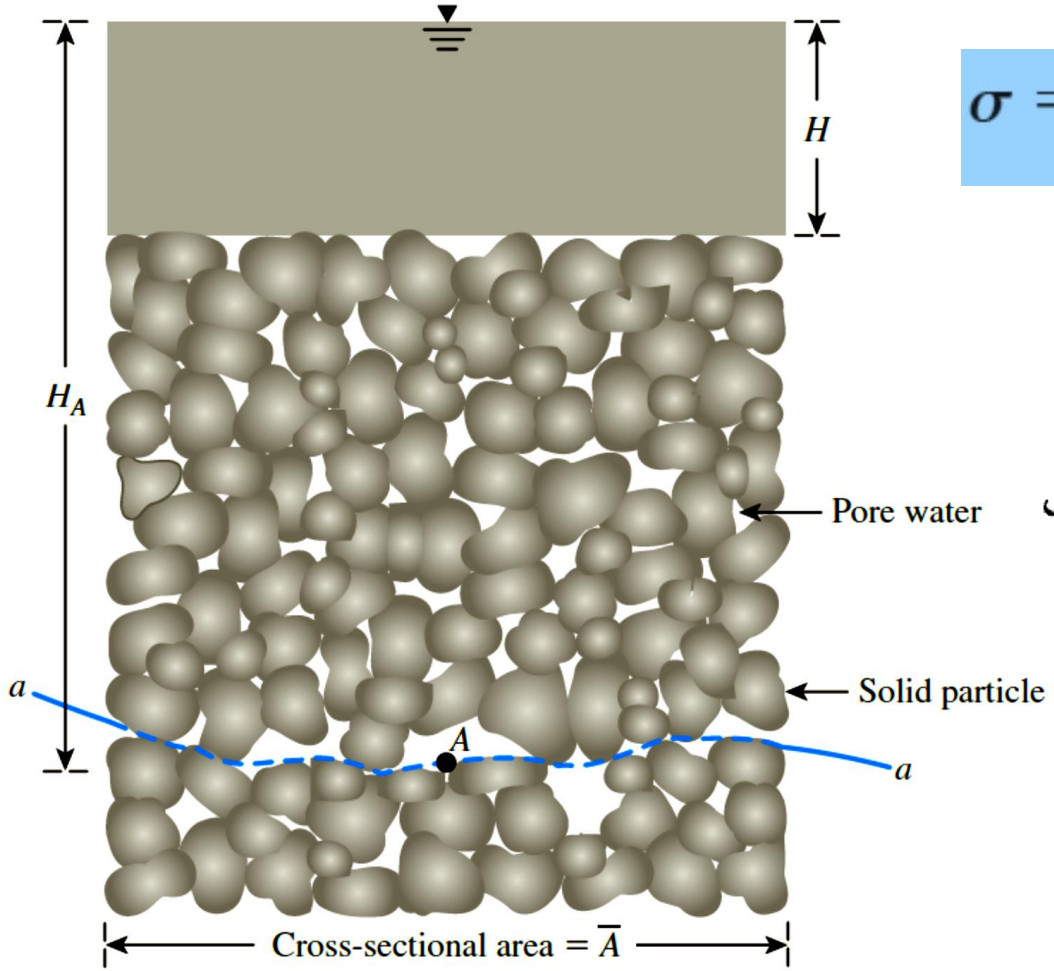
فصل ششم

تنش های درجا

In Situ Stresses

تنش‌های موجود در خاک اشباع بدون تراوش

در شکل ستونی از توده خاک اشباع نشان داده شده است که در هیچ سمت آن تراوشی وجود ندارد. تنش کل در تراز نقطهٔ A را می‌توان از روی وزن مخصوص اشباع خاک و وزن مخصوص آب روی آن به دست آورد. بنابراین:



$$\sigma = H\gamma_w + (H_A - H)\gamma_{sat}$$

σ = تنش کل در تراز نقطهٔ A

γ_w = وزن مخصوص آب

γ_{sat} = وزن مخصوص اشباع خاک

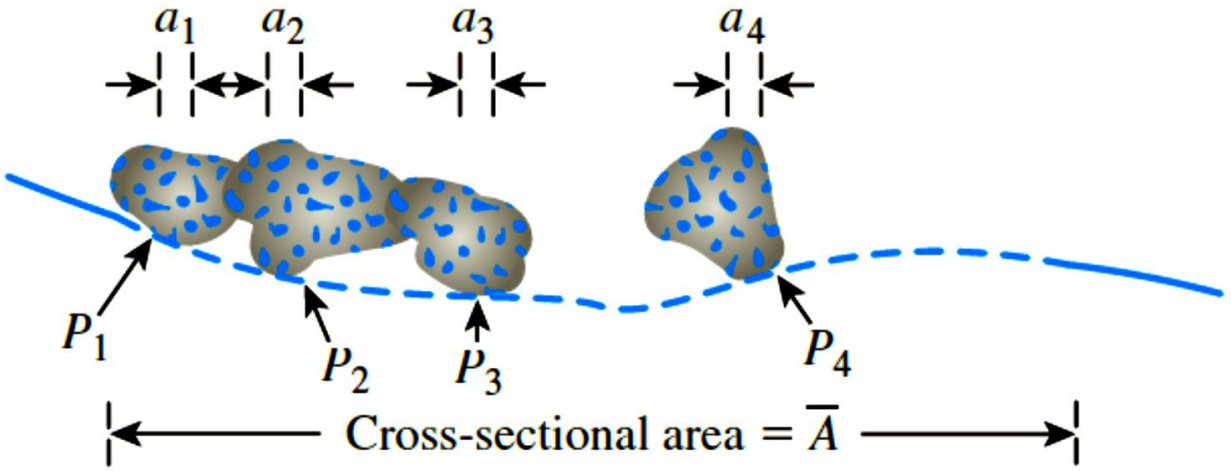
H = ارتفاع سطح ایستابی از بالای ستون خاک

H_A = فاصلهٔ میان نقطهٔ A و سطح ایستابی.

تنش کل σ را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد:

۱- بخشی که توسط آب موجود در فضاهای خالی پیوسته تحمل می‌شود. این بخش در امتدادهای مختلف شدت یکسانی دارد.

۲- باقی ماندهٔ تنش کل که توسط بخش جامد خاک در نقاط تماس ذرات تحمل می‌شود. مجموع مؤلفه‌های قائم نیروهای ایجاد شده در نقاط تماس ذرات جامد در واحد سطح مقطع توده خاک را **تنش مؤثر** می‌نامند.



چنانچه a_s سطح مقطع اشغال شده با نقاط تماس ذرات جامد با یکدیگر باشد (یعنی $a_s = a_1 + a_2 + a_3 + \cdots + a_n$)، فضای اشغال شده با آب برابر است با $(\overline{A} - a_s)$. بدین ترتیب می‌توان نوشت:

$$\sigma = \sigma' + \frac{u(\overline{A} - a_s)}{\overline{A}} = \sigma' + u(1 - a'_s)$$

$u = H_A \gamma_w$ = فشار آب منفذی (یعنی فشار ایستابی یا هیدرواستاتیکی در نقطهٔ A)

$a'_s = a_s / \overline{A}$ = بخشی از سطح مقطع واحد توده خاک که توسط نقاط تماس ذرات جامد با یکدیگر اشغال شده است.

مقدار a'_s بسیار کوچک است و آن را می‌توان برای محدودهٔ فشار معمول در مسایل عملی نادیده‌گرفت.

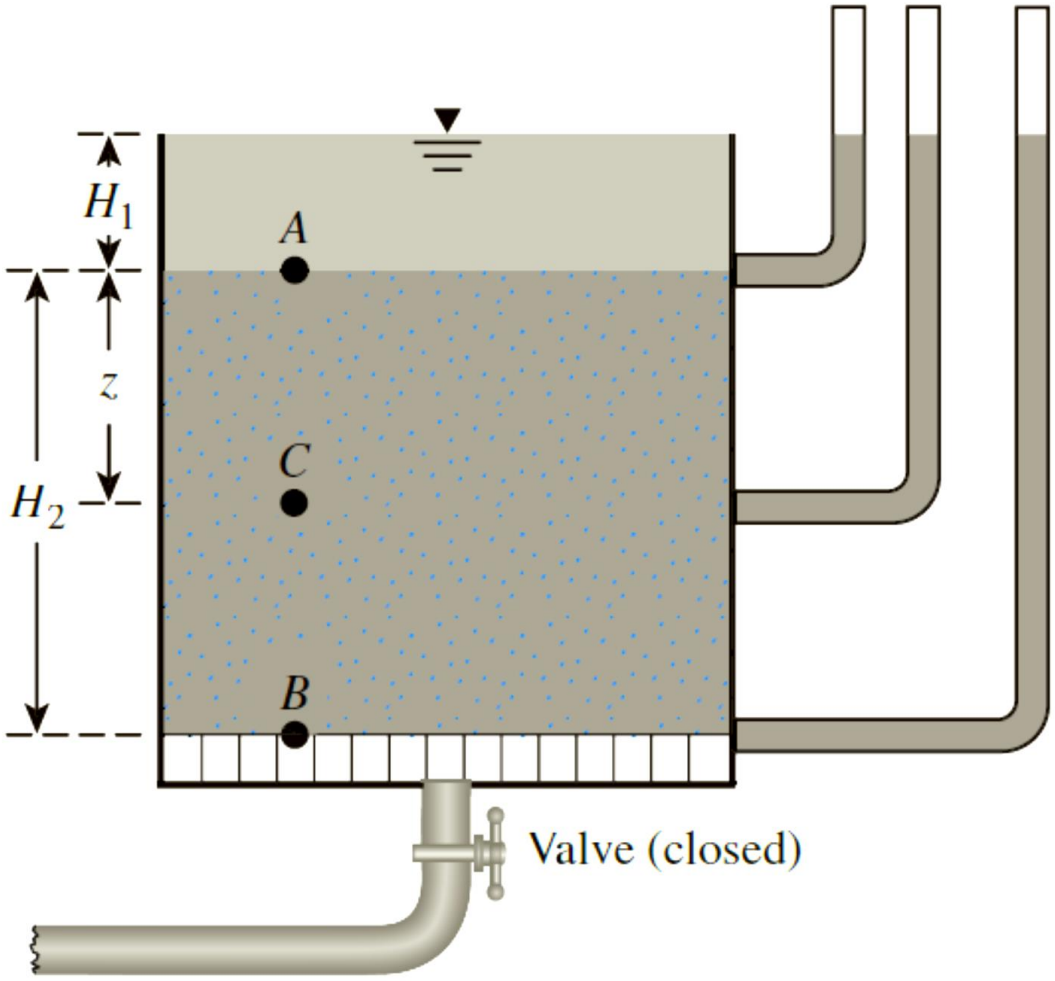
$$\sigma = \sigma' + u$$

با جایگزین کردن $\sigma = H\gamma_w + (H_A - H)\gamma_{sat}$ به جای σ

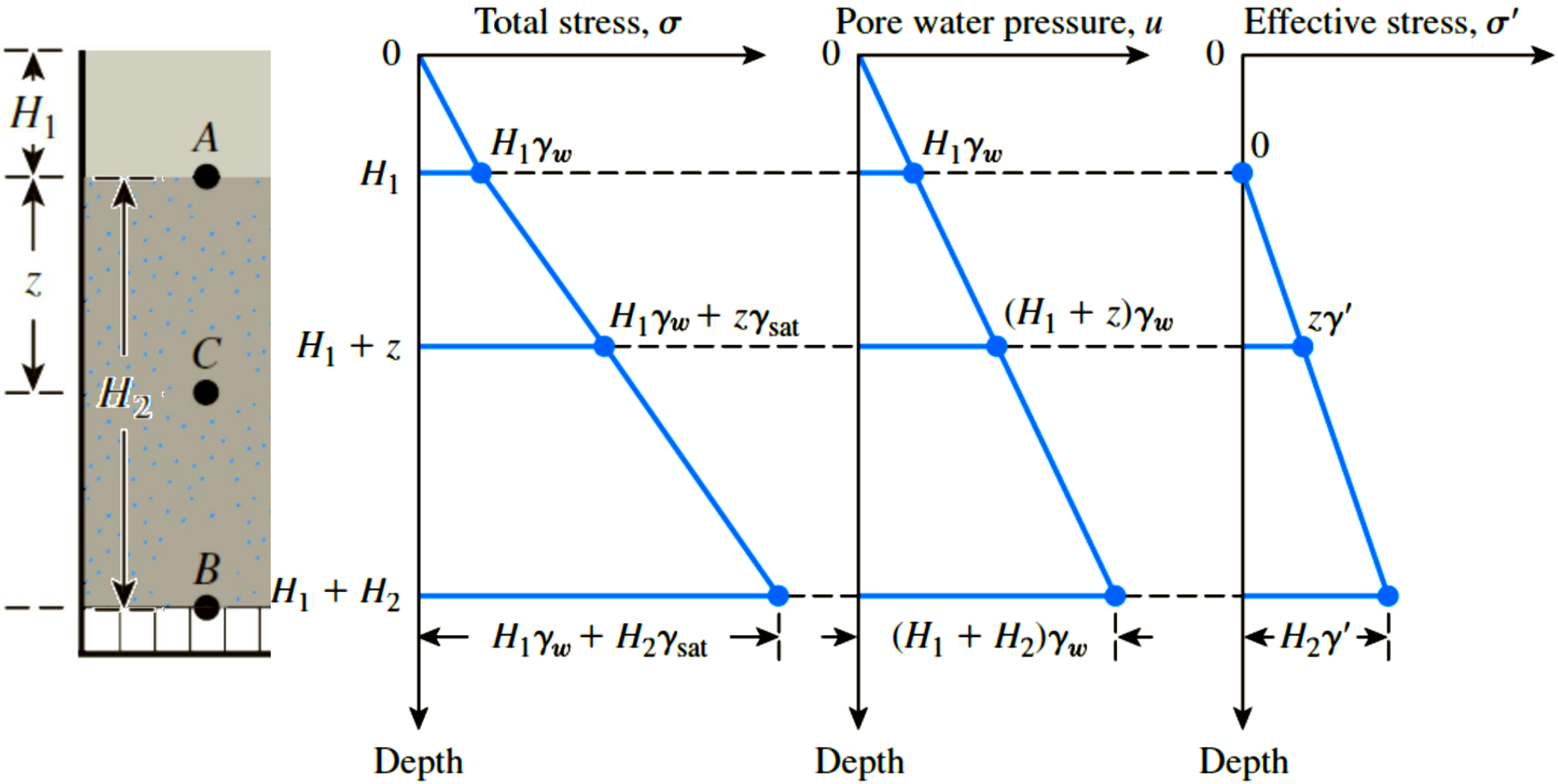
$$\begin{aligned}\sigma' &= [H\gamma_w + (H_A - H)\gamma_{sat}] - H_A\gamma_w \\ &= (H_A - H)(\gamma_{sat} - \gamma_w) \\ &= (\text{Height of the soil column}) \times \gamma'\end{aligned}$$

که در این جا $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ برابر است با وزن مخصوص غوطه‌ور خاک. بنابراین دیده می‌شود که تنش مؤثر در هر نقطهٔ A مستقل از عمق H آب در بالای خاک غوطه‌ور است.

در شکل لایه خاک غوطه‌ور درون یک مخزن بدون تراوش نشان داده شده است.



تغییرات تنش کل، فشار آب منفذی و تـنش مـؤثر لایـه خـاک غوطه‌ور درون مخزن بدون تراوش نسبت به عمق نشان داده شده است.

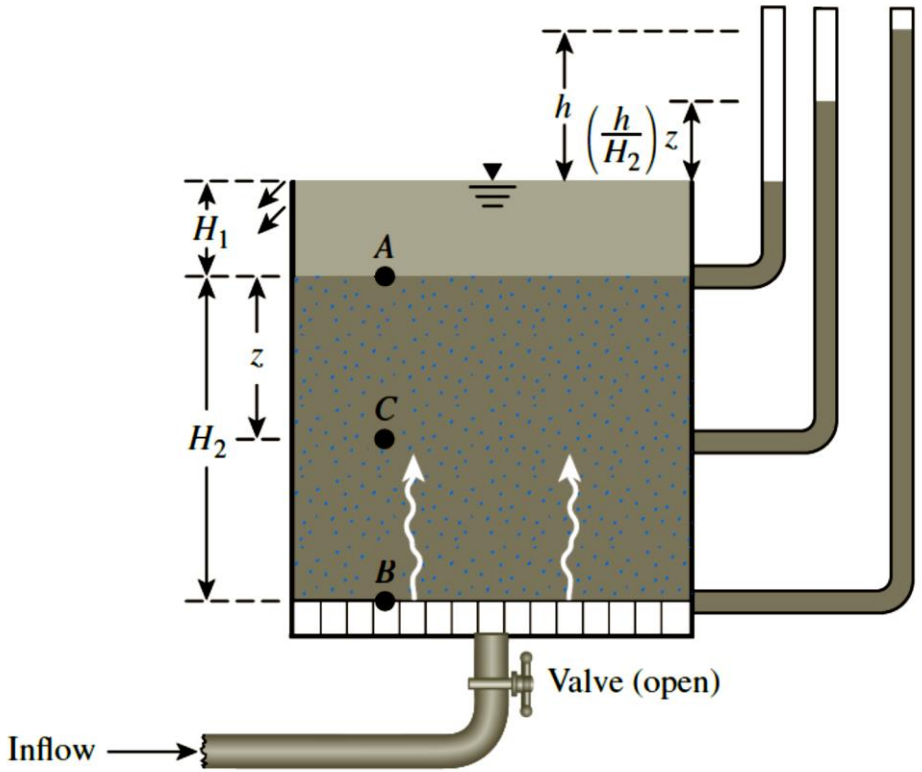


به طور خلاصه، تنش مؤثر تقریباً نیرویی است که واحد سطح اسکلت خاک تحمل می‌کند. تنش مؤثر موجود در توده خاک، تغییر حجم و مقاومت را کنترل می‌کند. افزایش تنش مؤثر سبب تغییر حالت خاک به صورت تودهٔ متراکم می‌شود.

اصل تنش مؤثر احتمالاً مهمترین مفهوم در مهندسی ژئوتکنیک است. تراکم‌پذیری و مقاومت برشی خاک تا حد زیادی به تنش مؤثر وابسته است. بنابراین مفهوم تنش مؤثر در حل مسایل مهندسی ژئوتکنیک مانند فشار جانبی خاک بر روی سازه‌های حایل، ظرفیت باربری و نشست پی‌ها و پایداری شیروانی‌های خاک بسیار مهم است.

تنش‌ها در خاک اشباع با تراوش رو به بالا

در شکل لایه‌ای از یک خاک دانه‌ای درون یک مخزن نشان داده شده است که در آن تراوش رو به بالا با وارد کردن آب از طریق شیر موجود در پایین مخزن انجام می‌شود. میزان جریان آب ثابت نگه داشته می‌شود. افت بار ناشی از تراوش رو به بالا در بین ترازهای A و B برابر با h است. با به خاطر داشتن این که تنش کل در هر نقطه از توده خاک تنها از وزن خاک و آب بالای آن ناشی می‌شود، محاسبات تنش مؤثر در نقاط A و B به صورت زیر است:



At A,

- Total stress: $\sigma_{\mathrm{A}} = H_1\gamma_w$
- Pore water pressure: $u_A = H_1\gamma_w$
- Effective stress: $\sigma'_A = \sigma_A - u_A = 0$

At B,

- Total stress: $\sigma_B = H_1\gamma_w + H_2\gamma_{\mathrm{sat}}$
- Pore water pressure: $u_B = (H_1 + H_2 + h)\,\gamma_w$
- Effective stress: $\sigma'_B = \sigma_B - u_B$

$$= H_2(\gamma_{\mathrm{sat}} - \gamma_w) - h\gamma_w$$

$$= H_2\gamma' - h\gamma_w$$

At C,

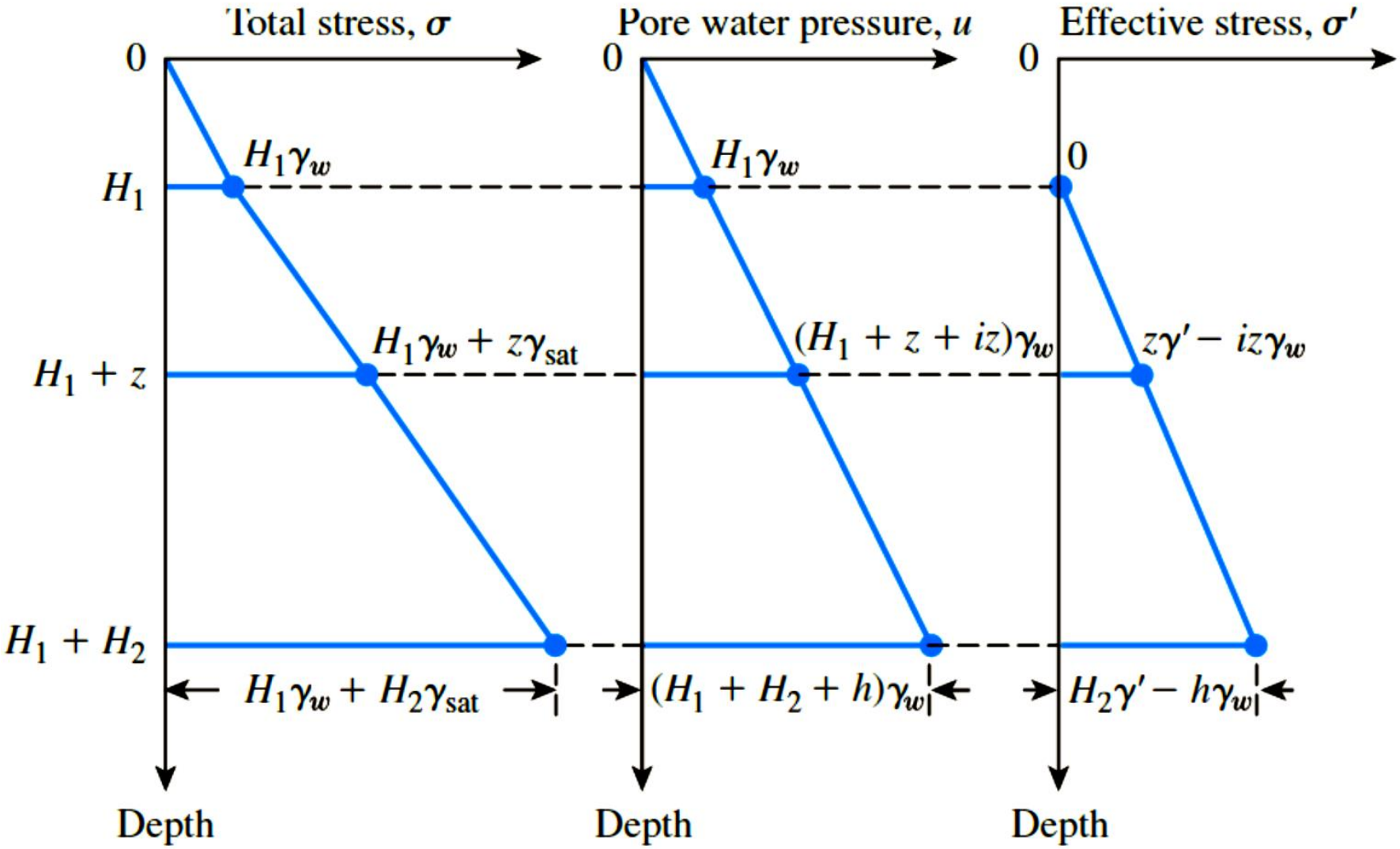
- Total stress: $\sigma_C = H_1\gamma_w + z\gamma_{sat}$
- Pore water pressure: $u_C = \left(H_1 + z + \frac{h}{H_2}z\right)\gamma_w$
- Effective stress: $\sigma'_C = \sigma_C - u_C$

$$= z(\gamma_{sat} - \gamma_w) - \frac{h}{H_2}z\gamma_w$$

$$= z\gamma' - \frac{h}{H_2}z\gamma_w$$

توجه داشته باشید که h/H_2 شیب یا گرادیان هیدرولیکی i ناشی از جریان است و بنابراین:

$$\sigma'_C = z\gamma' - iz\gamma_w$$


Total stress, σ
Pore water pressure, u
Effective stress, σ′
0
0
0
$H_1\gamma_w$
$H_1\gamma_w$
0
H_1
$H_1 + z$
$H_1\gamma_w + z\gamma_{sat}$
$(H_1 + z + iz)\gamma_w$
$z\gamma' - iz\gamma_w$
$H_1 + H_2$
$H_1\gamma_w + H_2\gamma_{sat}$
$(H_1 + H_2 + h)\gamma_w$
$H_2\gamma' - h\gamma_w$
Depth
Depth
Depth

چنانچه میزان تراوش و بنابراین شیب هیدرولیکی به تدریج افزایش پیدا کند، به یک حالت حدی خواهیم رسید که در آن:

$$\sigma'_C = z\gamma' - i_{\text{cr}} z\gamma_w = 0$$

که در این جا: i_{cr} = شیب هیدرولیکی بحرانی (برای تنش مؤثر صفر).

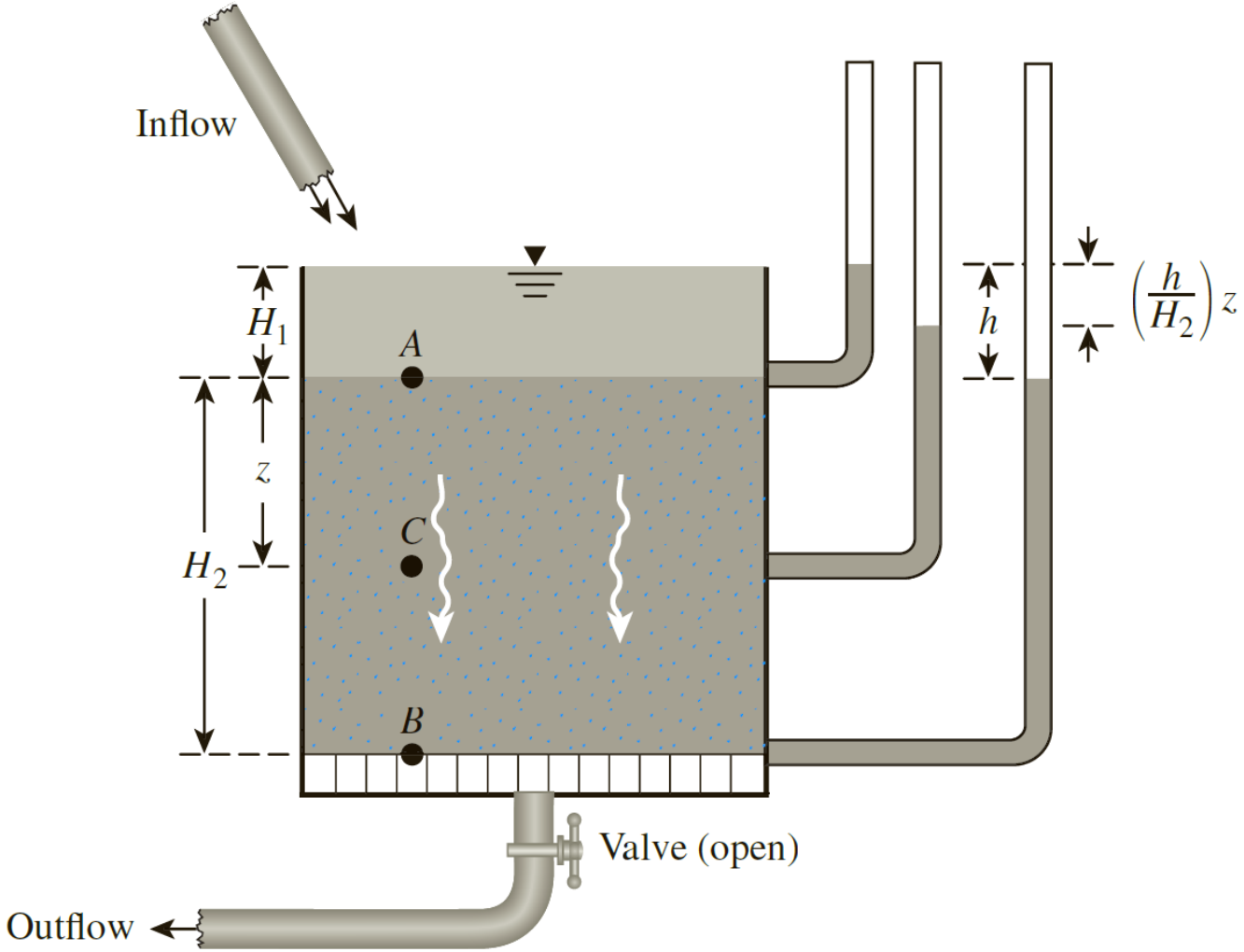
در این شرایط پایداری خاک از بین می‌رود. به این وضعیت معمولاً **شرایط جوشش یا تعلیق** گفته می‌شود.

$$i_{\text{cr}} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

برای اکثر خاک‌ها، مقدار i_{cr} از ۰/۹ تا ۱/۱ با مقدار متوسط ۱ متفاوت است.

تنش‌ها در خاک اشباع با تراوش رو به پایین

در شکل شرایط تراوش رو به پایین نشان داده شده است. سطح آب درون مخزن خاک با تنظیم کردن جریان ورودی از بالا و جریان خروجی در پایین ثابت نگه داشته می‌شود.



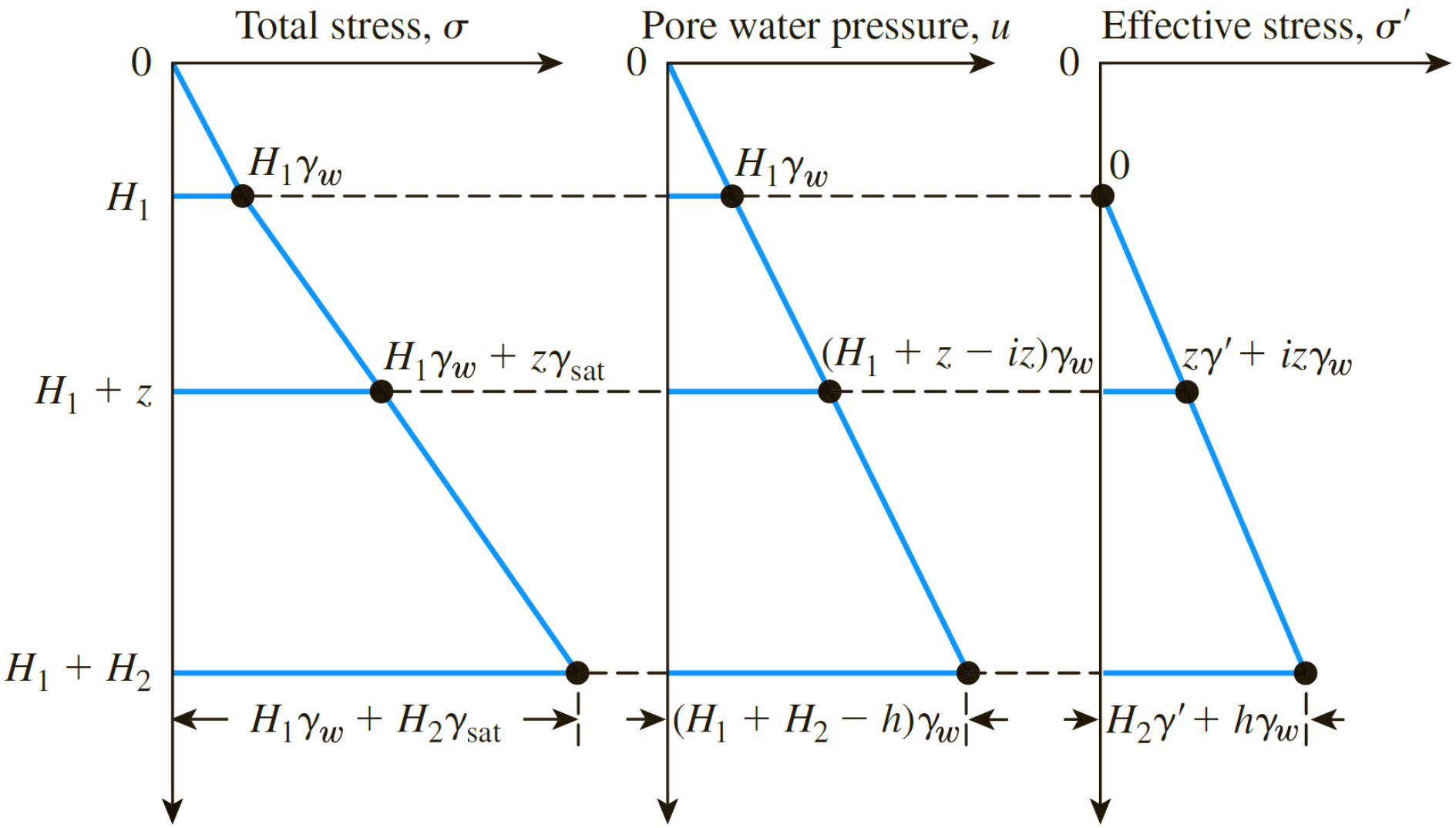
شیب هیدرولیکی ناشی از تراوش رو به پایین برابر است با: $i=h/H_2$. تنش کل، فشار آب منفذی و تنش مؤثر در نقطهٔ C به ترتیب عبارتند از:

$$\sigma_C = H_1\gamma_w + z\gamma_{\text{sat}}$$

$$u_C = (H_1 + z - iz)\gamma_w$$

$$\sigma'_C = (H_1\gamma_w + z\gamma_{\text{sat}}) - (H_1 + z - iz)\gamma_w$$

$$= z\gamma' + iz\gamma_w$$

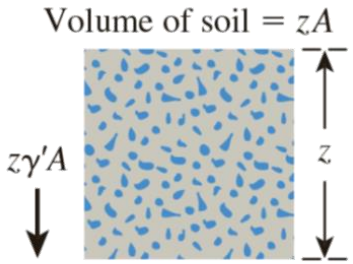

Total stress, σ
Pore water pressure, u
Effective stress, σ'
0
0
0
H_1
$H_1 + z$
$H_1 + H_2$
$H_1\gamma_w$
$H_1\gamma_w$
0
$H_1\gamma_w + z\gamma_{sat}$
$(H_1 + z - iz)\gamma_w$
$z\gamma' + iz\gamma_w$
$H_1\gamma_w + H_2\gamma_{sat}$
$(H_1 + H_2 - h)\gamma_w$
$H_2\gamma' + h\gamma_w$

نیروی تراوش

در حالت بدون تراوش، تنش مؤثر در عمق z از سطح لایه خاک

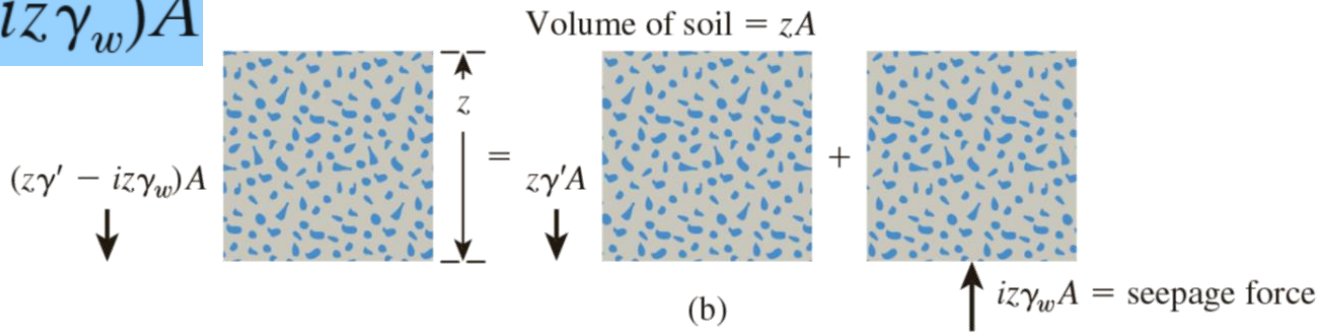
درون مخزن برابر با $z\gamma'$ است. بنابراین نیروی مؤثر روی سطح A عبارت است از:

$$P_1' = z\gamma' A$$

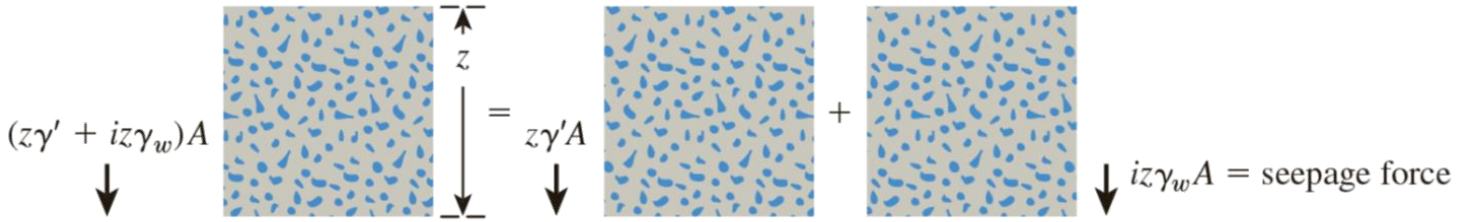


(a)

$$P_2' = (z\gamma' - iz\gamma_w)A$$



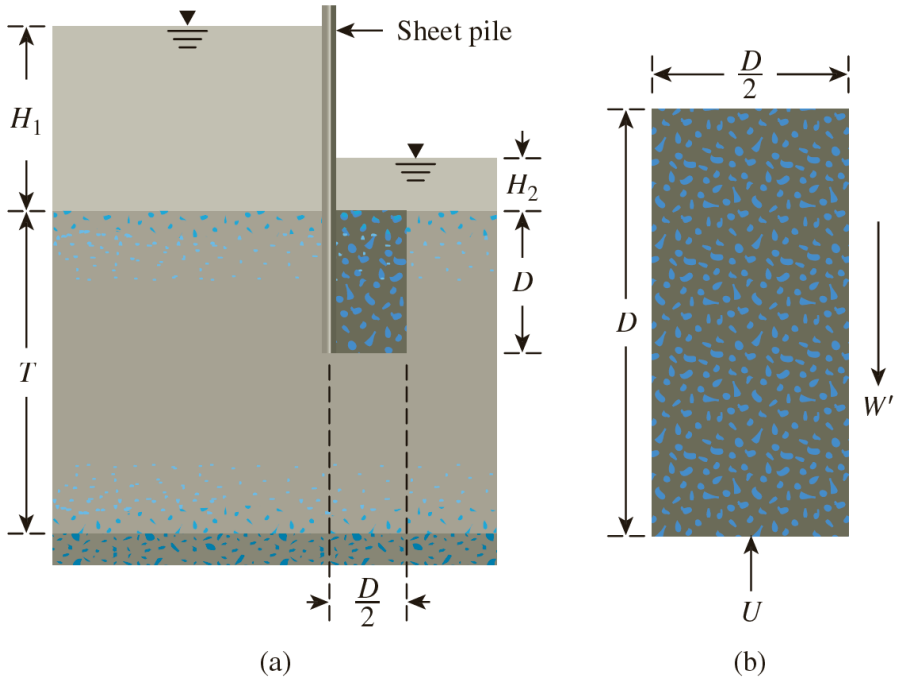
(b)



(c)

برآمدگی خاک در اثر جریان اطراف سپرهای فلزی

از نیروی تراوش به ازای واحد حجم خاک می‌توان برای بررسی احتمال شکست سازه‌های سپر فلزی در مکان‌هایی استفاده کرد که تراوش زیرزمینی ممکن است باعث برآمدگی خاک در سمت پایین دست شود. Terzaghi (۱۹۲۲) پس از انجام چند آزمایش بر روی مدل‌های مختلف نتیجه گرفت که برآمدگی معمولاً در محدودهٔ فاصلهٔ $\frac{D}{2}$ از سپرهای فلزی صورت می‌گیرد (D عمق نفوذ سپرهای فلزی در لایهٔ نفوذپذیر است). بنابراین باید پایداری خاک را در ناحیه‌ای با سطح مقطع D در $\frac{D}{2}$ بررسی کرد



ضریب ایمنی در مقابل برآمدگی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$FS = \frac{W'}{U}$$

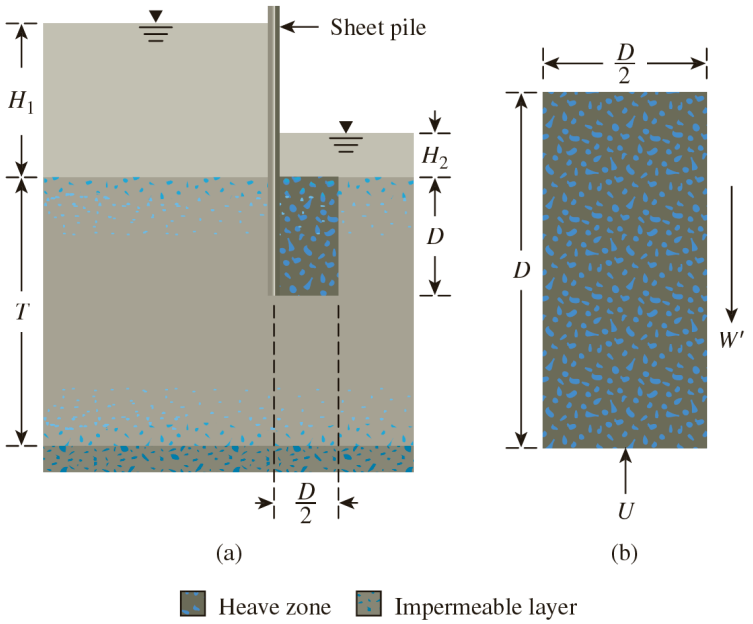
FS = ضریب ایمنی

W' = وزن غوطه‌ور خاک در ناحیهٔ برآمدگی به ازای واحد عرض سپر =

$$D(D/2)(\gamma_{sat} - \gamma_w) = (\tfrac{1}{2})D^2\gamma'$$

U = نیروی زیرفشار ناشی از تراوش بر روی همان حجم خاک.

$$U = (\text{Soil volume}) \times (i_{av}\gamma_w) = \tfrac{1}{2}D^2 i_{av}\gamma_w$$



i_{av} = شیب هیدرولیکی متوسط در پایین قطعه خاک

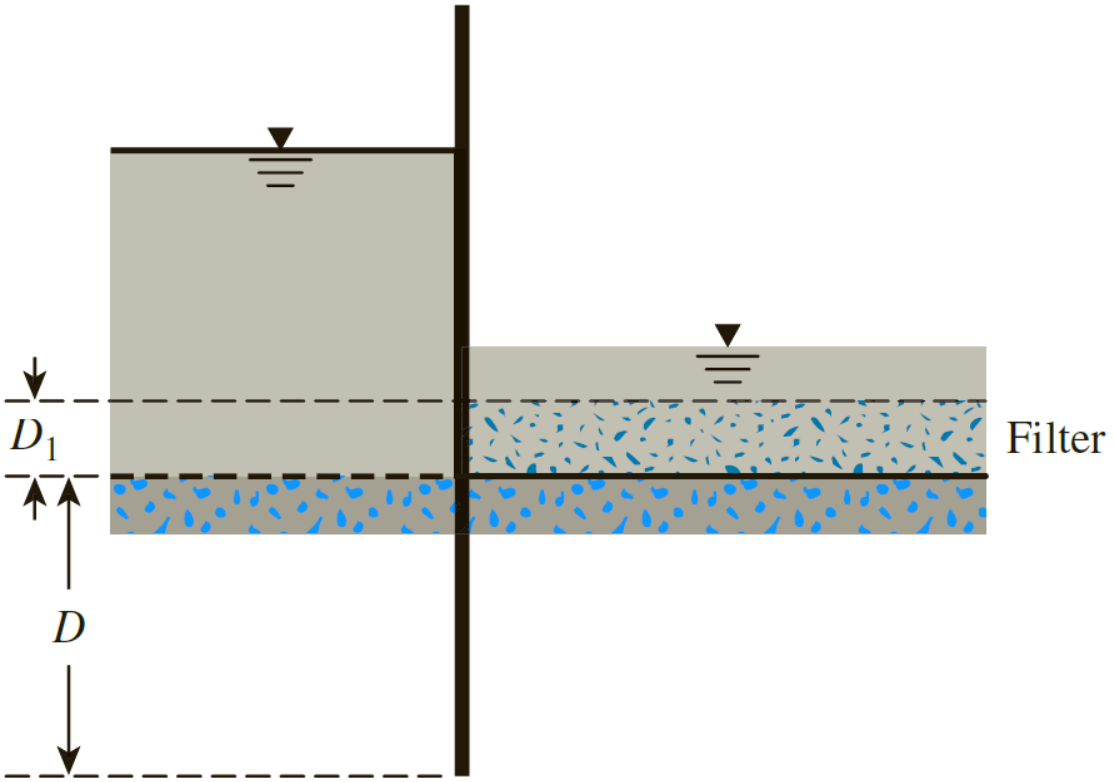
با جایگزین کردن مقادیر W' و U

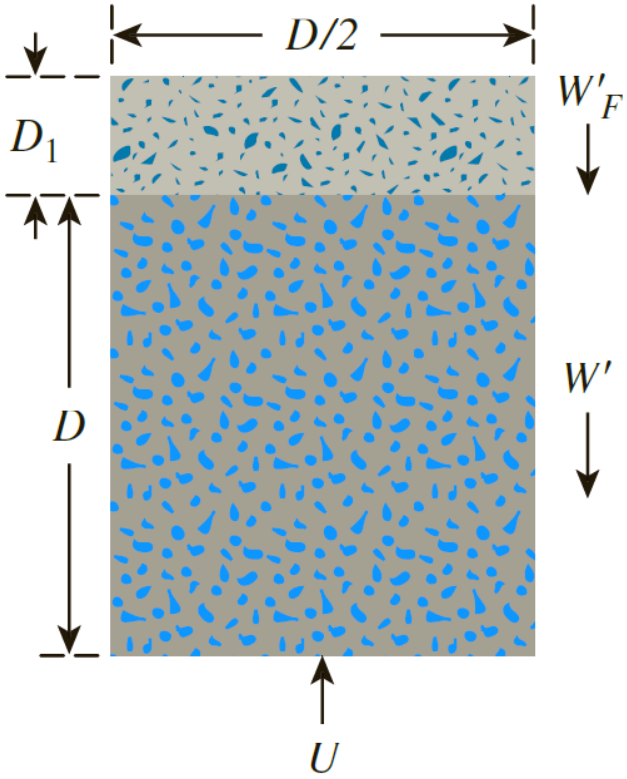
$$FS = \frac{\gamma'}{i_{av}\gamma_w}$$

استفاده از فیلتر یا صافی جهت افزایش ضریب ایمنی در مقابل برآمدگی

در عمل برای ایمنی سازه، وجود حداقل ضریب ایمنی تقریباً ۴ تا ۵ ضرورت دارد. پیشنهاد چنین ضریب ایمنی بالایی در وهلهٔ نخست به دلیل بی‌دقتی‌های ذاتی موجود در تحلیل است. یکی از راه‌های افزایش ضریب ایمنی در مقابل برآمدگی، استفاده از *فیلتر* یا *صافی* در سمت پایین دست سازهٔ سپر فلزی است

فیلتر مصالحی دانه‌ای است که فضاهای باز آن به قدری کوچک است که از حرکت ذرات خاک زیر خود جلوگیری می‌کند و در همان حال تخلخل آن در حدی است که مقاومت کمی در برابر تراوش آب از درون خود ایجاد می‌کند ضخامت مصالح فیلتر D_1 است. در این حالت ضریب ایمنی در مقابل برآمدگی را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد


D_1
D
Filter


$D/2$
D_1
D
W'_F
W'
U

وزن غوطه‌ور خاک و فیلتر در ناحیهٔ برآمدگی به ازای واحد طول سپر فلزی = $W'+W'_F$، که در این جا:

$$W' = (D)\left(\frac{D}{2}\right)(\gamma_{sat} - \gamma_w) = \frac{1}{2}D^2\gamma'$$

$$W'_F = (D_1)\left(\frac{D}{2}\right)(\gamma'_F) = \frac{1}{2}D_1 D\gamma'_F$$

در روابط بالا: γ'_F = وزن مخصوص مؤثر فیلتر یا صافی.

نیروی زیرفشار ناشی از تراوش روی همان حجم از خاک عبارت است از:

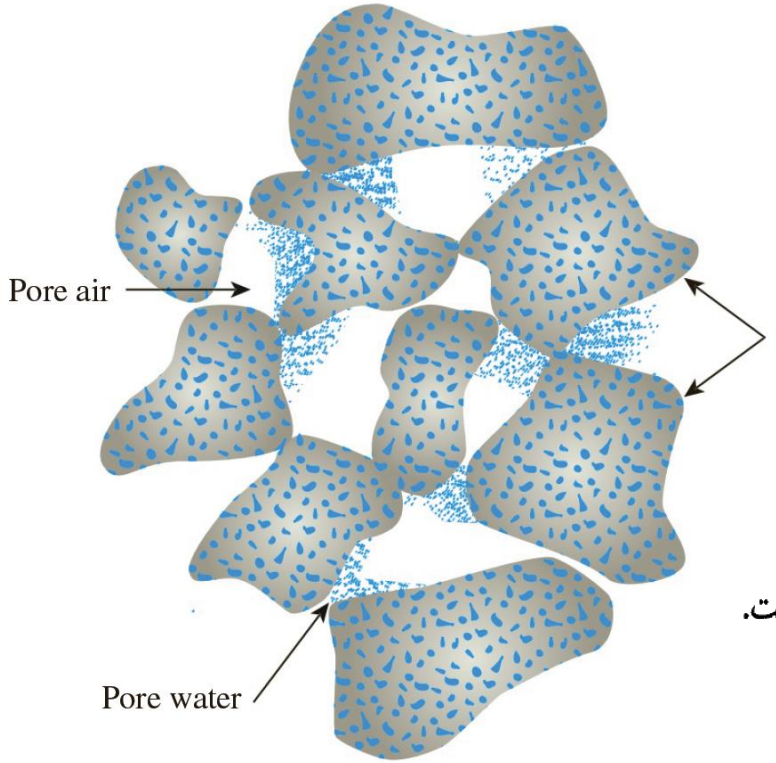
$$U = \frac{1}{2}D^2 i_{av}\gamma_w$$

بدین ترتیب ضریب ایمنی در برابر برآمدگی برابر است با:

$$FS = \frac{W' + W'_F}{U} = \frac{\frac{1}{2}D^2\gamma' + \frac{1}{2}D_1 D\gamma'_F}{\frac{1}{2}D^2 i_{av}\gamma_w} = \frac{\gamma' + \left(\frac{D_1}{D}\right)\gamma'_F}{i_{av}\gamma_w}$$

تنش مؤثر در خاک‌های نیمه اشباع

در خاک‌های نیمه اشباع، آب موجود در فضاهای منفذی حالت پیوسته ندارد و در واقع خاک مجموعه‌ای سه بخشی متشکل از مواد جامد، آب منفذی و هوای منفذی است بنابراین تنش کل در هر نقطه‌ای از خاک، شامل فشارهای بین دانه‌ای، فشار آب منفذی و فشار هوای منفذی است. Bishop و همکاران (۱۹۶۰) با توجه به نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی، معادلهٔ زیر را برای تنش مؤثر در خاک‌های نیمه اشباع ارائه کردند:



$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)$$

σ' = تنش مؤثر

σ = تنش کل

u_a = فشار هوای منفذی

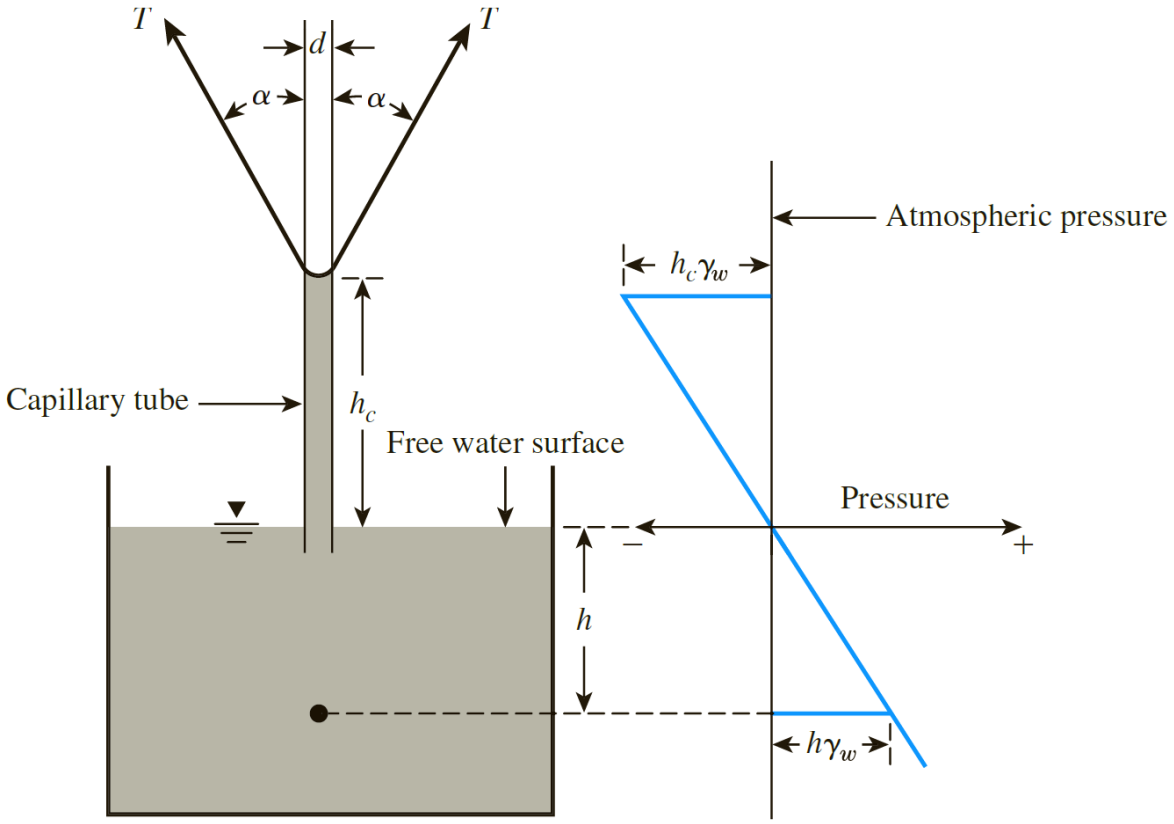
u_w = فشار آب منفذی.

χ نشانگر بخشی از واحد سطح مقطع خاک است که توسط آب اشغال شده است.

برای خاک خشک $\chi = 0$ و برای خاک اشباع $\chi = 1$.

صعود مویینه در خاک‌ها

فضاهای خالی پیوستهٔ موجود در خاک همچون دسته‌ای از لوله‌های مویینه با مقطع متغیر عمل می‌کنند. به دلیل نیروی کشش سطحی، آب تا بالای سطح آب زیرزمینی صعود می‌کند.



ارتفاع صعود آب در لولهٔ مویینه

$$\left(\frac{\pi}{4}d^2\right)h_c\gamma_w = \pi d T\cos\alpha$$

$$h_c = \frac{4T\cos\alpha}{d\gamma_w}$$

T = کشش سطحی (طول/نیرو)

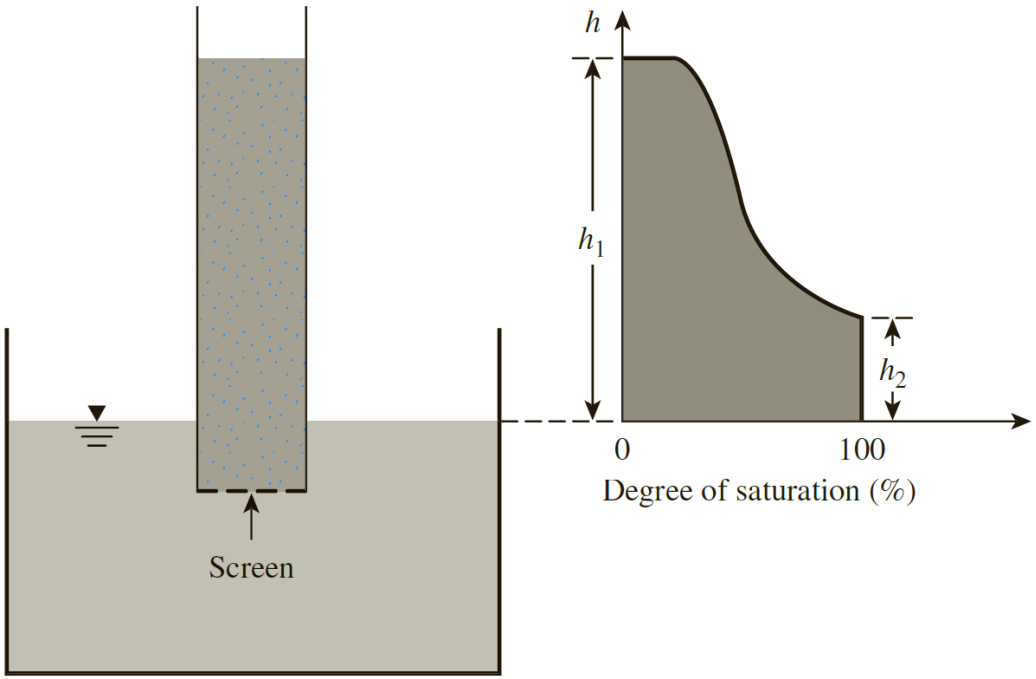
α = زاویهٔ تماس

d = قطر لولهٔ مویینه

γ_w = وزن مخصوص آب.

برای آب خالص و شیشهٔ تمیز، $\alpha = 0$

اگرچه مفهوم صعود مویینه به صورت نشان داده شده برای لولهٔ مویینهٔ ایده‌آل را می‌توان در مورد خاک‌ها به کار برد، اما باید دانست که لوله‌های مویینهٔ ایجاد شده در خاک‌ها به دلیل پیوستگی منافذ، مقطع متغیری دارند. نتایج غیریکنواختی صعود مویینه را زمانی می‌توان مشاهده کرد که ستونی از خاک ماسه‌ای خشک در تماس با آب قرار داده شود پس از گذشت مدت زمان معینی، تغییرات درجهٔ اشباع در ارتفاع ستون خاک در اثر صعود مویینه تقریباً به صورت نشان داده شده در شکل است. تا ارتفاع h_2، درجهٔ اشباع تقریباً ۱۰۰% است و این به دلیل نفوذ آب حتی در بزرگترین منافذ موجود است. فراتر از ارتفاع h_2، آب تنها می‌تواند منافذ کوچکتر را اشغال کند و در نتیجه درجهٔ اشباع کمتر از ۱۰۰% است. حداکثر ارتفاع صعود مویینه به کوچکترین منافذ موجود بستگی دارد.



Hazen (۱۹۳۰) برای تقریب زدن ارتفاع صعود موییِنه، رابطه‌ای را به شکل زیر ارائه داد:

$$h_1\,(\text{mm}) = \frac{C}{eD_{10}}$$

D_{10} = اندازهٔ مؤثر (mm)

e = نسبت تخلخل

C = مقدار ثابت که از ۱۰ تا ۵۰ mm^2 متغیر است.

با کاهش D_{10}، اندازهٔ منافذ موجود در خاک کاهش می‌یابد و این به صعود موییِنهٔ بالاتر منجر می‌گردد.

محدودهٔ تقریبی صعود موییِنه در خاک

	Range of capillary rise	
Soil type	**m**	**ft**
Coarse sand	0.1–0.2	0.3–0.6
Fine sand	0.3–1.2	1–4
Silt	0.75–7.5	2.5–25
Clay	7.5–23	25–75

تنش مؤثر در ناحیهٔ صعود مویینه

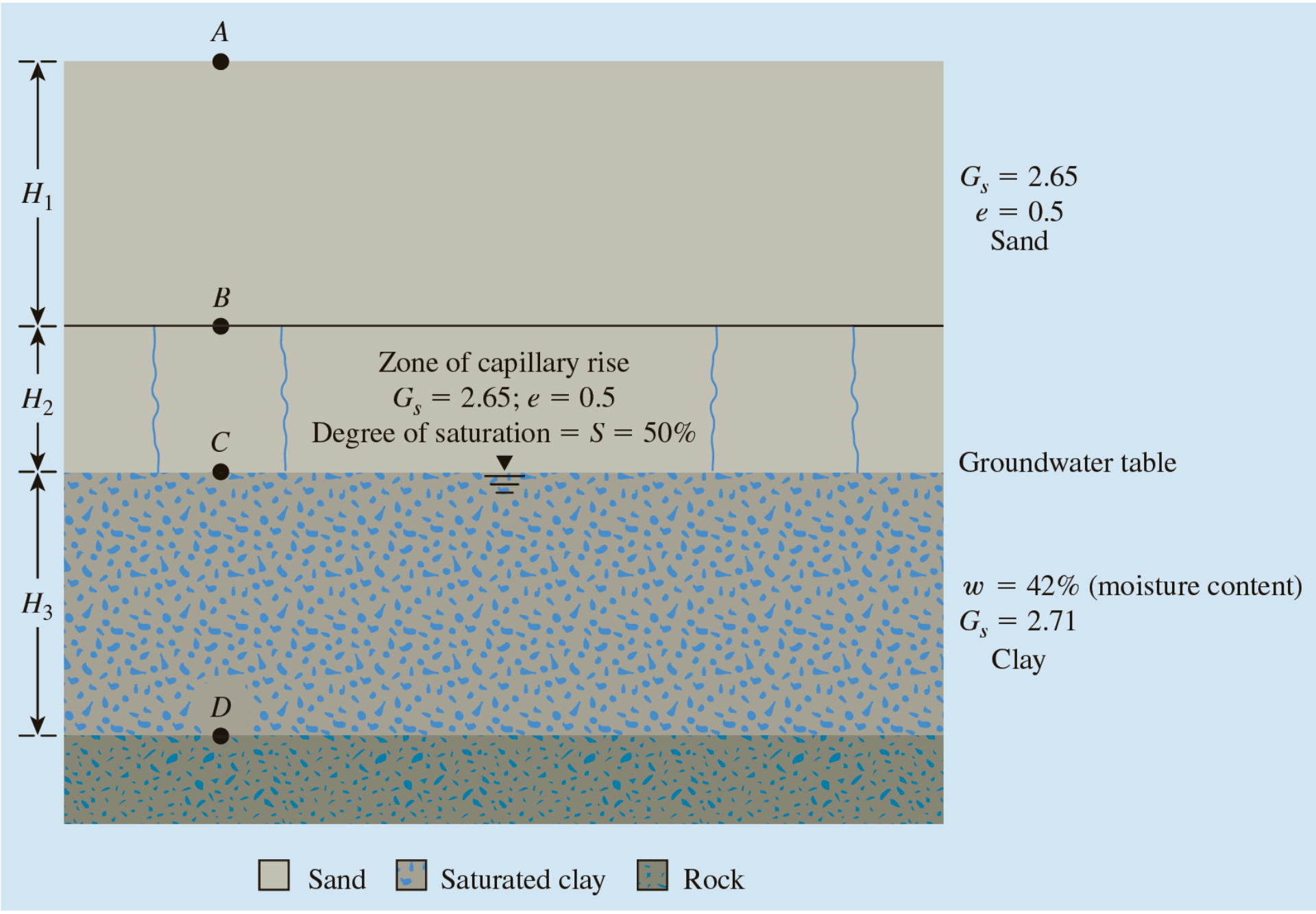
رابطهٔ عمومی میان تنش کل، تنش مؤثر و فشار آب منفذی

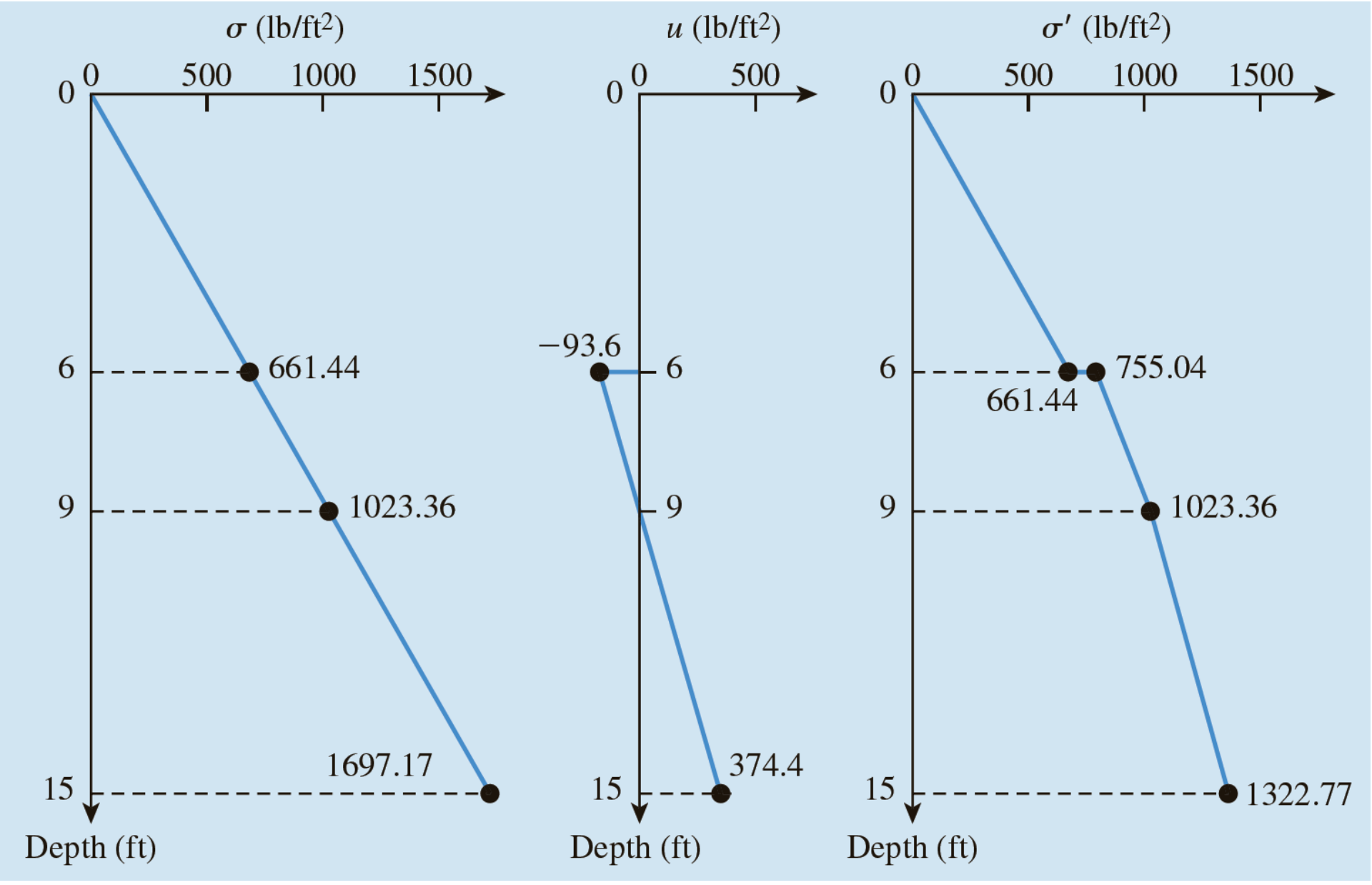
$$\sigma = \sigma' + u$$

فشار آب منفذی u در نقطه‌ای از لایه خاک کاملاً اشباع در اثر صعود مویینه برابر است با $-\gamma_w h$ (h = ارتفاع نقطهٔ مورد نظر از سطح آب زیرزمینی)، البته با فرض آن که فشار جو مبنا قرار داده شود. در صورت نیمه اشباع بودن خاک در اثر پدیدهٔ مویینگی، آن را می‌توان به صورت زیر تقریب زد:

$$u = -\left(\frac{S}{100}\right)\gamma_w h$$

S = درجهٔ اشباع بر حسب درصد.


A
B
C
D
H_1
H_2
H_3
Zone of capillary rise
$G_s = 2.65$; $e = 0.5$
Degree of saturation = $S = 50\%$
$G_s = 2.65$
$e = 0.5$
Sand
Groundwater table
$w = 42\%$ (moisture content)
$G_s = 2.71$
Clay
Sand
Saturated clay
Rock


σ (lb/ft2)
0
500
1000
1500
0
6
9
15
661.44
1023.36
1697.17
Depth (ft)
u (lb/ft2)
0
500
−93.6
6
9
15
374.4
Depth (ft)
σ′ (lb/ft2)
0
500
1000
1500
0
6
9
15
661.44
755.04
1023.36
1322.77
Depth (ft)