تحكيم خاكها(Consolidation)

تحكيم همان كاهش حجم يك خاك اشباع با نفوذپذيري كم در اثر زهكشي مي‌باشد معمولا" عمل تحكيم تا محو فشار آب منفذي اضافي كه در اثر افزايش تنش كل بوجود آمده ادامه مي‌يابد

به عنوان مثال اگر بنائي را بر روي يك لايه رس اشباع بسازيم معمولا" مواجه با نشست خواهيم بود (تحكيم) و در صورتي كه در ابتداي بناي همان ساختمان در اين رس خاكبرداري كنيم مواجه با تورم (عكس عمل تحكيم) كف گود خواهيم بود

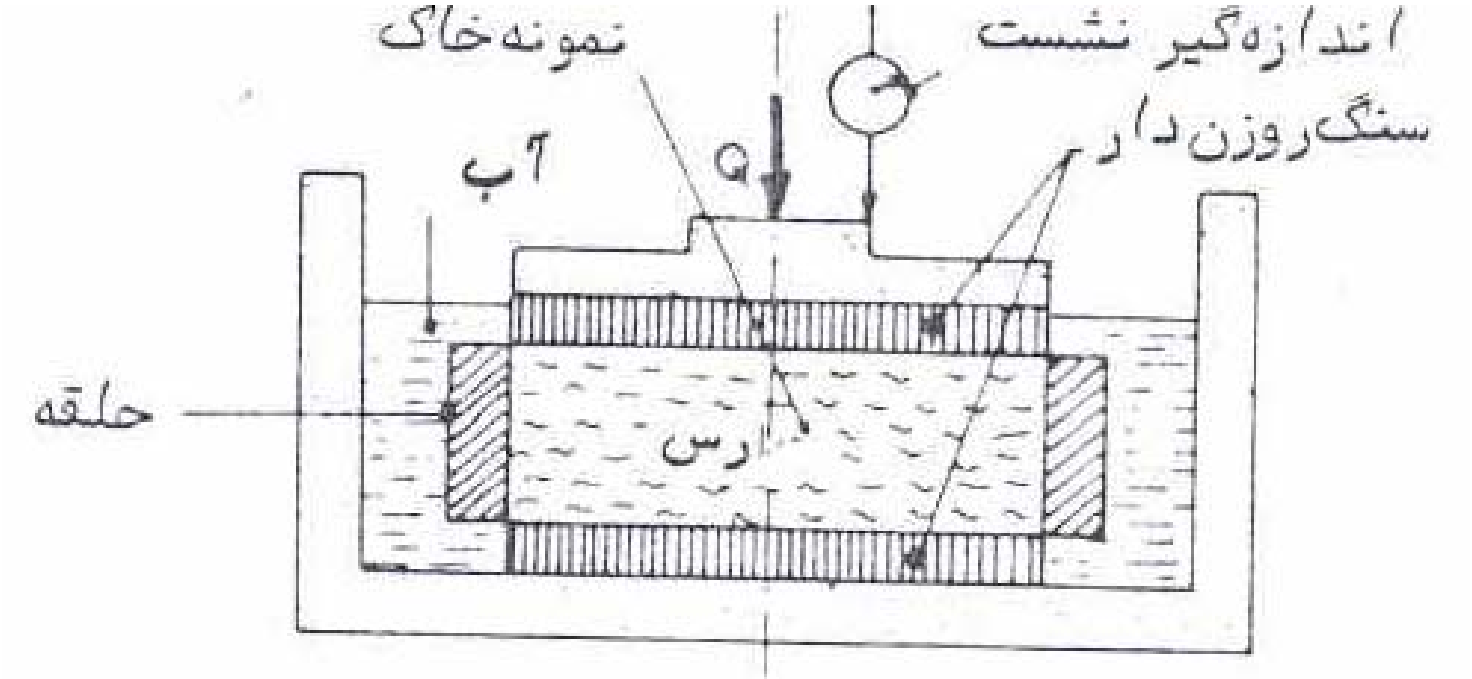
معمولا" نشست بر دو نوع است:

۱ -نشست آنی: *که در اثر تغییر شکل جانبي خاك در شرایط زهکشي نشده پیش مي‌آید و معمولا" یا قابل صرف نظر کردن است و یا با استفده از نظریه ارتجاعي قابل محاسبه است*

۲ - نشست ناشی از تحکیم : *در اینجا ما به بررسي این نوع نشست، محاسبه مقدار و سرعت آن مي‌پردازیم. به همین منظور ابتدائا" به شرح آزمایش تحکیم مي‌پردازیم*

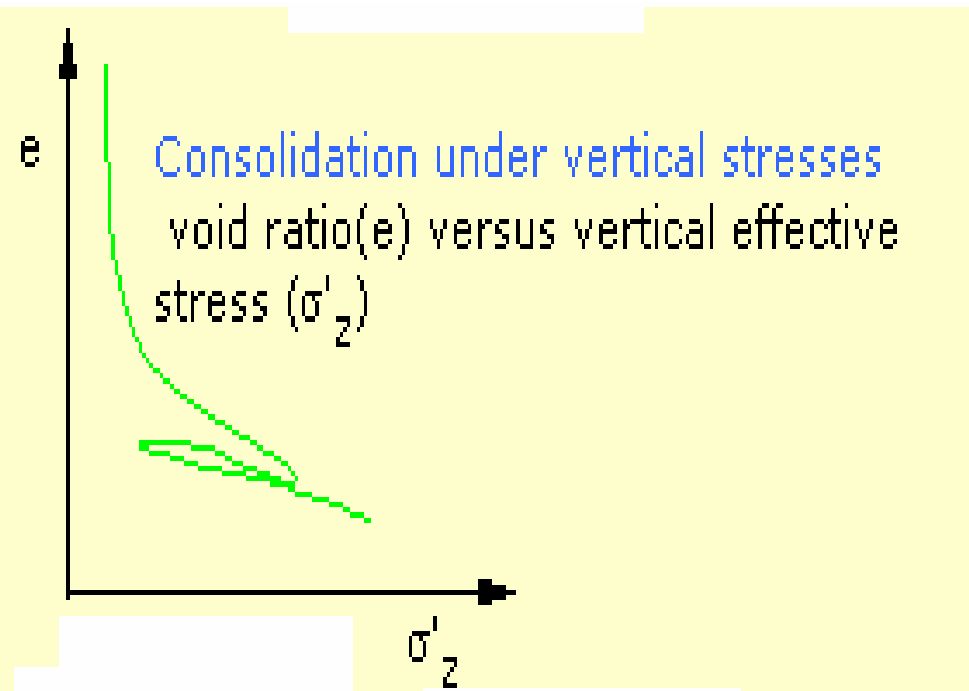
آزمایش ادئومتر یا تحکیم

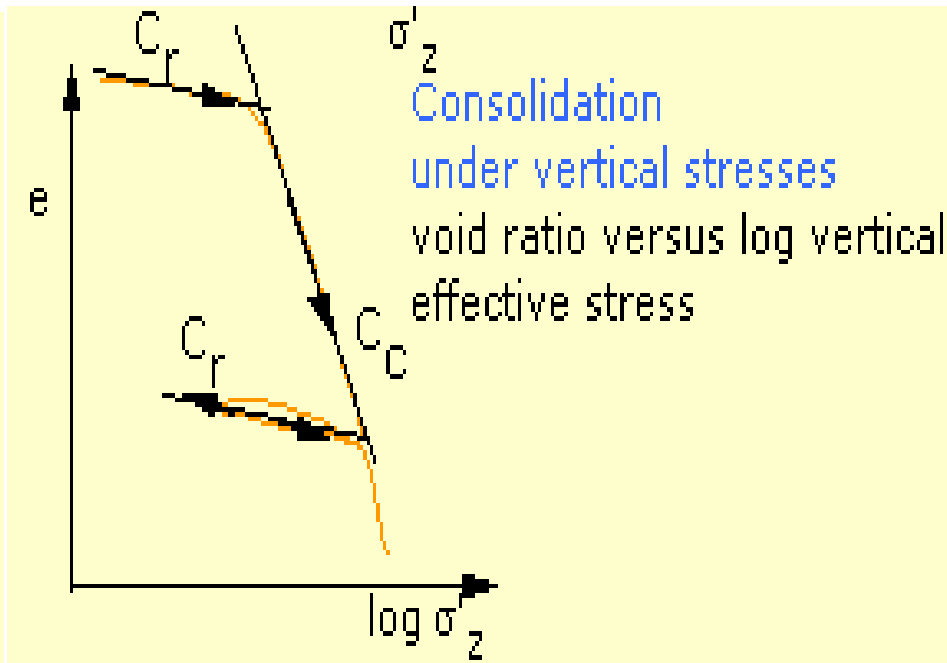
در این آزمایش نمونه استوانه‌أي که در بین دو سنگ متخلخل قرار گرفته است و در داخل يك استوانه فلزي تغییر شکل‌ناپذیر قرار دارد و به طور قائم بر آن بار وارد مي‌شود. نحوه انجام آزمایش بدین‌گونه است که فشارهاي مختلفي بر نمونه وارد مي‌شود و تحت هر فشار وارده نمونه از ٢٤ تا ٤٨ ساعت تحت فشار باقي مي‌ماند و ارتفاع جدید نمونه در پایان این مدت قرائت مي‌شود



منحني تغييرات ارتفاع نمونه و يا انديس خلاء e بر حسب تنش موثر (تنش وارده بر نمونه در انتهاي مدت بارگذاري) ترسيم مي گردد.

معمولا" تغييرات تنش مي تواند در مقياس طبيعي و يا لگاريتمي ترسيم گردد ميزان انبساط نمونه نيز پس از اتمام بارگذاري يا باربرداري (در كاهش فشارهاي پي درپي) مشخص گرديده و در منحني فوق ترسيم مي گردد





نحوه انجام محاسبات به شرح زیر است:

اندیس خلاء در پایان آزمایش : e_1

ارتفاع نمونه در شروع آزمایش : $H_\circ$

میزان تغییر ارتفاع در حین آزمایش :

$$\Delta H = H_\circ - H_1$$

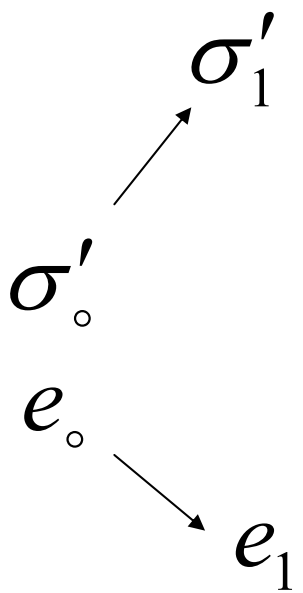
اندیس خلاء در شروع آزمایش :

$$e_\circ = e_1 + \Delta e$$

$$\frac{\Delta \mathrm{H}}{\mathrm{H}_\circ} = \frac{\Delta e}{1+e_\circ} \Rightarrow \frac{\Delta e}{\Delta \mathrm{H}} = \frac{1+e_\circ}{\mathrm{H}_\circ}$$

تراكم‌پذيري خاك را با يكي از ضرايب زير تعيين مي‌نمائيم:

۱ ـ ضريب تغيير حجم (m_v): بر حسب ميزان تغيير حجم بازاي افزايش تنش موثر واحد با ديمانسيون $(kPa)^{-1}$ هر گاه براي افزايش تنش موثر از σ'_0 به σ'_1 و انديس خلاء از e_0 به e_1 كاهش يابد



$$m_v = \frac{1}{1+e_0}\left(\frac{e_\circ - e_1}{\sigma'_1 - \sigma'_0}\right) = \frac{1}{H_0}\left(\frac{H_0 - H_1}{\sigma'_1 - \sigma'_0}\right)$$

۲ - ضریب تراکم(c_c) : همان شیب بخش خطي منحني تراکم در صفحه $e - Log\sigma'$ مي‌باشد که بدون بعد است و عبارت است از:

$$C_c = \frac{e_\circ - e_1}{Log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_\circ}} = -\frac{\Delta e}{\Delta Log\ \sigma'}$$

که مي توان این رابطه رابه صورت زیر نوشت :

$$e_1 = e_\circ - C_c \log\frac{\sigma'_1}{\sigma'_\circ} = e_\circ - C_c \log\left(1 + \frac{\Delta\sigma'}{\sigma'_\circ}\right)$$

$$\Delta\sigma' = E_{oed}\left(-\varepsilon_a\right)$$

$$\Delta\sigma' = E_{oed}\left(-\frac{\Delta h}{h}\right)$$

$$E_{oed} = E'$$

ضریب یانگ ادئومتریك

$$E' = \frac{1 + e_\circ}{C_c}\,\frac{\Delta\sigma'}{\log\left(1 + \frac{\Delta\sigma'}{\sigma'_\circ}\right)}$$

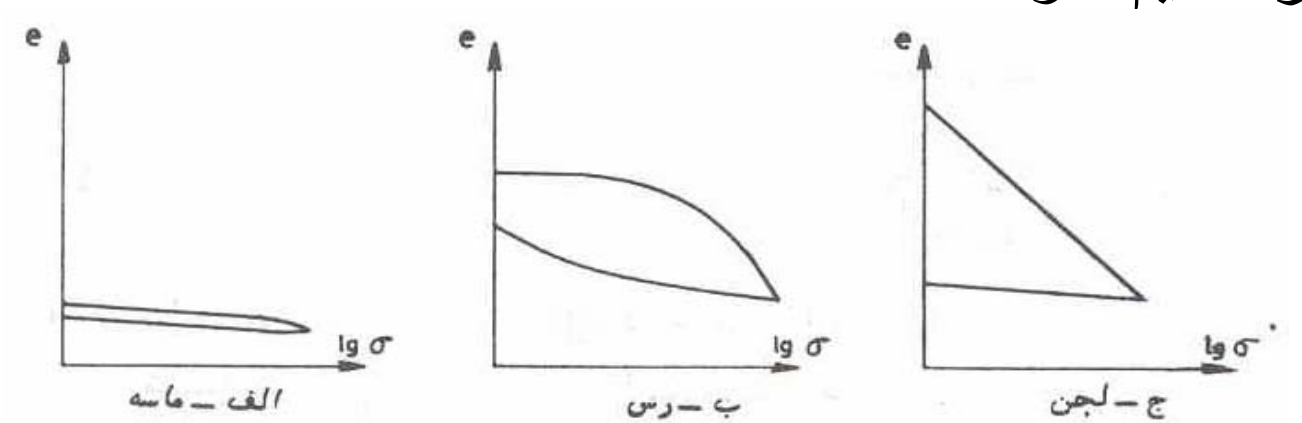
اگر $\Delta\sigma'$ ویا به عبارت دیگر تغییر فشار موثر در مقابل σ'_0 کوچك باشد خواهیم داشت

$$\log\left(1+\frac{\Delta\sigma'}{\sigma'_\circ}\right)=\frac{1}{2/3}\frac{\Delta\sigma'}{\sigma'_\circ}$$

بنابراین :

$$E' = 2/3\sigma'_\circ \frac{1+e_\circ}{C_c}$$

معمولا" منحني‌هاي ترسيم شده براي خاكهاي متفاوت را مي توان به سه دسته زير تقسيم نمود



براي داشتن يك شناخت نسبت به مقادير ضريب يانگ ادوئومتريك براي خاكهاي مختلف بد نيست مقادير زير را مشاهده نمائيم:

براي ماسه	10	تا	300	MPa
براي رس سخت	1.5	تا	10	MPa
براي ري سست	0.1	تا	1	MPa
فولاد			2×10^5	MPa
بتن			2×10^4	MPa

با استفاده از روشهاي ارتباطي (Correlation) و يا غير مستقيم (بدون انجام آزمايش تحكيم) مي توان به محاسبه ضريب تراكم پرداخت

فرمول اسکمپتون

$$C_c' = 0.007(w_l - 10)$$

$$C_c = 0.009(w_l - 10)$$

C'_c ضریب تراکم خاکهای دست خورده می باشد (remold) و

C_c ضریب تراکم خاکهای دست نخورده است (Ondisturb)

حدود ضرايب تراكم براي خاكهاي مختلف به شرح زير است :

براي ماسه : $0.01 \prec C_c \prec 0.1$

رس سخت (كائولينيت): $0.10 \prec C_c \prec 0.25$

رس متوسط (ايليت): $0.25 \prec C_c \prec 0.80$

رس سست (مونت موريلونايت):

$0.80 \prec C_c \prec 2.5$

رس پیش تحکیم یافته

معمولا"در طبیعت دو نوع رس وجود دارد:

۱ - رس‌هاي تحكيم عادي يافته : اين نوع رس‌ها، رس‌هائي مي باشند که در وضعیت عادی خود همان تنشی را متحمل شوند که محاسبه مي گردد.

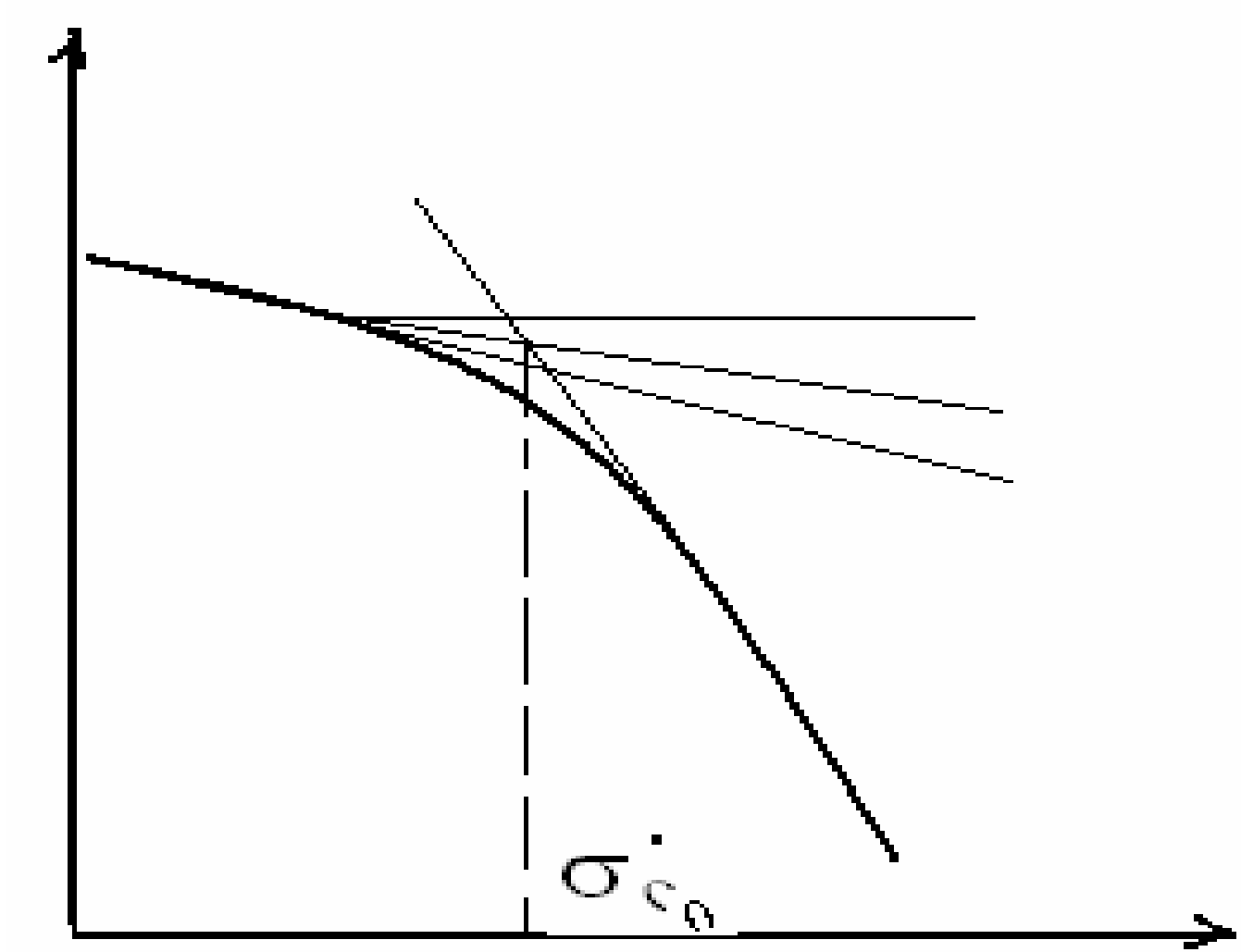
۲ -رس‌هاي پيش تحكيم يافته: رس‌هايي مي‌باشند كه فشاري را اكنون متحمل مي‌شوند كه كمتر از فشار قبلي مي‌باشد كه متحمل شده‌اند.

به عبارت ديگر نمونه رسی که از يك عمق مورد محاسبه خاك خارج شده است را در نظر مي‌گيريم در صورتي که پس از محاسبه با توجه به عمق خاك و سپس مقايسه آن با فشار پيش تحکيمي که از آزمايش ادئومتريك حاصل مي‌شود مي‌توانيم به وضعيت رس پي ببريم

نحوه محاسبه فشار پيش تحكيمي :

اين روش توسط كاساگراند ارائه شده و اكنون از آن جهت محاسبه فشار پيش تحكيمي رس‌ها استفاده مي شود، در اين روش ابتدا منحني $e - \log \sigma'$. ترسيم مي گردد سپس بخش خطي منحني بطور كامل ترسيم مي گردد.

آنگاه از نقطه بيشترين انحناء منحني (D) خطي مماس بر منحني و خطي افقي ترسيم مي گردد نقطه تقاطع خط اولي كه ترسيم نموديم (خط امتداد مستقيم منحني) و نيمساز زاويه بين دو خط دوم ترسيمي (خط مماس و خط افقي) ميزان فشار پيش تحكيمي را بر روي محور افقي به طور تقريبي به ما مي دهد. از تقسيم نمودن اين فشار بر فشاري كه خاك كاملا" تحت‌تاثير آن قراردارد و به راحتي با توجه به عمق نمونه قابل محاسبه مي باشد نسبت تحكيم يافتگي خاك مشخص مي گردد


$\dot{\varepsilon}_0$

Over Consolidation Ratio (OCR)

$$OCR = \frac{\sigma'_{c\circ}}{\sigma'_{c}} = \frac{\text{فشار پیش تحکیمی}}{\text{فشاری که فعلاً خاک تحت تاثیر آن قرار دارد}}$$

$OCR = 1$ ***خاك تحكيم عادي يافته***

$OCR \succ 1$ ***خاك پيش تحكيم يافته***

محاسبه نشست

در صورتیکه براي يك لايه رس به ضخامت H در اثر افزايش تنش از σ'_0 به σ'_1 واندیس خلاء از e_0 به e_1تنزل یابد کاهش حجم رس از رابطه زیر محاسبه خواهد گردید:

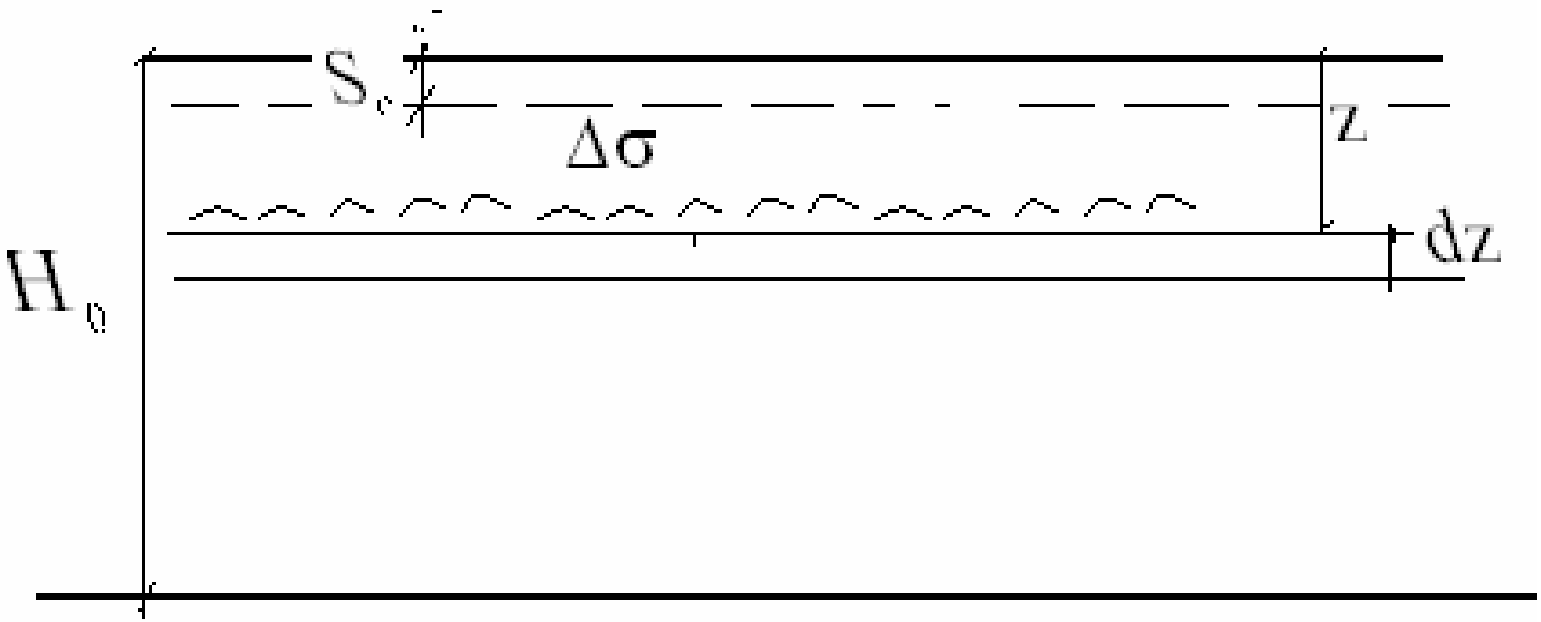
$$\frac{\Delta v}{v_\circ} = \frac{e_\circ - e_1}{1 + e_\circ}$$

چون معمولا" تغییر شکل جانبي نزيدك به صفر مي باشد لذا کاهش حجم بر حجم کل معادل کاهش ضخامت برضخامت اولیه لایه خواهد بود

$$\frac{\Delta v}{v_\circ} = \frac{\Delta H}{H_\otimes}$$

در صورتیکه نشست لایه‌أي به ضخامت dz را در نظر بگیریم:

$$ds_c = \frac{e_\circ - e_1}{1+e_\circ}.dz$$



$$ds_c = \frac{e_\circ - e_1}{\sigma_1^{'} - \sigma_0^{'}} \frac{\sigma_1^{'} - \sigma_0^{'}}{1 + e_0} .dz$$

$$ds_c = m_v .\Delta\sigma^{'} .dz$$

اگر نشست کل S_c باشد براي ضخامت H لايه خواهيم داشت

$$S_c = \int_\circ^H m_v .\Delta\sigma' .dz \Rightarrow S_c = \frac{e_\circ - e_1}{1 + e_\circ} .H$$

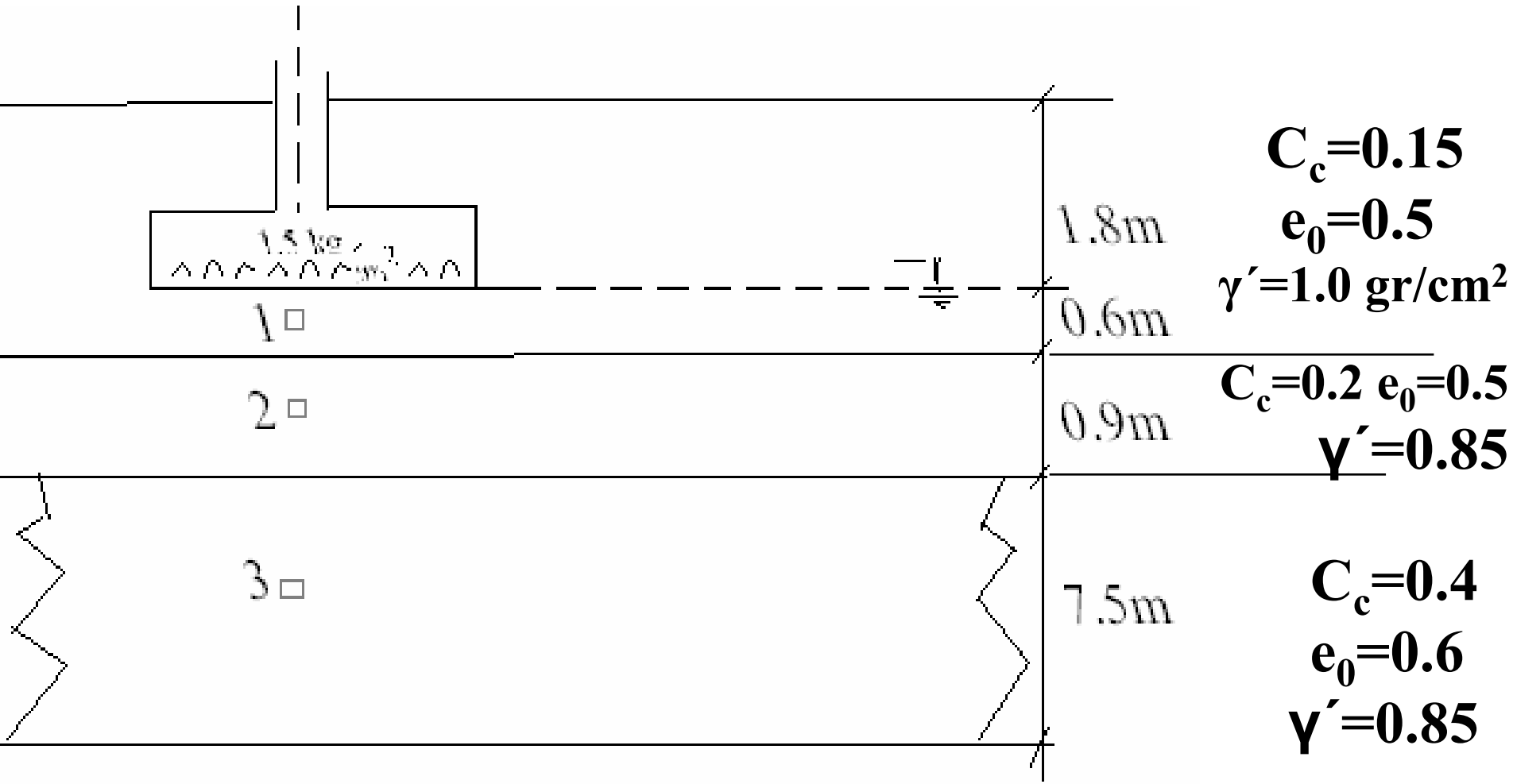
و يا براي يك رس تحكيم عادي يافته:

$$e_\circ - e_1 = \Delta e = C_c \log\left(\sigma_1' / \sigma_\circ'\right)$$

$$S_c = \frac{C_c \log\left(\sigma'_1 / \sigma'_\circ\right)}{1 + e_\circ} .H$$

معمولا" وقتي كه ضخامت لايه زياد مي باشد لايه را به لايه هاي كوچكتر تقسيم و در مركز هر لايه نشست محاسبه مي گردد سپس مجموع اين نشست‌ها به عنوان نشست كل منظور مي گردد

مثال: در صورتیکه شرایط لایه‌هاي خاك در زیر فونداسیون شکل زیر به صورتي باشد که در شکل مشخص گردیده است و ابعاد فونداسیون 4×4 متر باشد و فشار وارده بر کف فونداسیون $1.5\ kg/cm^2$ میزان نشست را محاسبه نمائید:



فشار در مرکز لایه اول زیر فونداسیون:

$$p_{\circ} = 180\ cm \times 2\ \frac{gr}{cm^3} + 30 \times 1\ \frac{gr}{cm^3} = 0.39\ \frac{kg}{cm^2}$$

فشار در مرکز لایه دوم زیرفونداسیون:

$$p'_{\circ} = 180 \times 2 + 30 \times 1 + 45cm \times 0.85 = 0.458\ \frac{kg}{cm^2}$$

فشار در مرکز لایه سوم زیر فونداسیون:

$$p''_0 = 180 \times 2 + 30 \times 1 + 45 \times 0.85 + 0.45 \times 0.85 = 0.815\ {kg}/{cm^2}$$

$$\Delta P = 4 \times 6 \times I_r = 4 \times 1.5 \times 0.25 = 1.5 \frac{kg}{cm^2}$$

$$m = n = \frac{2}{0.3} = 6.7$$

$$\Delta P' = 4 \times 1.5 \times 0.23 = 1.38 \frac{kg}{cm^2}$$

$$m = n = \frac{2}{0.6 + \frac{0.9}{2}} = 1.9$$

$$\Delta P'' = 4 \times 1.5 \times 0.06 = 0.36 \frac{kg}{cm^2}$$

$$m = n = \frac{2}{0.6 + 0.9 + \frac{7.5}{2}} = 3.8$$

$$\begin{cases} S_1 = 0.15\left[\log\dfrac{0.39+1.5}{0.39}\right]\times\dfrac{60}{1.5} = 4.11cm \\ S_2 = 0.2\left[\log\dfrac{0.458+1.38}{0.458}\right]\times\dfrac{90}{1.5} = 7.24cm \\ S_3 = 0.4\left[\log\dfrac{0.815+0.36}{0.815}\right]\times\dfrac{750}{1.6} = 29.8cm \end{cases}$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \Rightarrow$$

$$S = 4.11 + 7.24 + 29.8 = 41.15cm$$

نظريه ترازقي

ترازقي با فرض اينكه خاك همگن و اشباع است و بخش جامد و مايع آن تراكم ناپذير و اينكه تراكم خاك و جريان آب يك بعدي است (عمودي است) تغيير شكلها مقادير كوچكي دارند و قانون‌دارسی به جريان آب حاكم است و مقادير نفوذپذيري و ضريب تغيير حجم در ضمن تحكيم ثابت مي‌مانند.

به محاسبه فرمول زيرموفق مي شود كه در آن C_v ضريب تحكيم نام دارد و واحد آن متر مربع در سال است وm_v وk مقادير ثابتي دارند

$$C_v = \frac{K}{m_v . \gamma_w}$$

درجه تحکیم :

براي يك جزء خاك در عمق z درجه تحکیم به صورت زیر تعریف مي شود:

$$U_z = \frac{e_\circ - e}{e_\circ - e_1}$$

u_z = درجه تحکیم در يك زمان معین در عمق z (0<u_z<1) است.

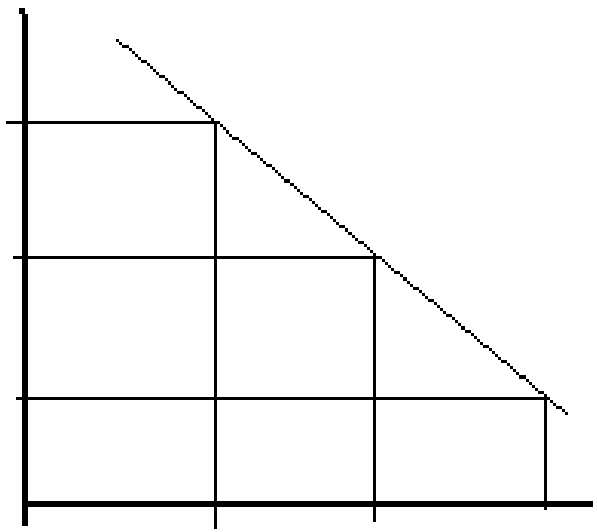
e_0 = انديس خلاء ابتدائي خاك (پیش از شروع تحکیم)

e_1 = انديس خلاءپس از تحکیم

e = انديس خلاء در زمان مورد نظر

در صورتي كه منحني $e-\sigma'$ خطي فرض گردد رابطه قبلی بر حسب تنش به شرح زير است:

$$u_z = \frac{\sigma' - \sigma'_\circ}{\sigma'_1 - \sigma'_\circ}$$



اگر u_0 فشار آب منفذي قبل از افزايش تنش كلي و u_i ميزان افزايش u_0 بلافاصله پس از بارگذاري و u مقدار فشار آب منفذي در يك زمان معين باشد داريم :

$$\sigma'_1 = \sigma'_\circ + u_i = \sigma' + u$$

$$\sigma_1' = \sigma_\circ' + u_i = \sigma' + u$$

بنابراین :

$$u_z = \frac{\sigma_1' - u - \left(\sigma_1' - u_i\right)}{\sigma_\circ' + u_i - \sigma_\circ'} = \frac{u_i - u}{u_i} = 1 - \frac{u}{u_i}$$

رابطه تحکیم :

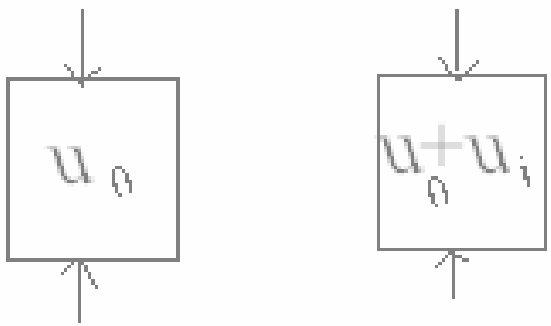
معمولا" فرض مي گردد که تنش اضافي کل به صورت آني وارد شده و لذا کلا" توسط فشار منفذي متحمل مي گردد:

به عبارت ديگر $u_i=\Delta\sigma_1$

مي باشد در اين حالت

در صورتي که فشار آب منفذي اوليه $u_0=0$ فرض

گردد خواهيم داشت :



در لحظه t=0 براي $0 \prec z \prec 2d$ $\longleftarrow$ $u = u_i$

در صورتي كه سطوح فوقاني و تحتاني رس زهكشي فرض شوند در اين صورت سطوح فشار منفذي صفر مي‌باشد :

$$u = 0 \quad \longleftarrow \quad z = 0 \quad و \quad z = 2d$$

فشار آب منفذي در عمق z در زمان t برابر است با :

$$u = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2u_i}{M}\left(\sin\frac{Mz}{d}\right)\exp\left(-m^2 T_v\right)$$

که در آن d طول طولانـي‌ترين مسير زهكشي (خروج آب) مي باشد

u_i : مقدار فشا ر منفذي که تابعي از z بوده و در تمام نقاط لايه رس

ثابت است $M = \frac{1}{2}\pi(2m+1)$ مي‌باشد

T_v ضريب زمان نام دارد و بی بعد است $T_v = \frac{c_v t}{d^2}$

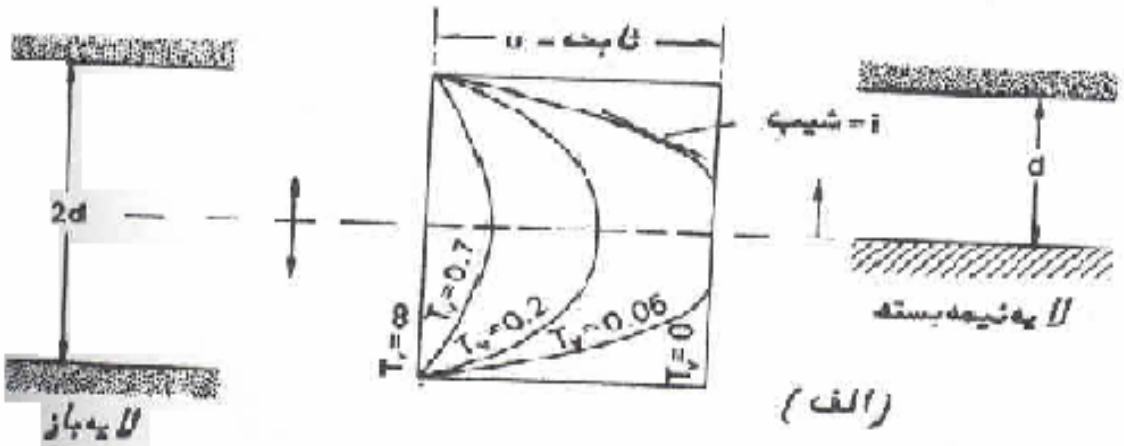
در صورتي که رابطه فوق را در رابطه $u_z = 1 - \frac{u}{u_i}$ جايگزين كنيم

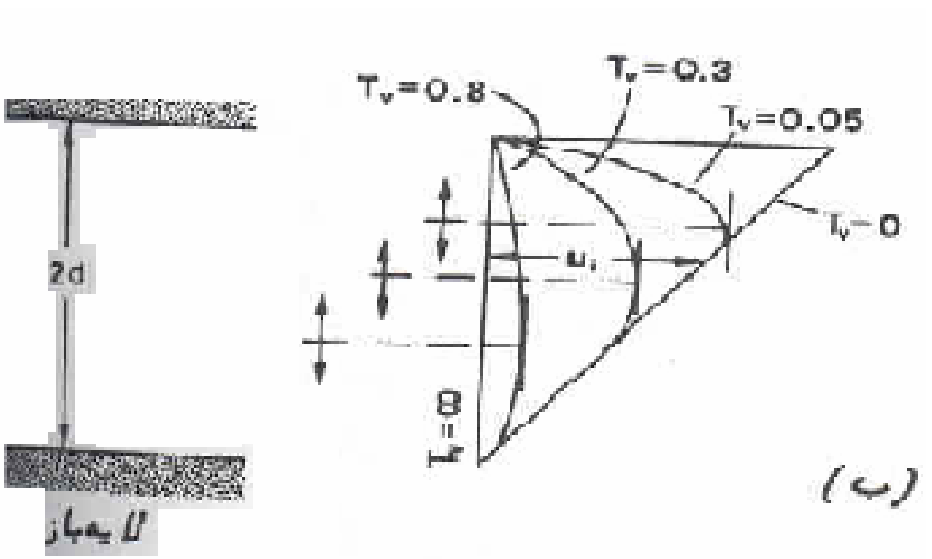
کنیم درجه تحکیم در عمق z و در لحظه t محاسبه می‌گردد:

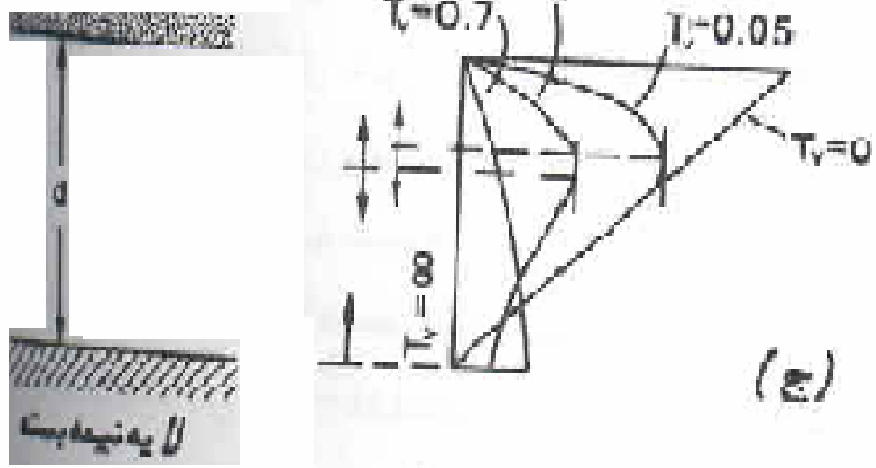
$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{m}\left(\sin\frac{Mz}{d}\right)\exp\left(-M^2 T_v\right)$$

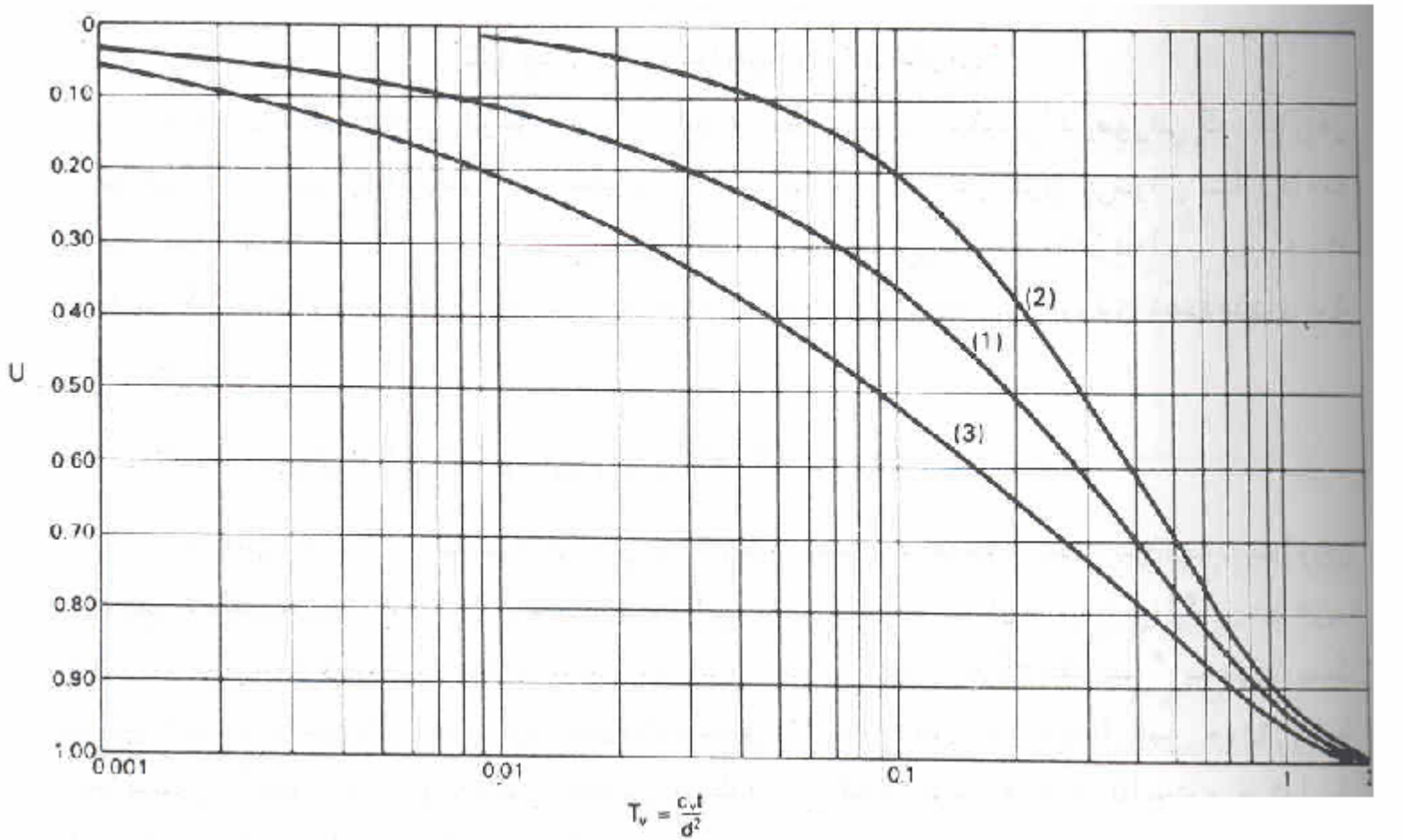
منحنی‌هائی که تغییرات u را بر حسب z برای مقادیر مختلف t نشان می دهند نحوه پیشرفت تحکیم را نشان می دهد

لايه‌أي كه هر دو سطح فوقاني و تحتاني آن زهكشي است به لايه باز و لايه أي كه تنها يك سطح زهكشي دارد لايه نيم بسته مي باشد.








0
0.10
0.20
0.30
0.40
0.50
0.60
0.70
0.80
0.90
1.00
U
0.001
0.01
0.1
1
(1)
(2)
(3)
$T_v = \frac{c_v t}{d^2}$

مقدار متوسط درجه تحکیم در لحظه t برای یک مقدار متوسط u_i برابر است با (در صورتی که U_i در طول لایه مقدار ثابتی باشد) :

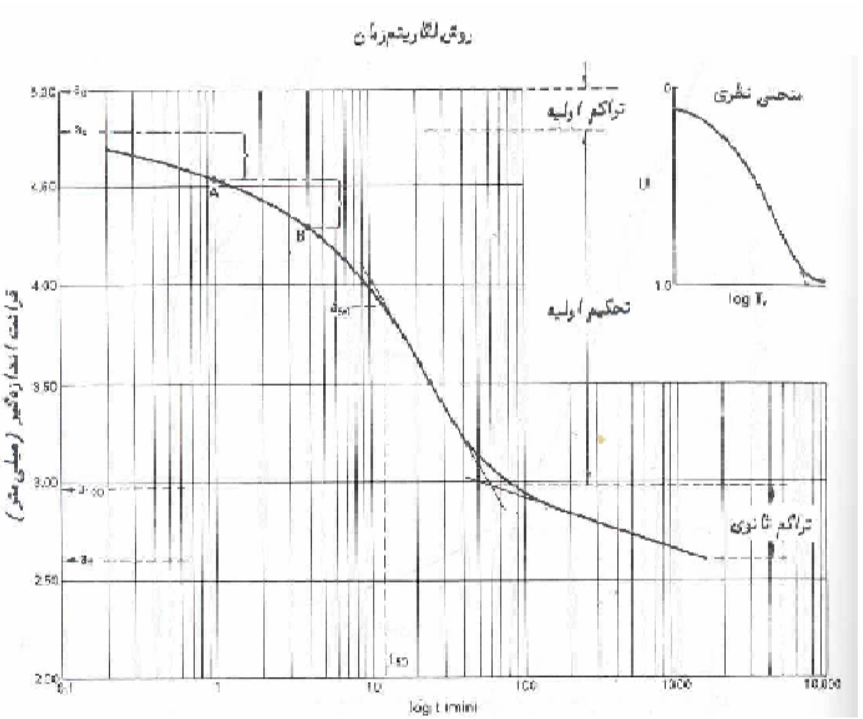
$$U = 1 - \frac{\frac{1}{2d}\int_{\circ}^{2d} u dz}{u_i}$$

(در صورتی که u_i در طول لایه مقدار ثابتی نباشد)

$$U = 1 - \frac{\frac{1}{2d}\int_{\circ}^{2d} u dz}{\int_{\circ}^{2d} u_i dz}$$

تعیین ضریب تحکیم خاک (C_v) از طریق آزمایش تحکیم :

دو روش معمولا" براي تعيين C_v خاك از طريق آزمايش تحكيم وجود دارد روش اول كه به روش لگاريتم زمان مشهور است و توسط كاساگراند شده عبارت است از:



روش اول:ترسیم منحنی تغییر شکل قایم نمونه بر حسب لگاریتم زمان بر حسب دقیقه

این منحنی معمولاٌ دارای سه قسمت است بخش اولیه که معمولاٌ شبیه یک سهمی است؛ سپس یک بخش خطی و بخش افقی نهایی

براي تعيين نقطه مربوط به $U=0$ با فرض اينكه بخش اول منحني سهمي است و با تعيين دو نقطه روي منحني كه نسبت زمانهاي آن يك به 4 باشد (ويا يك به سه) و تعيين فاصله قائم بين آن دو نقطه (نقاط **A** و **B** بر روي منحني) و تعيين نقطه a_0 كه با فاصله قائم فوق, بالاي نقطه **A** قرار دارد.

نقطهa_{100} مربوط به $u=\%100$ از محل تلاقي امتداد هر قسمت خطي منحني بدست مي آيد

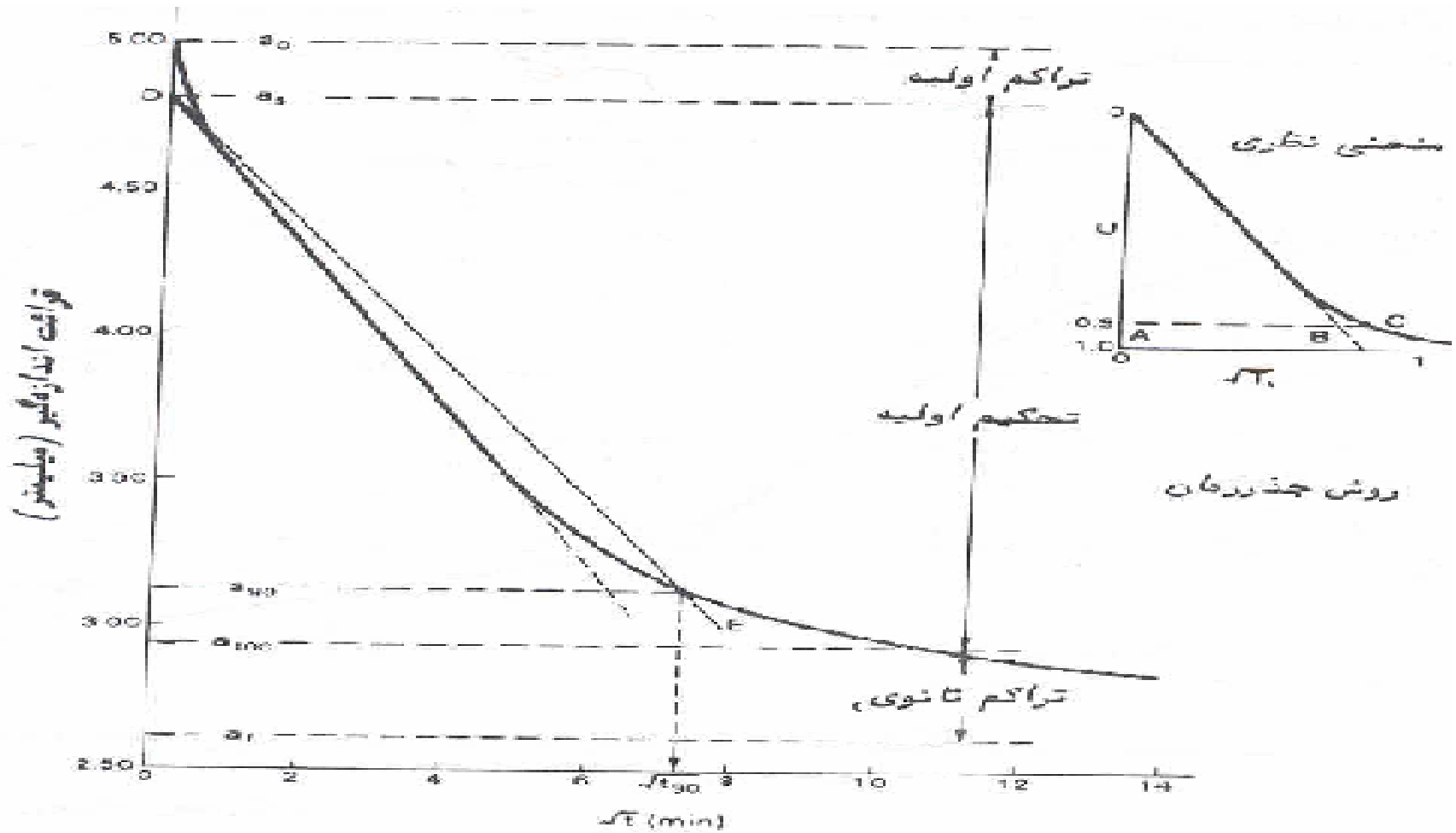
نقطه مربوط به $U=\%50$ در وسط فاصله قائم بین نقاط $a_\circ$ و a_{100} قرار دارد مقدار T_v مربوط به $U=\%50$ 0.196 محاسبه گردیده است و لذا ضریب تحکیم C_v عبارت خواهد شد از:

$$C_v = \frac{0.196 \quad d^2}{t_{50}}$$

مقدار d نصف ضخامت نمونه مي باشد

روش دوم ، روش جذر زمان یا روش تایلور:

در این روش منحني تغییر شکل قائم نمونه بر حسب جذر دوم زمان $\sqrt{t}$ بر حسب دقیقه ترسیم مي گردد



در اين روش منحني شامل يك قسمت كوچك منحني است كه به تحكيم مربوط نمي شود و سپس يك قسمت خطي را شامل مي گردد و در انتها به يك بخش منحني ديگر ختم مي گرددنقطه D كه مربوط به $U=0$ است با امتداد بخش خطي منحني حاصل مي گردد و بعد خط مستقيم DE كه 1.15 برابر طول مربوط بر روي بخش راست منحني است رسم مي شود نقطه تلاقي E با منحني تجربي نقطه a_{90} را كه مربوط به $U=\%90$ است مشخص مي نمايد مقدار Tv مربوط به $U=\%90$ برابر 0.848 است و لذا :

$$C_v = \frac{0.848\, d^2}{t_{90}}$$

تحکیم ثانوی

فرضیات تحکیم اولیه بر این است که تحکیم و تراکم خاک با به صفر رسیدن فشار منفذی اضافی خاک به پایان می رسد ولی تجربه نشان می دهد که فشردگی با به صفر رسیدن فشار منفذی اضافی متوقف نمی گردد. علت فشردگی فانوی به سبب جابجایی تدریجی ذرات رس و رسیدن به حالت متعادلتر مولکولهاست. معمولاً رسهای پلاستیک(مونتموریلونایت) بخش تحکیم ثانوی زیادی دارند.