

خواص مکانیکی خاک

1. مقاومت برشی

2. اصطکاک

3. چسبندگی

این خواص از دو جهت برای عملیات خاک ورزی اهمیت دارند:

- عملکرد کششی تراکتور

1. نیروی مورد نیاز برای ادوات خاکورزی

1. مقاومت برشی Shear Strength

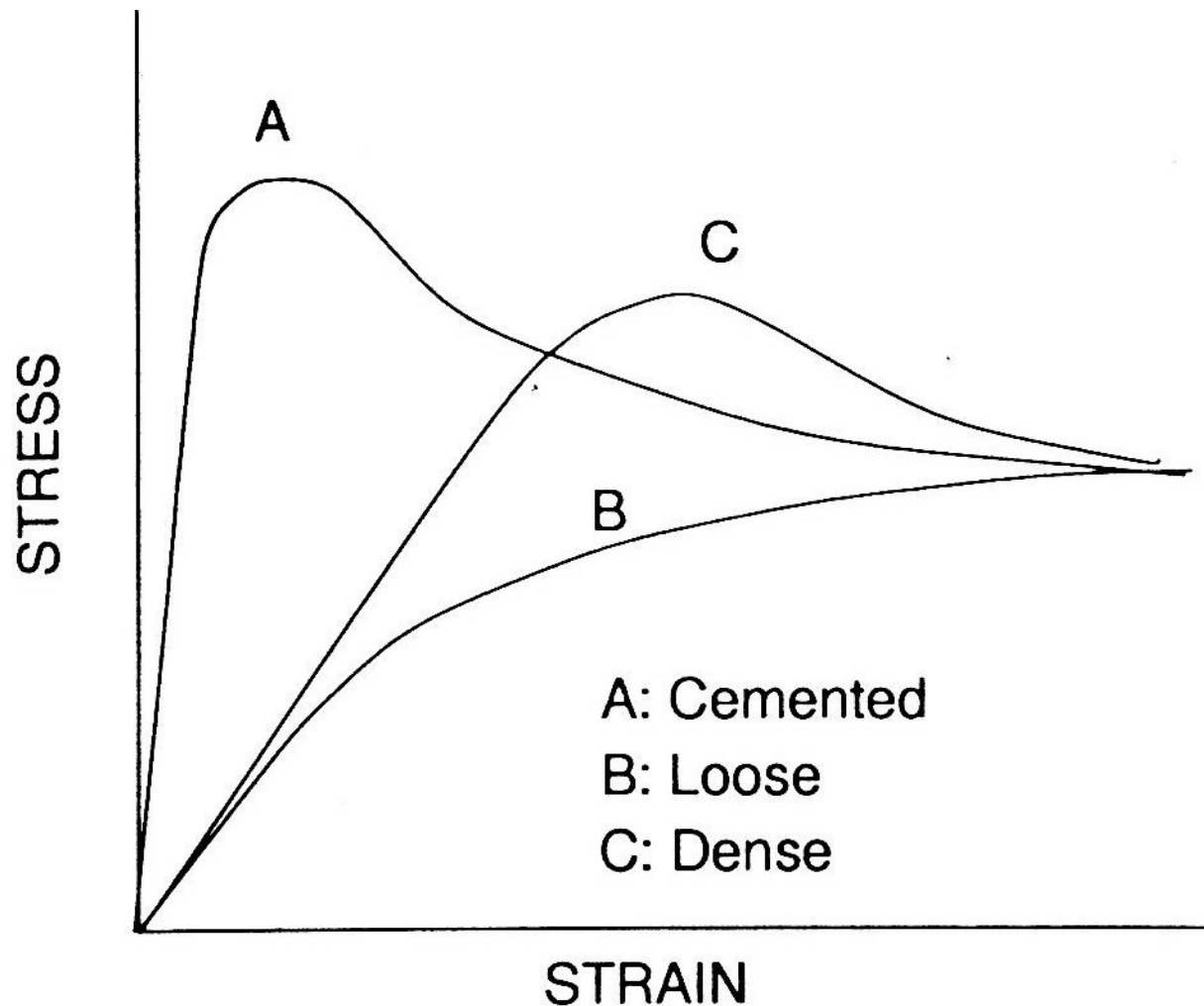


Figure 5.25–Typical shear stress-strain diagrams for soils in three conditions: A: cemented, B: loose, and C: dense.

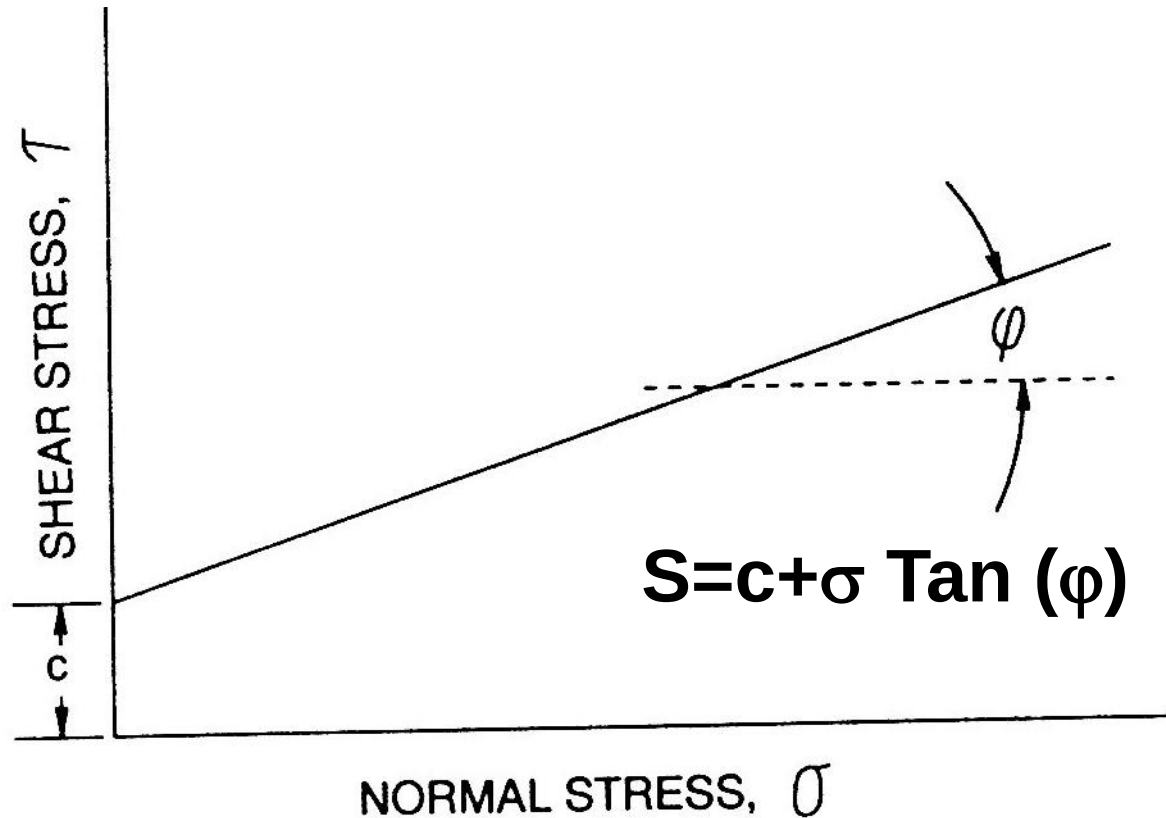
قانون موهر- کولن

- گسیختگی در مواد موقعی رخ می دهد که تنش برشی در صفحه ای خاص از مقاومت برشی ماده بیشتر باشد
- مقاومت برشی (S) در هر صفحه ای تابعی از تنش عمودی (σ) در آن صفحه است.

$$S = f(\sigma)$$

پوش گسیختگی در خاک

Soil Failure Envelope



روشهای اندازه گیری مقاومت برشی

1. روش مستقیم Direct shear test

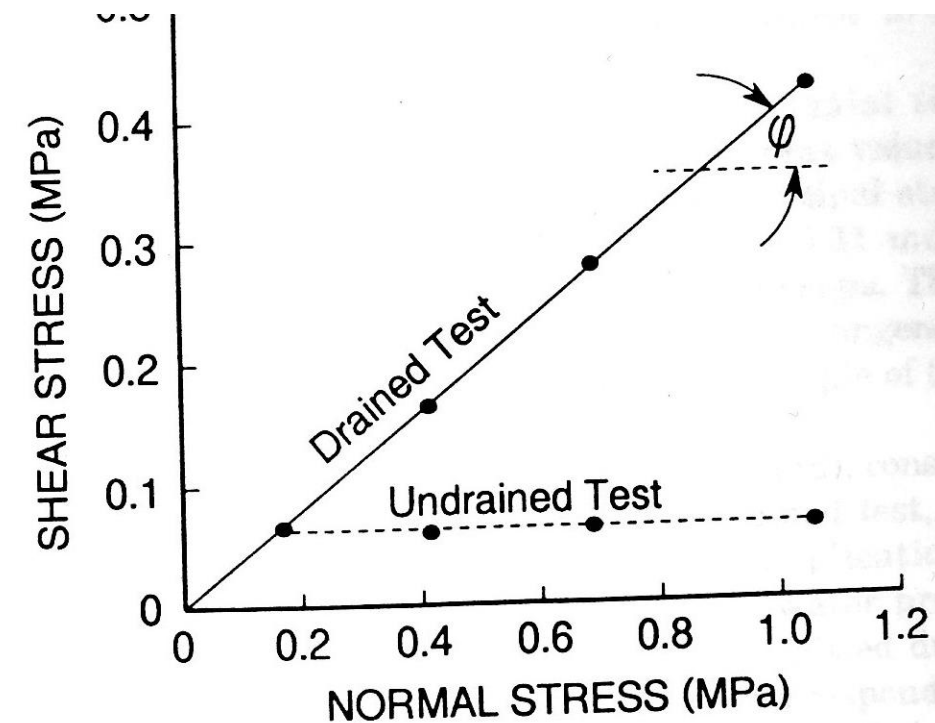


Figure 5.28–Typical result of direct shear test.

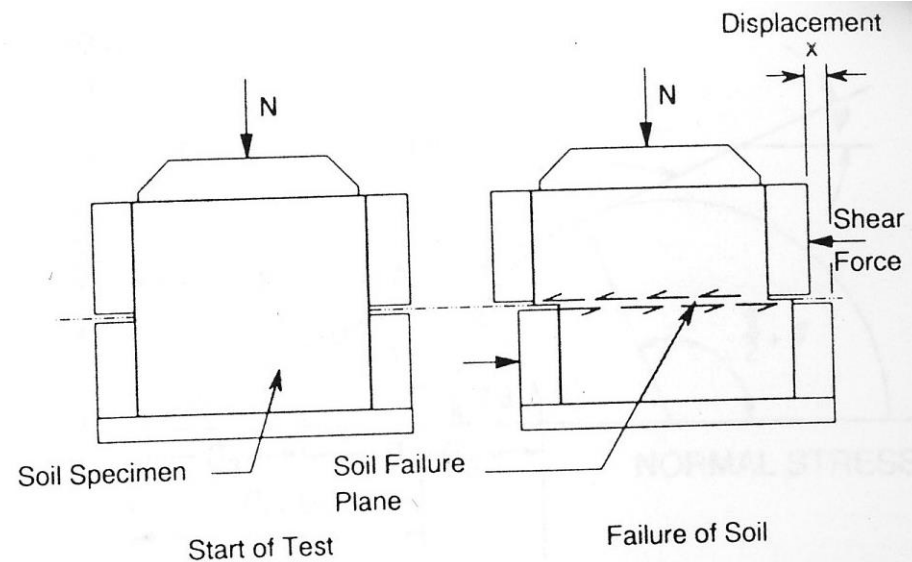


Figure 5.27–Direct shear test apparatus.

The 2-تست سه محوری Triaxial test

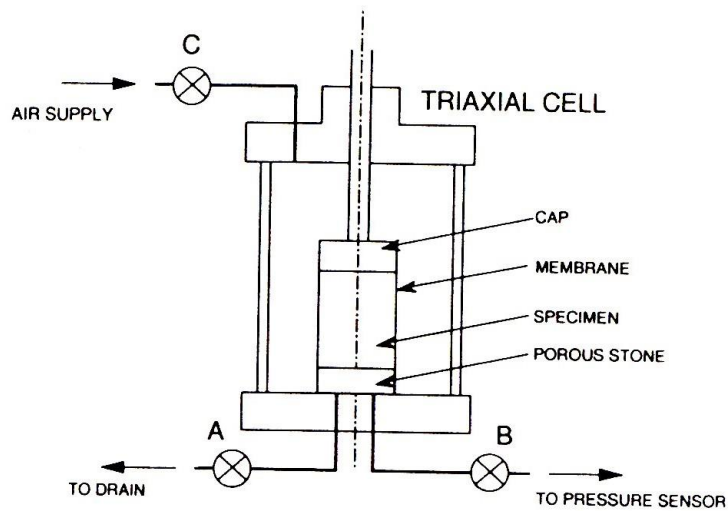


Figure 5.32-A tri-axial shear test apparatus.

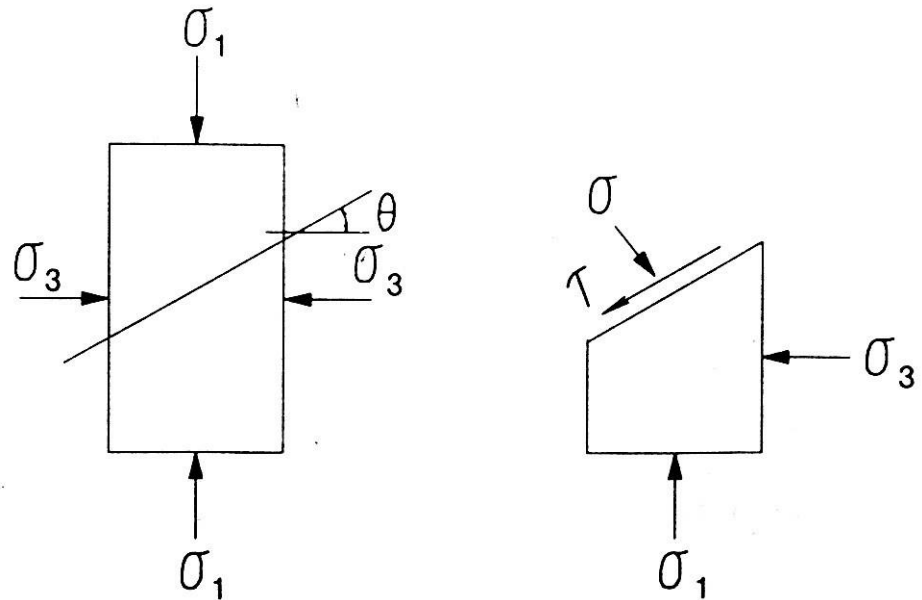
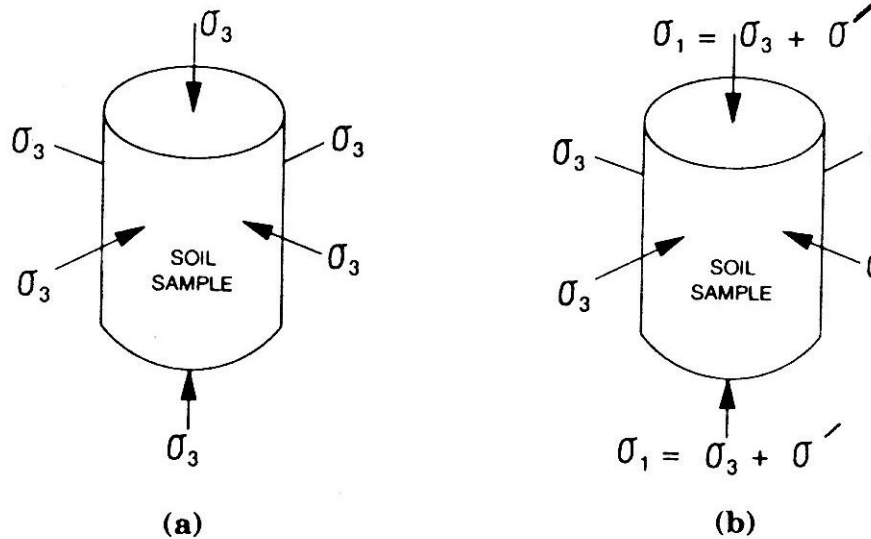


Figure 5.30-Two-dimensional representation of the stresses on a soil sample during tri-axial shear test showing the shear and normal stress on the failure plane.

Figure 5.29-(a) Application of hydrostatic stresses during consolidation, (b) application of the normal deviatoric stress to cause shear failure.

انواع تست سه محوری

- زهکشی شده (d), Drained

مقادیر موثر

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1, \quad \bar{\sigma}_3 = \sigma_3$$

- زهکشی در مرحله تحکیم

Consolidation Undrained , (c-u)

مقادیر موثر

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 - u_b, \quad \bar{\sigma}_3 = \sigma_3 - u_b$$

u_b فشار اب موجود در خلل و فرج

- زهکشی نشده (u), Undrained

u فشار اب موجود در خلل و فرج

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 - u, \quad \bar{\sigma}_3 = \sigma_3 - u$$

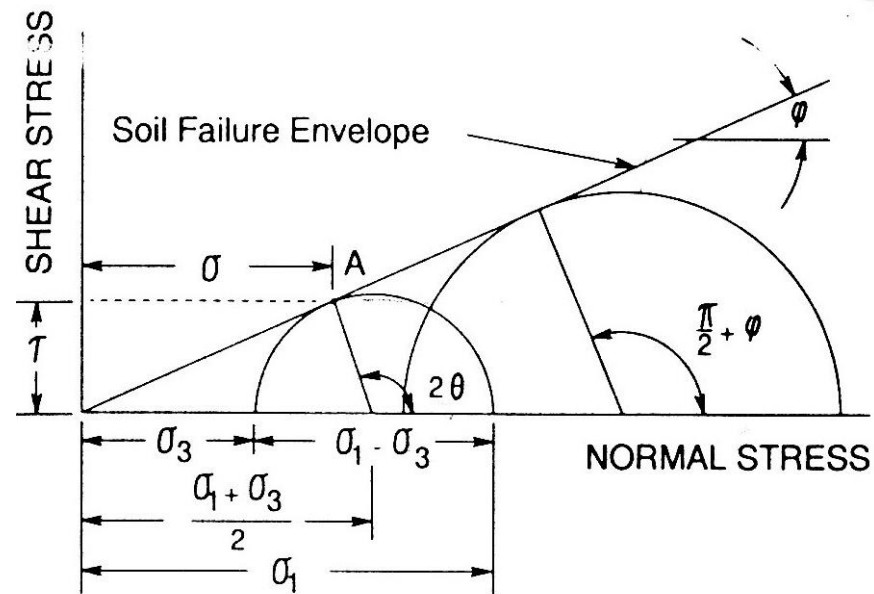


Figure 5.31-Mohr's circle representation of principal stresses.

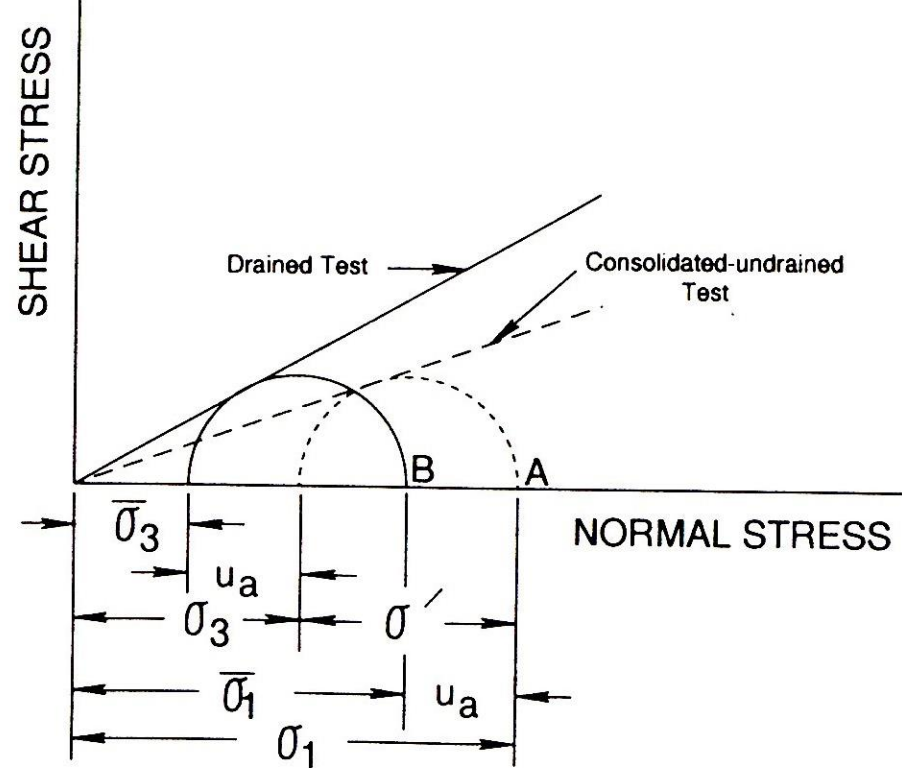


Figure 5.33-Effective-stress and total-stress envelopes.

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta$$

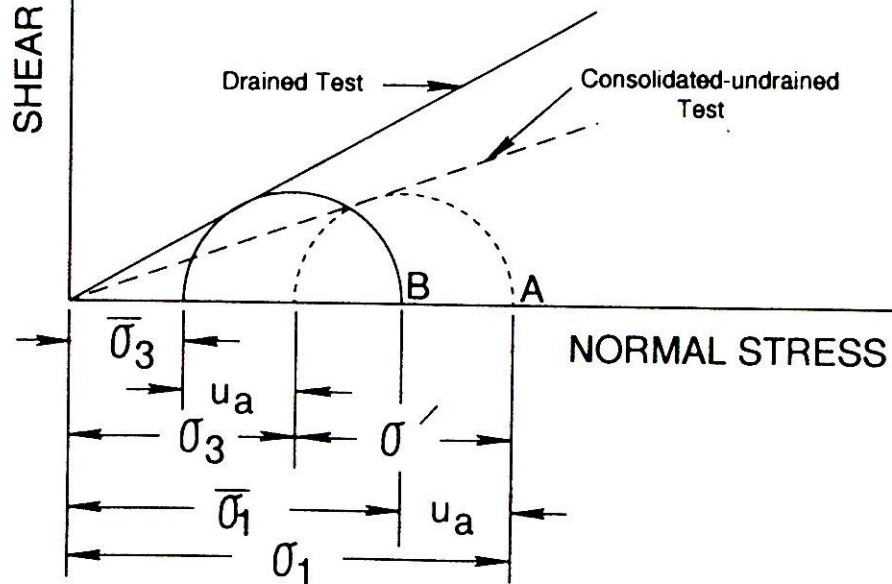
$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta$$

تنشها در صفحه گسیختگی

پوش گسیختگی در خاکهای غیر چسبنده

Failure Envelope for Cohesionless soils

زاویه اصطکاک داخلی برای خاک های غیر چسبنده بین 28 تا 42 درجه
این زاویه با افزایش دانسیته خاک افزایش می یابد
خاک های خیلی سبک و شل با ساختمان ناپایدار
ممکن است به زیر 10 درجه برسد



$$S = \sigma \tan(\phi)$$

Figure 5.33-Effective-stress and total-stress envelopes.

اندازه گیری مقاومت برشی به روش صحرایی

روش استوانه ای توپر Round shear box

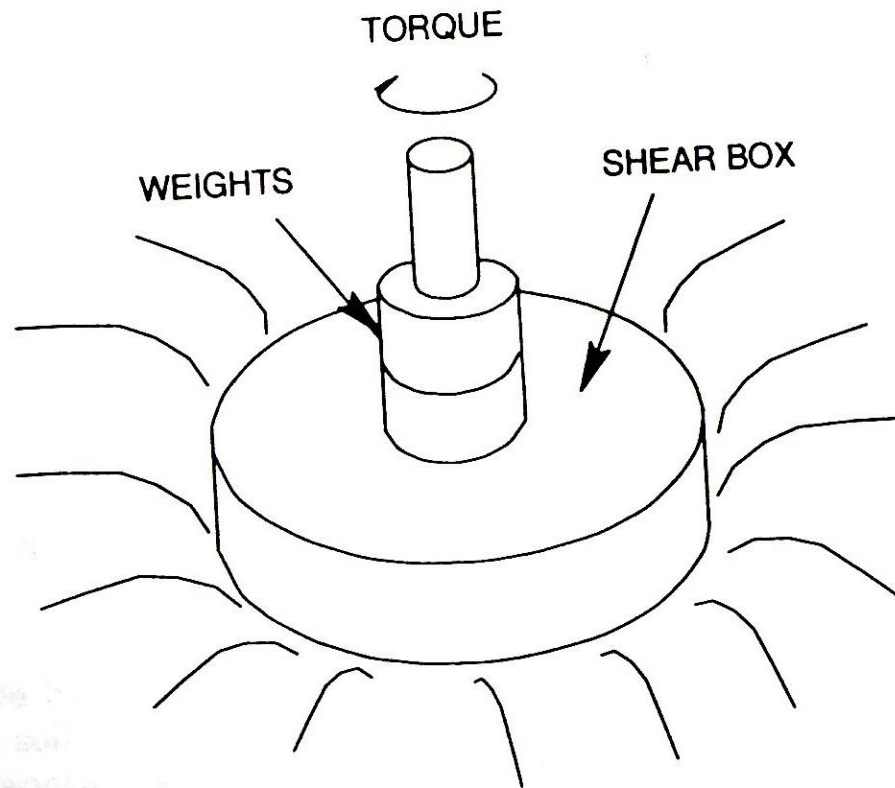


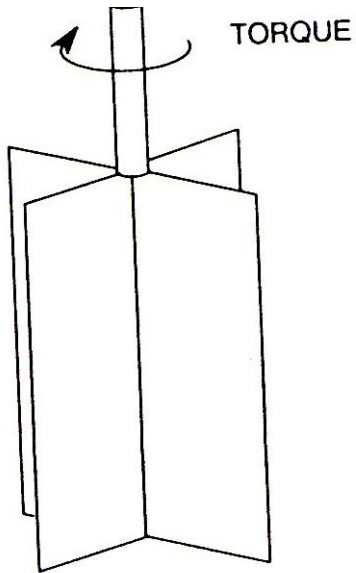
Figure 5.35-A field soil shear apparatus.

$$S = \frac{3M}{2\pi r^3}$$

روش استوانه ای تو خالی

$$S = \frac{3M}{2\pi \cdot (r_1^3 - r_2^3)}$$

روش پره اي vane shear apparatus



$$S = \frac{3M}{28\pi r^3}$$

Figure 5.36-A vane shear apparatus.

- نسبت ارتفاع به شعاع برابر 4
- تغییر بار عمودي امکان پذیر نیست

مثال: در يك آزمایش سه محوري فشار استاتیکی اولیه $\sigma_3 = 200 \text{ kpa}$ بوده است. نمونه در فشار $\sigma'_1 = 280 \text{ kpa}$ و فشار اب خلل و فرج $u = 180 \text{ kpa}$ گسیخته شد. اگر گسیختگی در زاویه 57 درجه نسبت به سطح افق اتفاق افتد الف) مقادیر تنش برشی و عمودی را در سطح گسیختگی تعیین کنید. ب) اگر مقدار همجسبی برای نمونه 80 kpa باشد و زاویه اصطكاك داخلی آن 24 درجه باشد، نشان دهید چرا گسیختگی در زاویه 57 درجه اتفاق افتاده است؟

$$\sigma_3 = 200kpa, \quad \sigma' = \sigma_1 - \sigma_3 = 280kpa, \quad \sigma_1 = 280 + 200 = 480kpa$$

حل:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta = \frac{480 + 200}{2} + \frac{480 - 200}{2} \cos(114) = 283kpa$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta = \frac{480 - 200}{2} \sin(114) = 127kpa$$

$$\bar{\sigma} = \sigma - u = 283 - 180 = 103kpa$$

$$S = c + \bar{\sigma} \tan \varphi = 80 + 103 \tan 24 = 127$$

این مقدار برابر تنش برشی اعمال شده در صفحه گسیختگی است. لذا گسیختگی اتفاق می افتد
حداکثر تنش برشی در زاویه 45 درجه نسبت به افق اتفاق می افتد

$$\sigma = \frac{480 + 200}{2} + \frac{480 - 200}{2} \cos 2(45) = 340kpa$$

$$\bar{\sigma} = 340 - u = 340 - 180 = 160kpa$$

$$S = 80 + 160 \tan 24 = 151kpa$$

مقاومت برشی در این صفحه

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = 140 \Rightarrow 140 < 151$$

جمع بندي مقاومت برشي

Resistance to shear (shear strength)

- مقاومت خاک از طريق همچسبي **cohesion** و اصطكاك داخلي ايجاد مي شود
- خاک هاي رسي اشباع اصطكاك داخلي ندارند
- وزن بر روي مقاومت خاک رسي تاثير ندارد
- خاک هاي شني چسبندگي ندارند بنابراين مقاومت آنها تنها در اثر اصطكاك داخلي است
- در خاک شني تنها وزن باعث افزايش مقاومت مي گردد

اصطكاك Friction

- اصطكاك بين خاك - جسم خارجي (فلز) μ
- اصطكاك بين خاك - خاك μ' هنگام حرکت نسبي بين توده هاي خاك. پس از گسيختگي در جعبه تست بدست مي آيد
- اصطكاك داخلي $\tan(\phi)$ موقعي عمل مي كند كه گسيختگي در اثر اعمال نيروي برشي اتفاق افتد

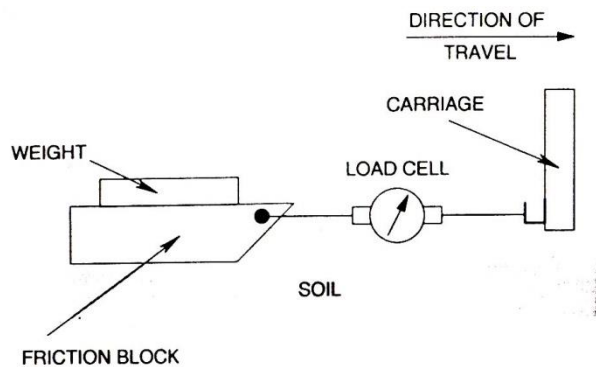
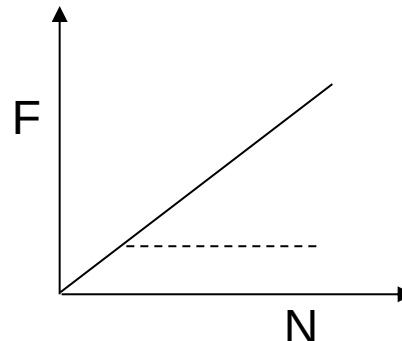


Figure 5.37-Measuring soil-metal friction.



$$F = \mu N$$
$$\mu' \text{ or } \mu = \tan(F/N)$$

چسبندگی

- همچسبي Cohesion
- دگر چسبي Adhesion
 - نیروی جذبی بین دو جسم ناهمسان
 - در خاک در اثر لایه نازک رطوبت ایجاد می شود
 - نیروی جذبی بستگی به کشش سطحی آب دارد
- در کاربرد های مکانیک نمی توان چسبندگی و اصطکاک را از هم منفک کرد
 - اثر توام این دو اصطکاک ظاهری نامیده می شود.

اثر رطوبت بر اصطكاك ظاهري

- در رطوبت كم نيروي اصطكاك فقط در اثر لغزش
- با افزايش رطوبت اصطكاك بدليل افزايش چسبندگي زياد مي شود (اثر توام لغزش و چسبندگي)
- افزايش بيش از حد رطوبت باعث روانكاري بين ذرات شده اصطكاك كم مي شود

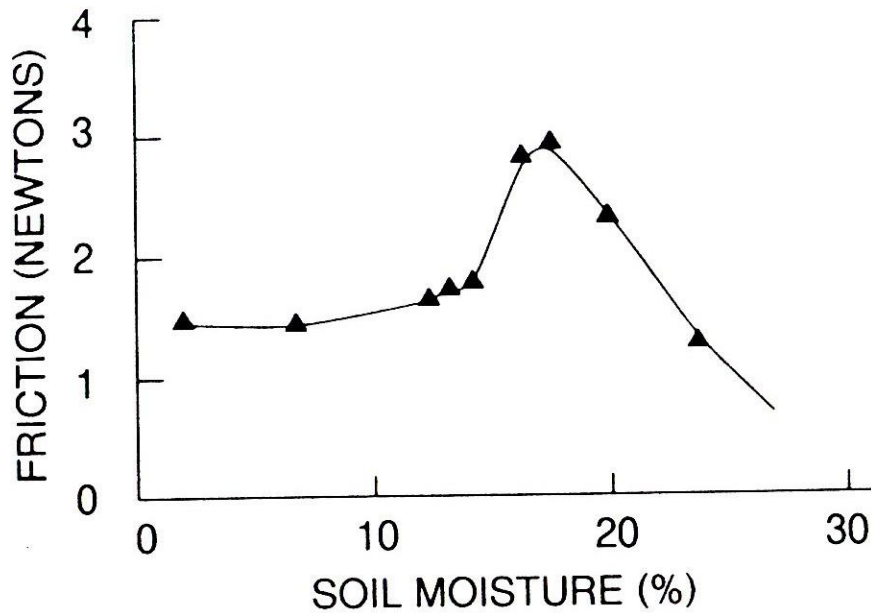


Figure 5.38—Effect of soil moisture content on apparent coefficient of friction (Gill and Vandenberg, 1968).

بررسی مکانیک ابزار خاکورزی

- مطالعات تجربی از طریق اندازه گیری مستقیم نیروی مورد نیاز
- مطالعات نظری از طریق ارائه مدل های ریاضی

– مدل Soehne برای یک ابزار ساده برای مطالعه تقابل بین خاک و ابزار در حین حرکت در داخل خاک برای برآورد نیروی کششی مورد نیاز

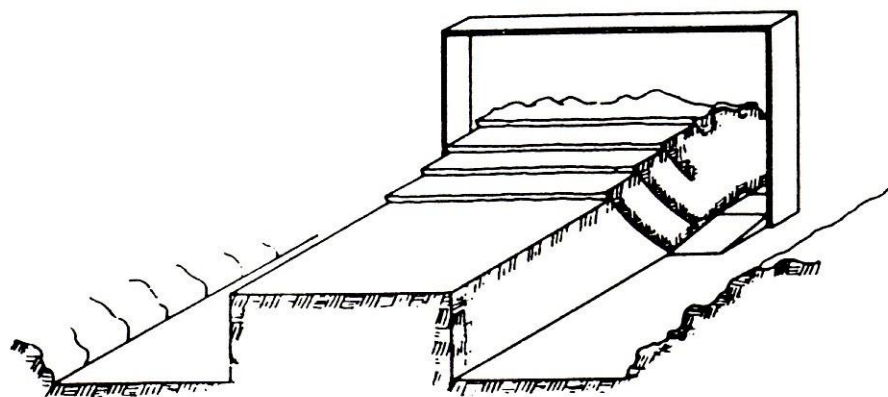


Figure 5.39—An inclined plane tillage tool (Soehne, 1956, cited in Gill and Vandenberg, 1968).

فرضیات مدل

- عوامل تاثیر گذار:

— اصطكاك بين خاك — فلز

— نيروي برشي در گسيختگي

— شتاب توده هاي خاك

— مقاومت برشي تيغه براي برش كف

Cutting Resistance

— جسم بدون شتاب حرکت مي کند (تعادل استاتیکی)

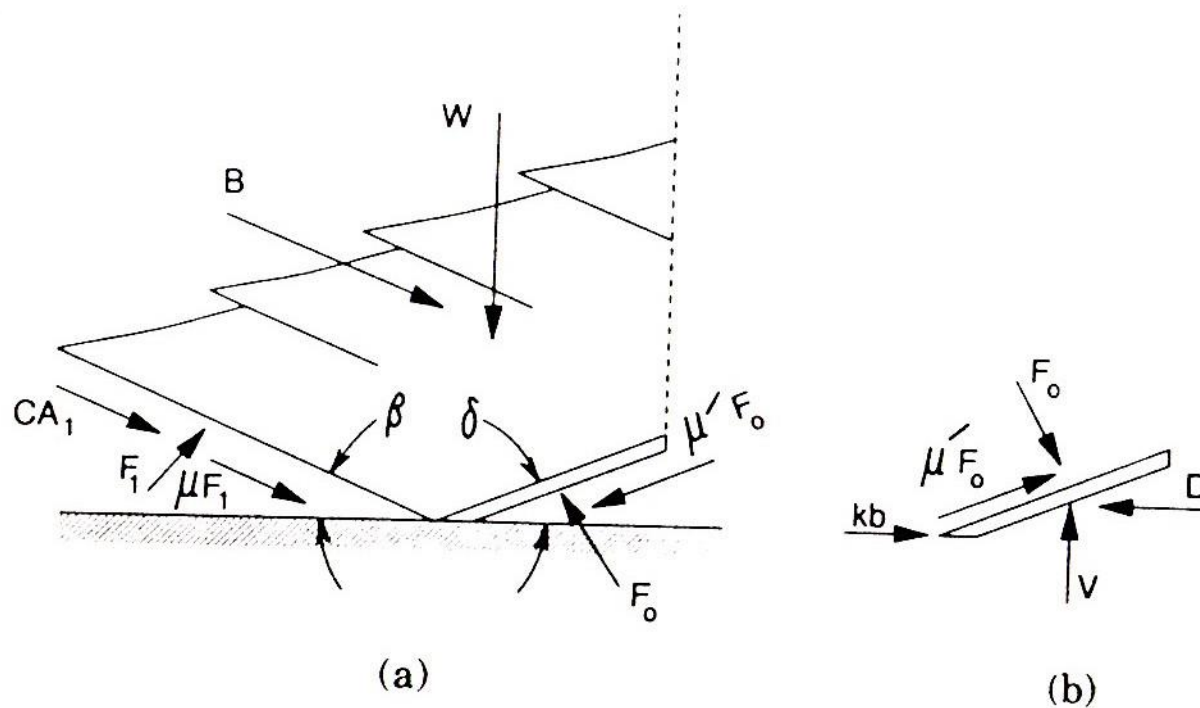


Figure 5.40—Soil and tool reaction forces (Soehne, 1956, cited in Gill and Vandenberg, 1968).

معادله تعادل استاتیکی نیروها در امتداد افقی برای تیغه

Summing forces in the horizontal direction and equating them to zero the following equation is obtained:

$$D = F_0 \sin \delta + \mu' F_0 \cos \delta + kb \quad (5.23)$$

where

D = horizontal draft force

μ' = coefficient of soil-metal friction

F_0 = normal load on the inclined plane

k = soil cutting resistance

δ = tool lift angle

The specific draft of the soil (D^*) is defined as:

$$D^* = D - kb$$

or

$$D^* = F_0 \sin \delta + F_0 \mu' \cos \delta \quad (5.24)$$

معادله تعادل استاتیکی نیروها در امتداد عمودی برای توده خاک

Summing all the vertical components of forces acting on the soil mass and equating them to zero for equilibrium results in the following equation:

$$W - F_0 (\cos \delta - \mu' \sin \delta) - F_1 (\cos \beta - \mu \sin \beta) + (CA_1 + B) \sin \beta = 0 \quad (5.25)$$

where

W = soil weight (N)

F_1 = normal force on the forward failure surface (N)

β = angle of the forward failure surface (rad)

μ = coefficient of internal soil friction (–)

A_1 = area of forward shear failure surface (m²)

C = soil cohesion (Pa)

B = soil acceleration force (N)

معادله تعادل استاتیکی نیروها در امتداد افقی برای توده خاک

$$F_0 (\sin \delta + \mu' \cos \delta) - F_1 (\sin \beta + \mu \cos \beta) - (CA_1 + B) \cos \beta = 0 \quad (5.26)$$

Equation 5.24 can be used to solve for F_0 . Substituting F_0 in equation 5.26 to solve for F_1 we get:

$$F_1 = \frac{D^* - (CA_1 + B) \cos \beta}{\sin \beta + \mu \cos \beta} \quad (5.27)$$

Substituting for F_0 and F_1 in equation 5.25 gives:

$$W - \left(D^* \frac{\cos \delta - \mu' \sin \delta}{\sin \delta + \mu' \cos \delta} \right) - [D^* - (CA_1 - B) \cos \beta] \left(\frac{\cos \beta - \mu \sin \beta}{\sin \beta + \mu \cos \beta} \right) + (CA_1 + B) \sin \beta = 0$$

Expanding and rearranging terms gives:

$$D^* \left(\frac{\cos \delta - \mu' \sin \delta}{\sin \delta + \mu' \cos \delta} + \frac{\cos \beta - \mu \sin \beta}{\sin \beta + \mu \cos \beta} \right) = W + \frac{CA_1 - B}{\sin \beta + \mu \cos \beta}$$

$$z = \left(\frac{\cos \delta - \mu' \sin \delta}{\sin \delta + \mu' \cos \delta} + \frac{\cos \beta - \mu \sin \beta}{\sin \beta + \mu \cos \beta} \right)$$

اگر Z را به صورت زیر در نظر بگیریم

$$D^* = \frac{W}{z} + \frac{CA_1 + B}{z(\sin \beta + \mu \cos \beta)} \quad (5.28)$$

این معادله رابطه بین نیروهای عمل کننده بر سیستم متشکل از خاک - ابزار را نشان می دهد

محاسبه وزن توده خاک (W)

$$W = \gamma b d^* \left(L_0 + \frac{L_1 + L_2}{2} \right)$$

where

γ = wet bulk density of soil (kg/m^3)

b = tool width (m)

d = tool depth (m)

$d^* = d \{[\sin(\delta + \beta)] / \sin \beta\}$ (m)

$L_1 = d \{[\cos(\delta + \beta)] / \sin \beta\}$ (m)

$L_2 = d^* \tan \delta$ (m)

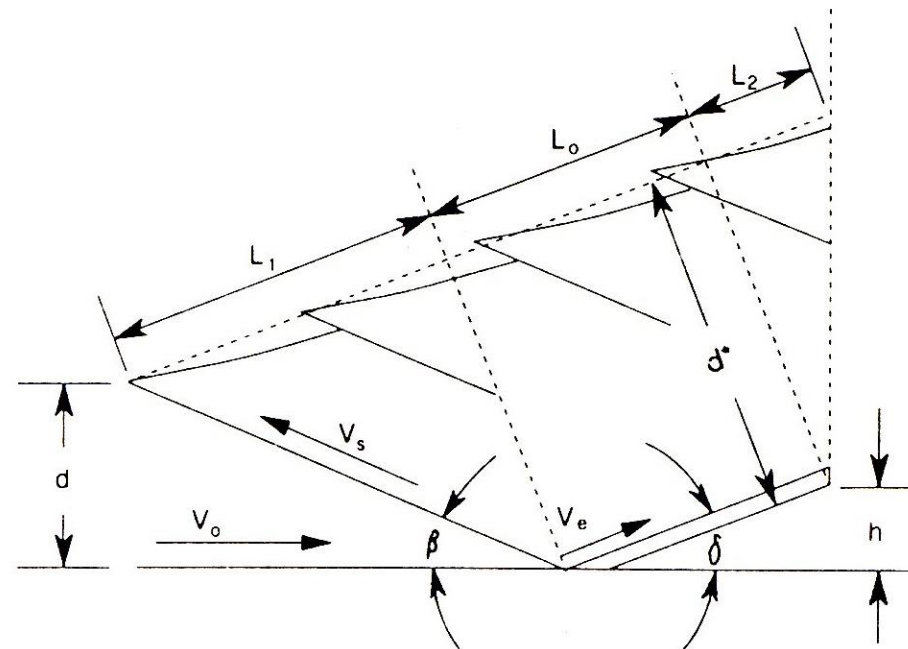


Figure 5.41-Segment of soil on the inclined tillage plane tillage tool (Soehne, 1956, cited in Gill and Vandenberg, 1968).

The shear plane area (A_1) can be determined easily from either figure 5.40 or 5.41 and it is given by:

$$A_1 = \frac{bd}{\sin \beta} \quad (5.30)$$

محاسبه سطح صفحه برش خاک

The acceleration force (B) is the only item in equation 5.27 that remains to be specified. Using Newton's Second Law of Motion:

$$B = m \frac{dv}{dt} \quad (5.31)$$

محاسبه نیروی ناشی از شتاب توده خاک

where

m = accelerated soil mass (m/s^2)

v = soil velocity (uniform within the mass) (m/s)

t = time (s)

The mass of the soil being accelerated or disturbed by the tool at time (t) is given by:

$$m = \frac{\gamma}{g} db t_0 v_0 \quad (5.32)$$

محاسبه جرم خاک شتاب گرفته توسط تیغه

where

v_0 = tool velocity (m/s)

t_0 = average time a particle of soil is engaged by the tool (s)

g = acceleration due to gravity (m/s^2)

$$v_s = v_0 + v_e$$

محاسبه شتاب (dv/dt)

بر اساس شکل 5.41 :

V_s : سرعت مطلق توده خاک

V_e سرعت نسبی بین توده خاک و تیغه

V_0 سرعت حرکت تیغه

این سه بردار تشکیل یک مثلث بسته را می دهند.

$$\frac{dv}{dt} \approx \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_s - 0}{t_0 - 0} = \frac{v_s}{t_0} \quad (5.33)$$

$v_0 = 0$ since the soil was initially at rest at time $t = 0$. In addition, since the velocity vectors (v_0 , v_s , and v_e) form a closed triangle, we can write the following relationship:

$$v_0 = v_s \cos \beta + v_e \cos \delta$$

and

$$v_s \sin \beta = v_e \sin \delta$$

so that v_e can be eliminated to give:

$$v_s = v_0 \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \quad (5.34)$$

Substituting equations 5.32, 5.33, and 5.34 into 5.31 and simplifying gives:

$$B = \frac{\gamma}{g} b d v_0^2 \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \quad (5.35)$$

از روی زاویه اصطکاک داخلی می توان ضریب اصطکاک خاک را محاسبه نمود

$$\mu = \tan \phi$$

where ϕ is the angle of internal friction. The angle β can be evaluated from the equation (see fig. 5.31):

از روی دایره موهر

$$\beta = (90^\circ - \phi)/2$$

رابطه بين سرعت و مقاومت برشي خاك (نيروي كشي مورد نياز)

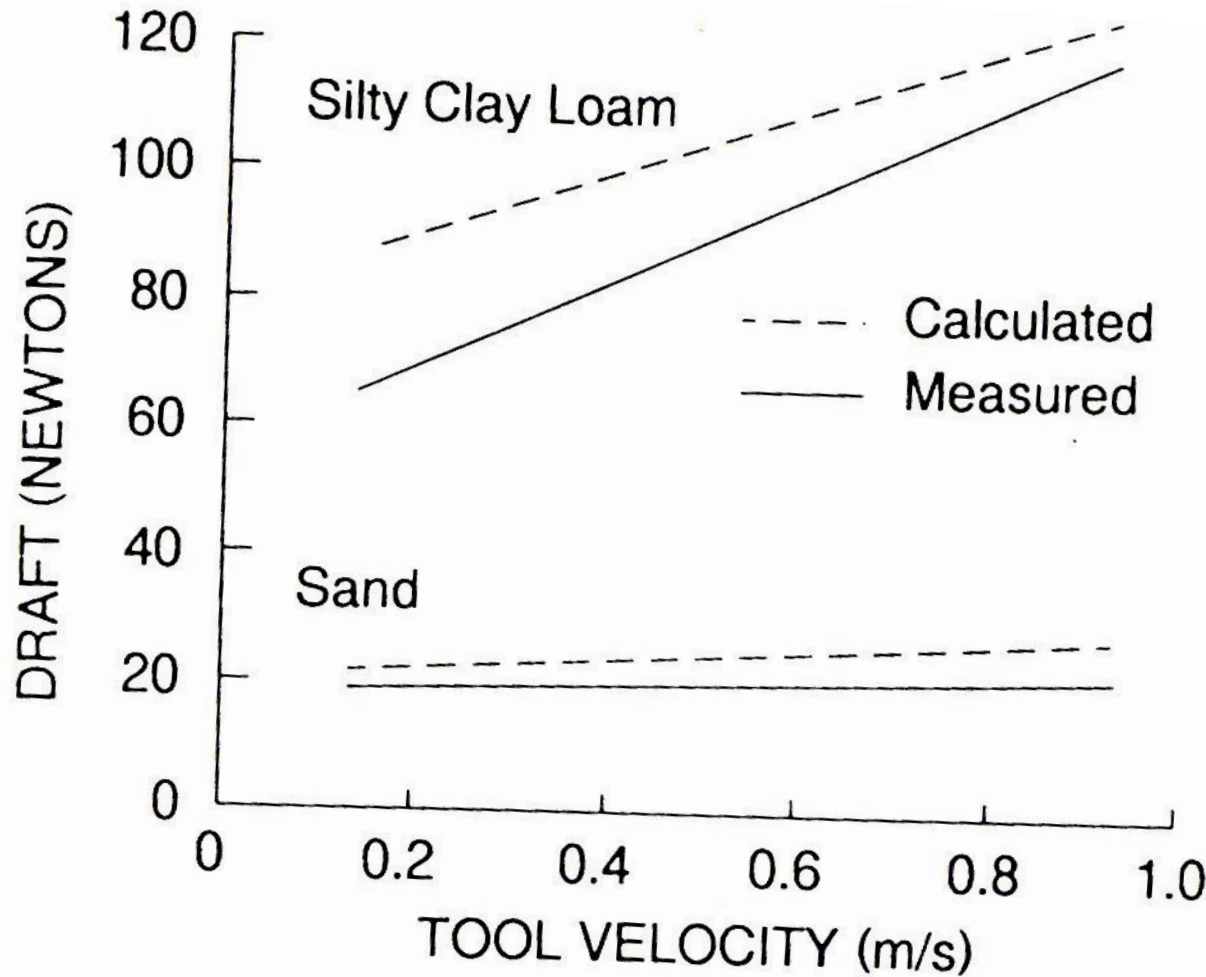
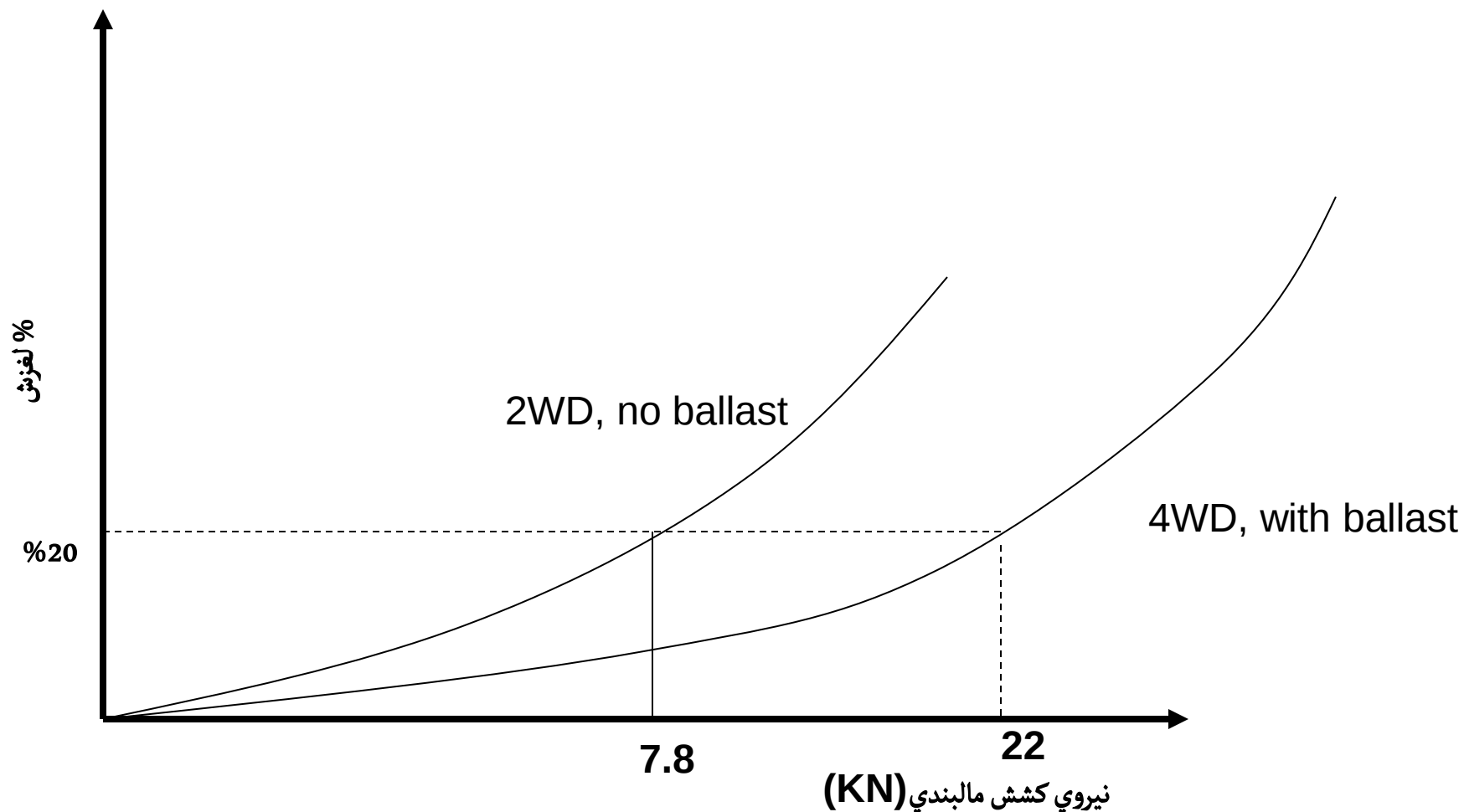


Figure 5.44—Measured and calculated draft of an inclined tillage tool at various tool velocities (Rowe and Barnes, 1961, cited in Gill and Vandenberg, 1968).

اثر مقاومت خاک بر عملکرد تراکتور



شکل پذیری در خاکها

- خاک های شکل پذیر Plastic Soils

- در محدوده خاصی از رطوبت به هر شکلی در می آیند
- پس از خشک شدن شکل خود را حفظ می کنند
- مثل خاک رسی ، رسی شنی

- خاک های شکل ناپذیر Non Plastic Soils

- در هیچ رطوبتی شکل خاصی به خود نمی گیرد
- خاک شنی

مراحل خشك شدن خاك هاي شكل پذير

1. بروز چسبندگي (همچسبي و دگرچسبي) در رطوبت زياد
 - باعث از بين رفتن ساختمان خاك در اثر شخم
 2. شكل پذيري (به هر شكل دلخواه)
 - هنوز نامناسب براي شخم
 3. ترد (Friable) بدليل شكنده بودن به اساني خرد مي شود
 - بهترين زمان براي شخم (اصطلاحاً گاو رو)
 4. سخت شدن (ايجاد كلوخه در اثر شخم)
- هرخاكي در يك رطوبت معين به حالت تردي مي رسد!!

خميرايي خاك ها

Soil Plasticity constant

- **Plasticity Limits** حدود خميرايي

- **Upper Plastic Limits** حد بالاي خميرايي

- درصد رطوبتي كه خاك بسختي جريان مي يابد

- به صورت مايع غليظ Viscous Liquid

- **Lower Plastic Limit** حد پايين خميرايي

- مرحله شروع شكل پذيري

- به عبارتي حداكثر رطوبتي كه خاك به صورت ترد باقي مي ماند

- **Plastic Number** رقم خميرايي

- تفاوت بين دو حد خميرايي

- بيانگر مقدار كلوئيد خاك است

- هر چه مقدار كلوئيد بيشتر باشد (رسي) حد پايين افزايش يافته **رقم خميرايي كم مي شود**

رابطه بين مقاومت شكستگي خاك و رقم خميرايي و رطوبت

• رابطه Nichols

$$F_s = 0.06 \frac{M}{P_l} (P_n + 20) + P_c + 0.6$$

F_s : مقاومت شكستگي خاك psi

M : درصد رطوبت خاك

P_l : حد پايين خميرايي

P_n : رقم خميرايي

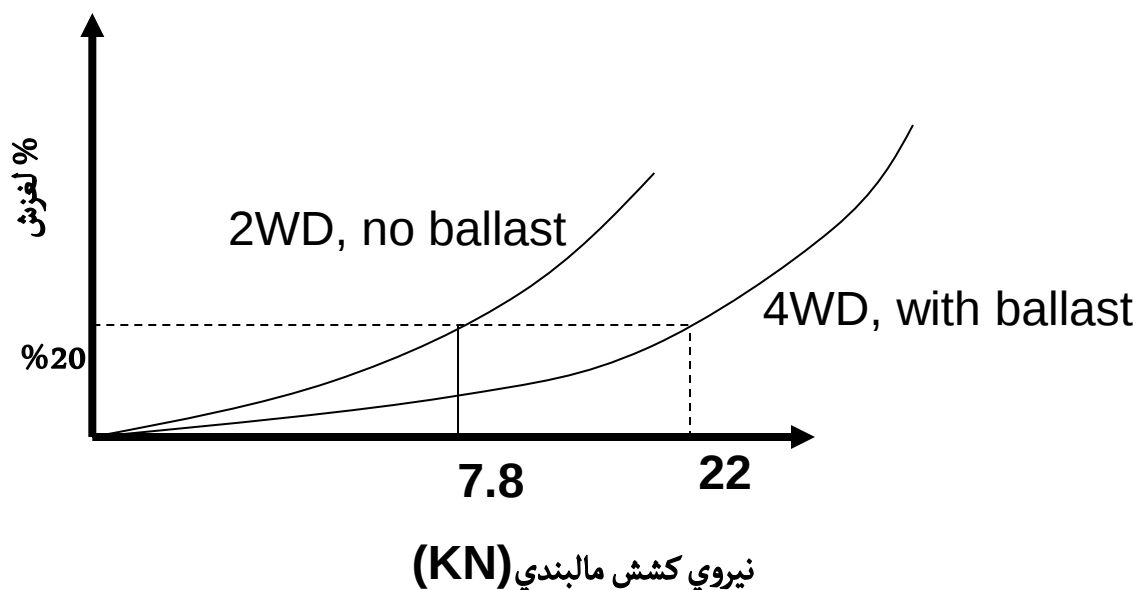
P_c : فشار وارد بر خاك psi

با افزايش رطوبت مقاومت خاك افزايش مي يابد تا برسد به حد پايين خميرايي كه پس از ان کاهش مي يابد
اين رابطه تا رطوبت حد پايين صادق است

مروري بر ككش در تراكتور

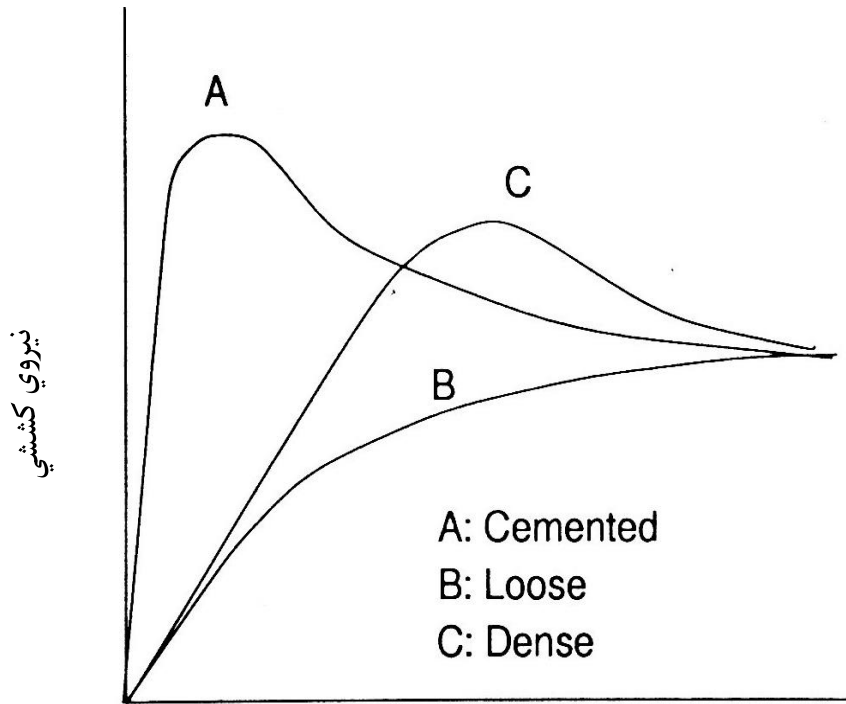
- ككش ايجاد شده در چرخ يا شني بستگي به مقاومت برشي خاك دارد
- خاك مرطوب بدليل مقاومت كم چرخ ها را دچار لغزش مي كند (بدليل پتانسل كم ككشي خاك)
- مقاومت در خاك هاي رسي مرطوب به صورت چسبندگي است (افزايش مقاومت غلتشي)
- مقاومت در خاك هاي سبك از طريق اصطكاك داخلي فراهم مي شود

کشش و وزن وارد بر خاک



- در خاکهای شنی چون مقاومت در اثر اصطکاک داخلی است افزایش وزن تنها را حل است
- در خاک های رسی مقاومت در اثر چسبندگی بوده وزن تاثیر نداشته و افزایش کشش با افزایش سطح ممکن است (افزایش مقاومت غلت)
- در خاک های معمولی هر دو عامل اصطکاک داخلی و سطح باعث افزایش کشش می گردد

لغزش یا بکسوات Slip



جابجايي (تغيير شكل خاك)

- مشابه رابطه کرنش - تنش در خاك است
- در اثر اعمال نيروي كششي در خاك جابجايي يا تغيير شكل ايجاد مي گردد
- جابجايي و تغيير شكل خاك باعث کاهش سرعت پيشروي يا لغزش مي شود
- بيشترين مقاومت خاك در يك حد معين از لغزش حاصل مي شود
- هنگام كار بايد لغزش کمتر از حداكثر مقدار خود باشد زيرا ساختمان خاك از بين مي رود

رابطه بين سرعت و وزن مورد نیاز وارد بر چرخ

افزایش سرعت سبب افزایش مقاومت خاک می شود
وزن مورد نیاز کم می شود

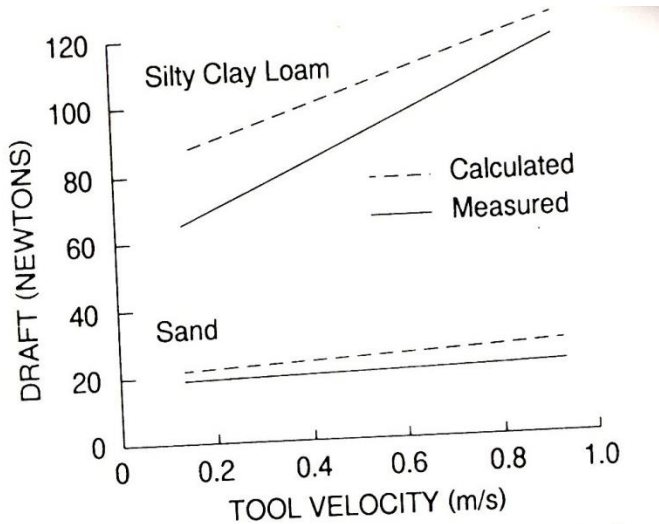


Figure 5.44—Measured and calculated draft of an inclined tillage tool at various tool velocities (Rowe and Barnes, 1961, cited in Gill and Vandenberg, 1968).

سرعت پیشروی Km/hr	وزن وارد بر چرخ kg/kw	
	2WD	4WD
1.6	268	189
6.4	67	47
9.7	44	31
13.0	33	24

تعاریف کشش

- **Traction**
- **Coefficient of traction (P/ W)**
- **Tractive Efficiency = D.B. Power/Axle Power**
- **Rolling Resistance= axle power – D.B. Power**

$$\%slip = \frac{N_l - N_{nl}}{N_l} \times 100$$

روش هاي اندازه گيري لغزش

- روش مسافت ثابت

- روش دور ثابت

عوامل موثر بر لغزش

- خصوصیات خاک
 - بافت خاک
 - رطوبت خاک
 - سطح خاک (بقایای گیاهی)
- خصوصیات چرخ
 - سطح تماس (قطر و اندازه)
 - فشار باد
 - وزن
 - انتقال وزن
 - عاج
- زاویه
- فاصله
- ارتفاع

تخمین تجربی لغزش

مشاهده اثر بجا مانده از چرخ

Fig. 90—Not Enough Weight Has Been Added to Rear

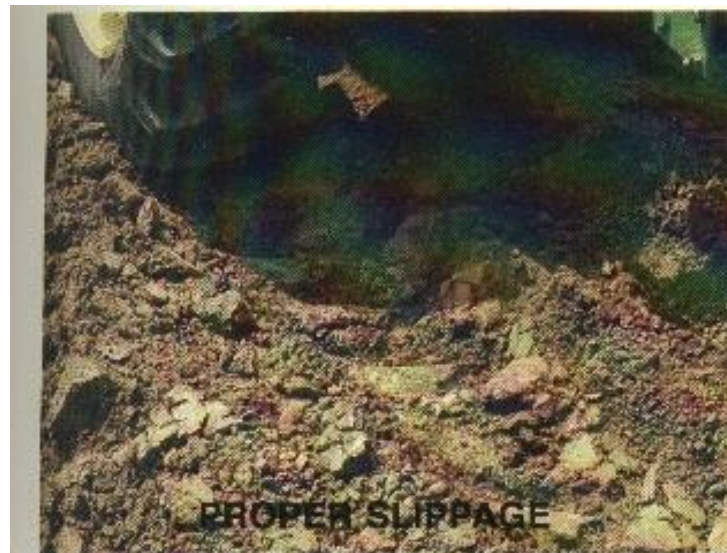
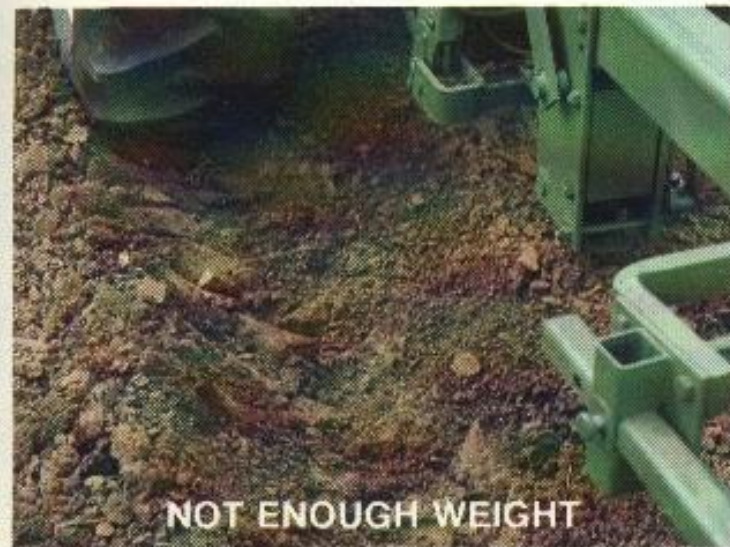


Fig. 88—Tread Marks Show Proper Slippage

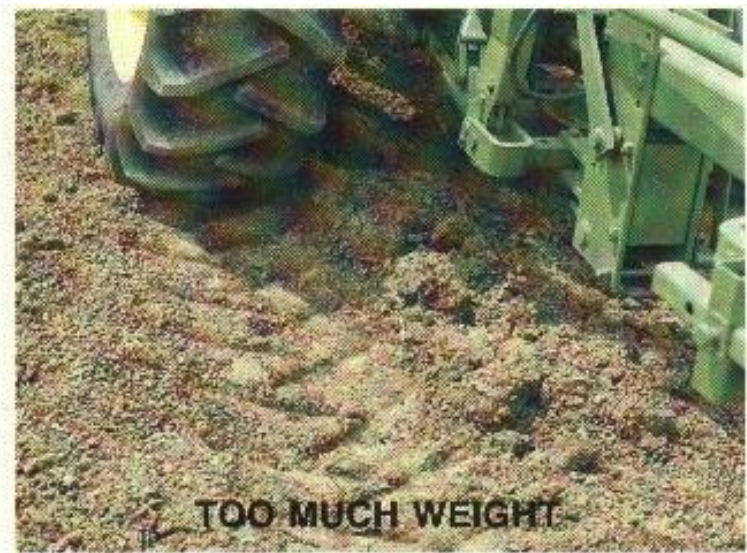
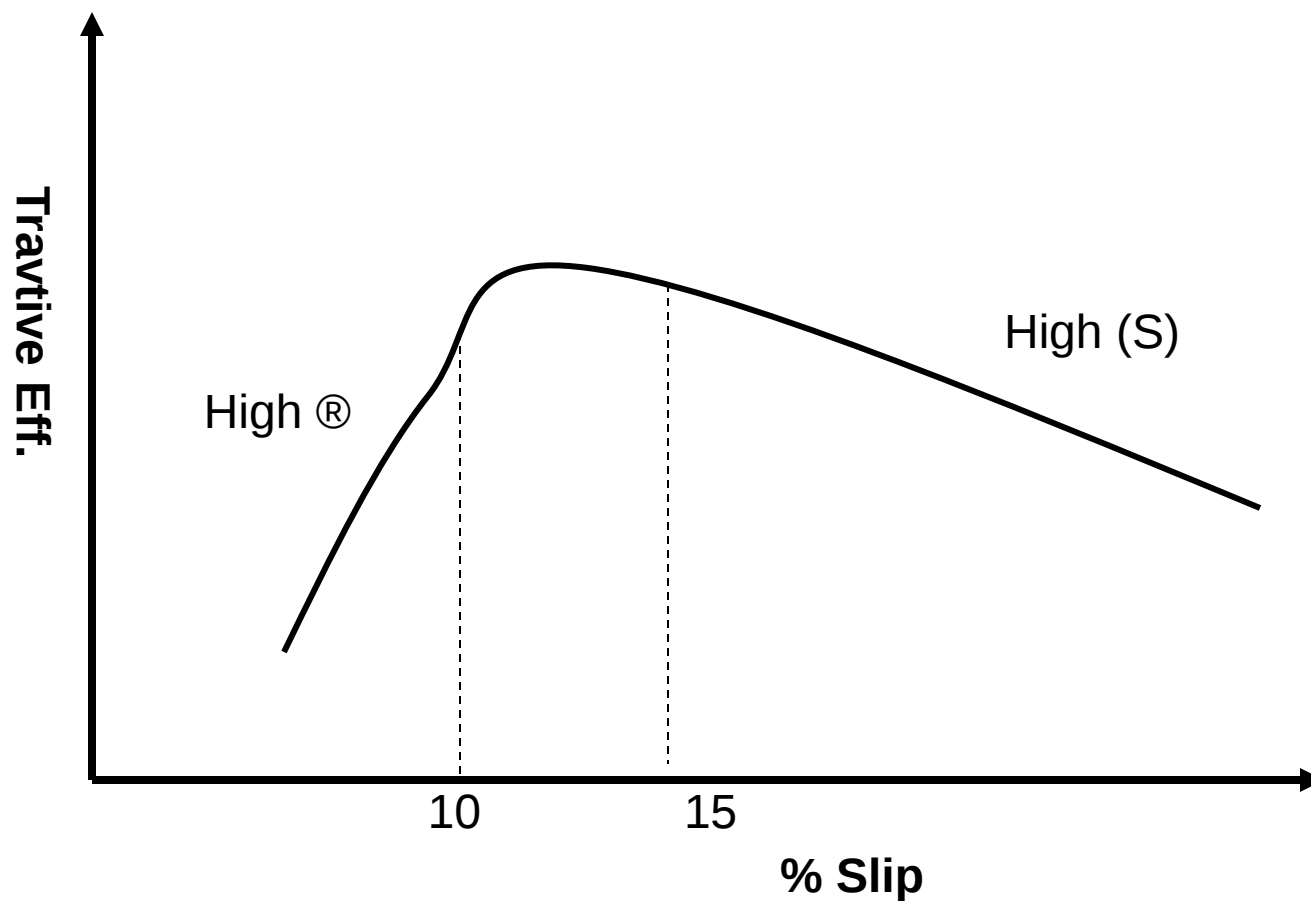


Fig. 89—Too Much Weight Has Been Added to Rear

لغزش ، بازده کششی ، مقاومت غلت



وسایل کمک کششی

Traction Aids

- Ballast
- Dual wheels
- Cage wheels
- Strake (طوقه)
- Tire Track

— قابل نصب روی چرخ ها

— سادگی نصب

— مقاومت کم در مقابل سنگ

— دوران مشکل تراکتور



خسارت وارد بر زمین در اثر تردد

• فشردگی **Compaction**

— وزن مخصوص خشک خاک حدود 65/2

— معیار فشردگی

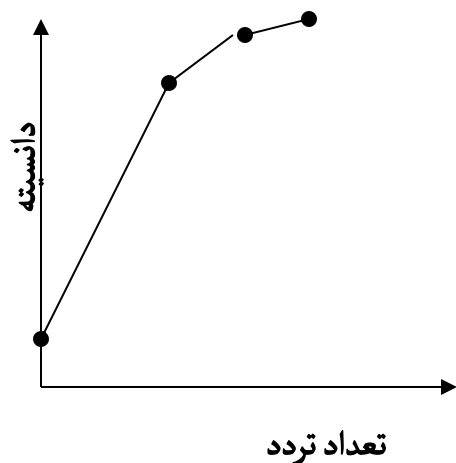
• وزن مخصوص ظاهري

• درصد خلل و فرج

• مقاومت نفوذ **Penetration Resistance**

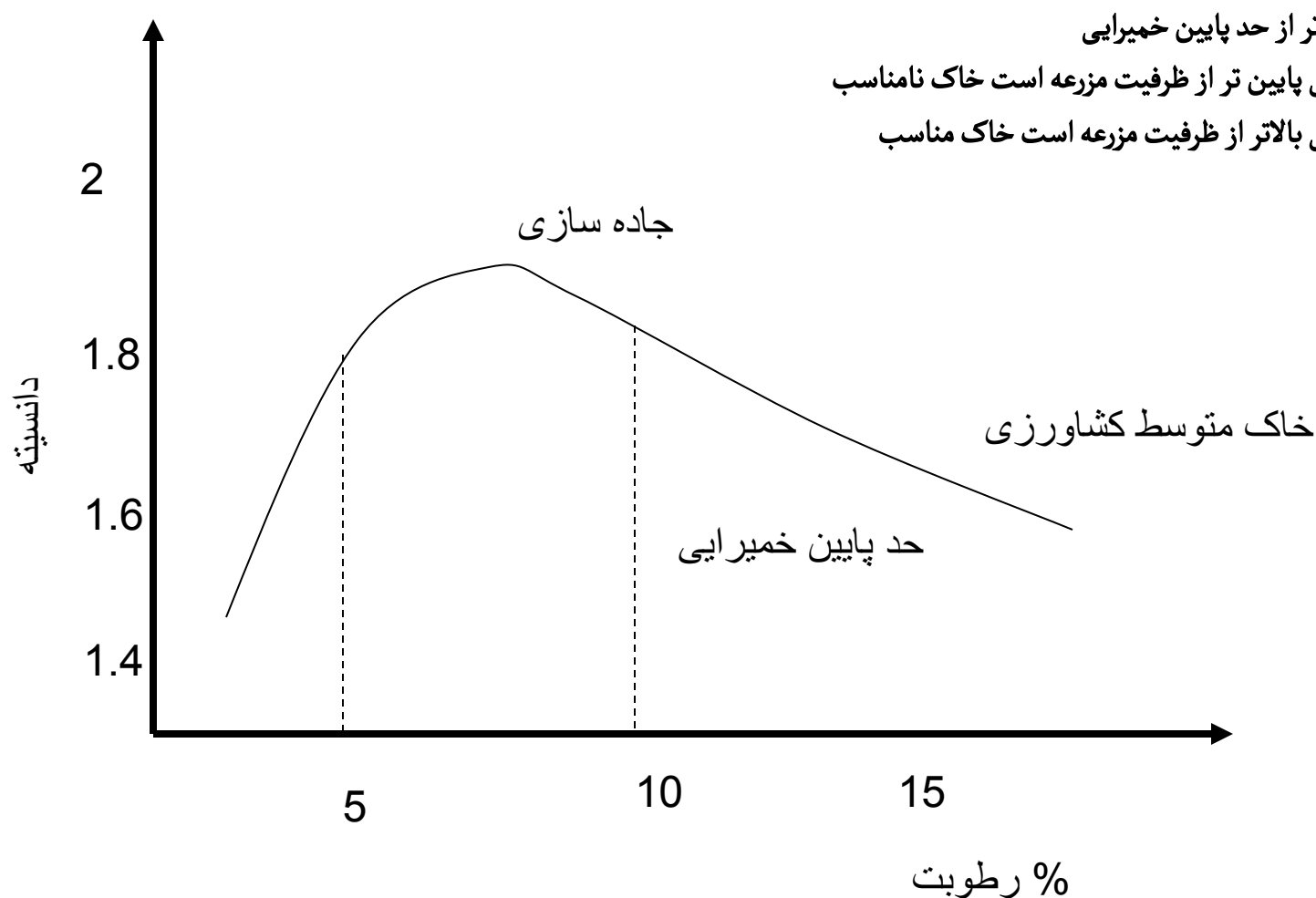
— با استفاده از نفوذ سنج **Penetrometer**

فشردگی تکراری Repeated Compaction



- حداکثر فشردگی در اولین تردد
- — چهار چرخ کردن تراکتور تاثیر زیادی بر فشردگی ندارد
- بیشترین تاثیر فشردگی در اثر رطوبت است
- 2 تا 3% تغییر در رطوبت خسارت جبران ناپذیر
- خاک خشک فشرده نمی شود
- در رطوبت های بالا چون خلل و فرج از اب پر است و اب غیر قابل تراکم است فشردگی کم می شود

اثر رطوبت بر فشردگی



- بیشترین فشردگی کمی پایین تر از حد پایین خمیرایی
- خاکهایی که حد پایین خمیرایی پایین تر از ظرفیت مزرعه است خاک نامناسب
- خاکهایی که حد پایین خمیرایی بالاتر از ظرفیت مزرعه است خاک مناسب

عوارض فشردگی

- کاهش ریشه دوانی
- کاهش زهکشی داخلی خاک
- کاهش تهویه خاک
- نیاز به توان بیشتر برای عملیات خاکورزی

خلاصه بحث فشردگی

- اگر چه عواملی مثل نزولات جوی و تردد انسان و دام موثر است ولی بیشترین فشردگی مربوط به تردد ماشین است
- درکشت مکانیزه چون ماشین آلات بزرگتر هستند اثر سوء بیشتر دارند
- بدترین فشردگی با رطوبت قبل از FC است چون خلل و فرج اب و هوا وجود داشته روانکاری ذرات راحت تر انجام می گیرد
- قوانین جاده ای حداکثر بار اکسل را 9 تن در نظر می گیرد حال آنکه در کشاورزی بارها به مراتب بیشتر هستند
 - کمباین پر تا 15 تن
 - کودکار های دامی بزرگ 17 تن

روش های کاهش خسارت به خاک

- از کار بر روی خاک های مرطوب ممانعت شود
- تردد در حداقل باشد
- مدیریت تردد در مزرعه (Traffic Farming)
- وزنه و لغزش تراکتور مناسب انتخاب شود
- وزنه های اضافی از تراکتور باز شوند
- از ادواتی استفاده شود که انتقال وزن بیشتر داشته باشند
- از وسایل کمک کشش استفاده شود
- هر جا امکان دارد از سرعت بیشتر و کشش کمتر استفاده شود