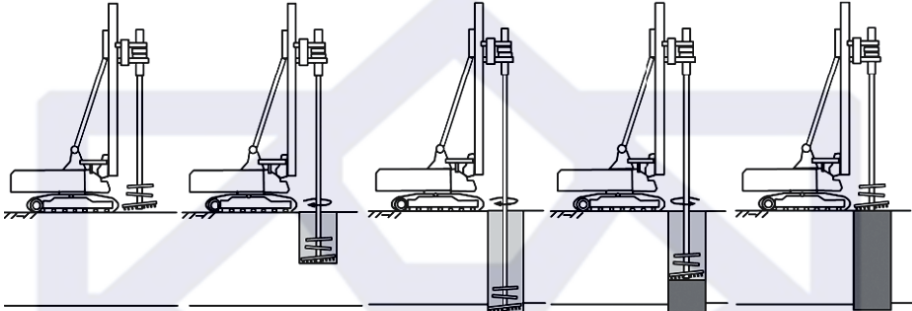
۶۷

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## روند اجرای اختلاط عمیق مرتبوب



(1) Positioning auger

(2) Drilling and mixing binder with soil

(3) Reaching bottom and continuing mixing

(4) Reverse mixing while withdrawing

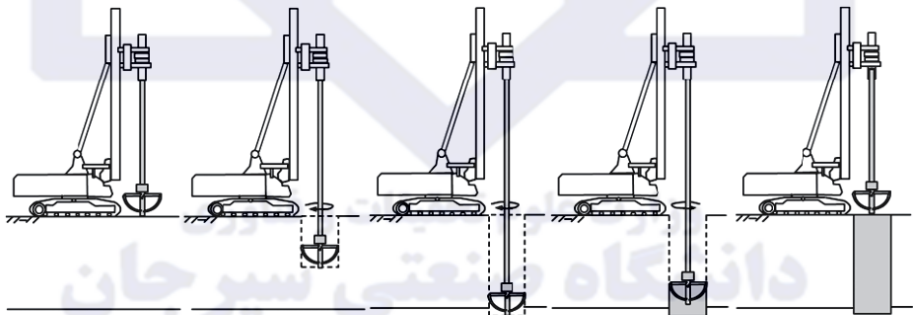
(5) Complete

۶۸

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## روند اجرای اختلاط عمیق خشک



(1) Positioning auger

(2) Drilling

(3) Reaching bottom

(4) Injecting powder binder and mixing while withdrawing

(5) Complete

۷۰

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## کنترل کیفیت و اطمینان



آزمایش نفوذ استاندارد (با جرم کوبه ۶۳/۵ کیلوگرم) و آزمایش نفوذ مخروط برای بررسی یکنواختی ستون‌های اختلاط عمیق استفاده می‌شوند. این آزمایش‌ها اغلب پس از یک دوره ۷ روزه عمل‌آوری انجام می‌شوند. روابط تجربی زیر برای تعیین مقاومت فشاری زهکشی نشده خاک‌های تثبیت شده با سیمان استفاده می‌شوند (یا و همکاران، ۱۹۹۴):

$$q_u = 12.5N$$

$$q_u = \frac{1}{10}q_c$$

$q_u$  = unconfined compressive strength of stabilized soil (kPa)

$N$  = number of blow counts by the dynamic penetration test

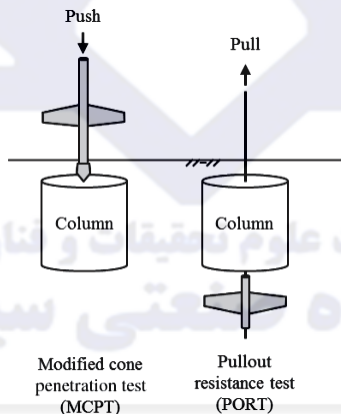
$q_c$  = cone tip resistance (kPa)

۷۳

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## کنترل کیفیت و اطمینان



۷۴

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh

## انواع تزریق



**تزریق تحت فشار:** حفرات موجود در خاک به کمک تزریق تحت فشار بالا پر می‌شوند.

**تزریق نفوذی:** نفوذ به خاک از طریق حفره‌های بین ذرات خاک.

**تزریق هیدروفراکچر:** ایجاد ترک در خاک و سپس نفوذ به ترک.

**تزریق تراکمی:** جابجایی یا افزایش چگالی خاک از طریق تزریق

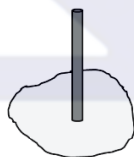
**تزریق جبران کننده:** برای جبران خسارت زمین به دلیل فعالیت‌های ساخت، حفاری و تونل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۷۵

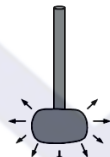
بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## انواع تزریق



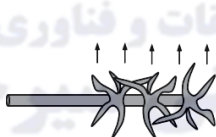
(1) Permeation grouting



(2) Compaction grouting



(3) Hydro-fracture grouting



(4) Compensation grouting



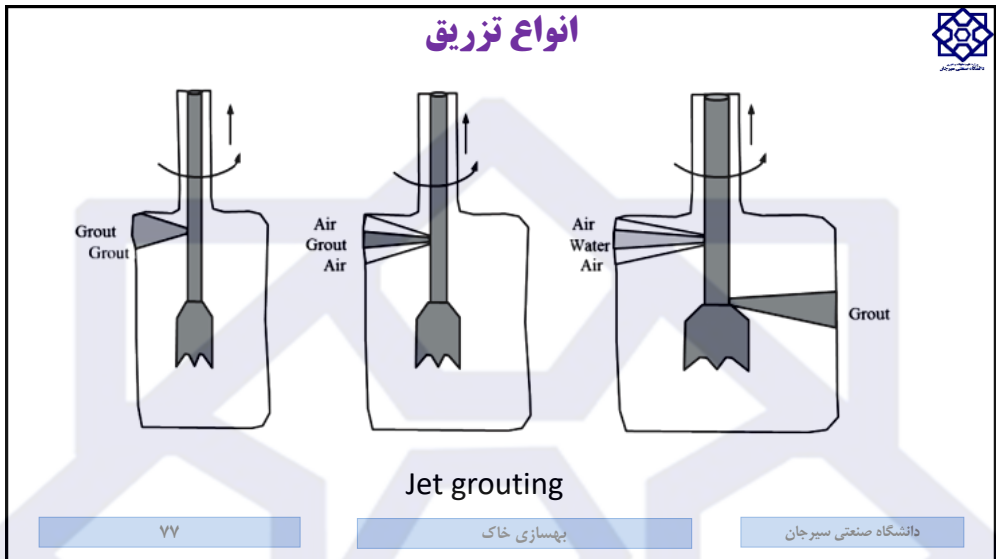
(5) Jet grouting

۷۶

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh



**هدف اصلی تزریق**

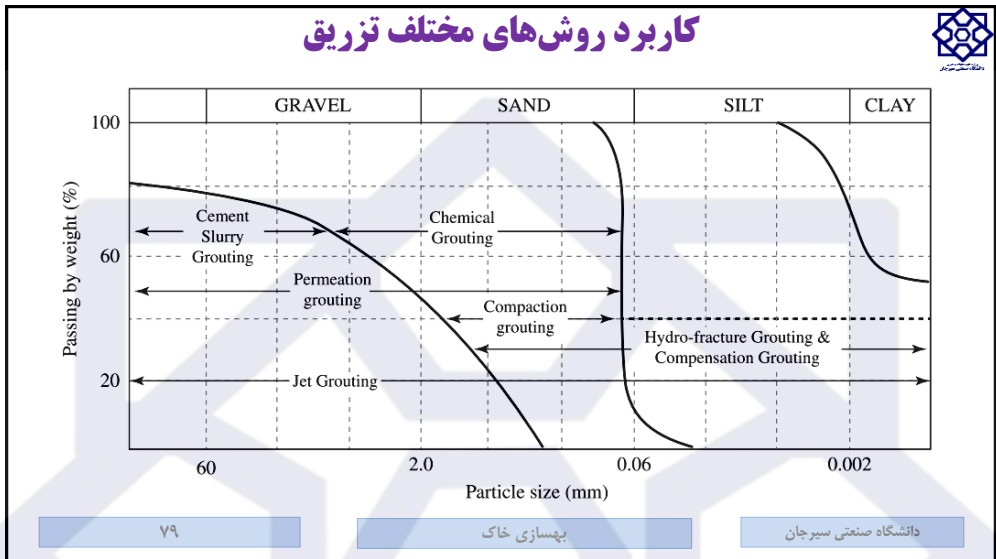
- ✓ افزایش چگالی برای جلوگیری و یا توقف نشست و کاهش روانگرایی
- ✓ چسباندن خاک برای افزایش چسبندگی خاک‌های دانه‌ای
- ✓ کاهش نفوذپذیری و کنترل آب
- ✓ تثبیت و کاهش انبساط خاک‌های رسی
- ✓ جبران فرورفتگی و پر نمودن حفره‌های بزرگ
- ✓ افزایش حفاظت از سازه‌های موجود

۷۸

بهسازی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh



### کاربرد

- ✓ افزایش چگالی خاک‌های دانه‌ای
- ✓ بالا بردن سازه‌های نشست کرده
- ✓ کنترل نشست
- ✓ تقویت شالوده‌های موجود
- ✓ حفاظت از حفاری وزارت علوم تحقیقات و فناوری
- ✓ حفاظت از سازه‌های موجود در طول تونل‌سازی
- ✓ کاهش روانگرایی
- ✓ کنترل آب

۸۰

بهبودی خاک

دانشگاه صنعتی سیرجان

## کاربرد



### مزایا

- عدم نیاز برای جابجایی و جایگزینی خاک
- مؤثر برای پی‌ریزی و حمایت از سازه‌های موجود
- آسان برای دسترسی و عملیات در فضای محدود
- هزینه پایین تجهیز کارگاه

### محدودیت‌ها

- مقدار برآورد تزریق سخت است.
- برخی پیامدها قابل پیش‌بینی نیستند.
- ناحیه بهسازی گاهی اوقات نامشخص است.
- تزریق ممکن است باعث حرکت زمین و خرابی سازه‌های موجود شود.
- برخی از رسوبات شیمیایی ممکن است سمی باشند و اثرات نامطلوبی بر محیط‌زیست داشته باشند.
- پیمانکاران متخصص برای عملیات مورد نیاز است.