آیا جزوه را از سایت ما دانلود کرده اید؟

کتابخانه الکترونیکی PNUEB

پیام نوری ها بشتابید

مزایای عضویت در کتابخانه PNUEB :

دانلود رایگان و نامحدود خلاصه درس و جزوه

دانلود رایگان و نامحدود حل المسائل و راهنما

دانلود کتابچه نمونه سوالات دروس مختلف

پیام نور با جواب

WWW.PNUEB.COM

کتابچه نمونه سوالات چیست:

سایت ما **افتخار** دارد برای اولین بار در ایران توانسته است کتابچه نمونه سوالات تمام دروس پیام نور که هر یک حاوی تمامی آزمون های برگزار شده پیام نور (تمامی نیمسالهای موجود حتی الامکان با جواب) را در یک فایل به نام کتابچه جمع آوری کند و هر ترم نیز آن را آپدیت نماید.

مراحل ساخت یک کتابچه نمونه سوال

(برای آشنایی با زحمت بسیار زیاد تولید آن در هر ترم) :

دسته بندی فایلها – سرچ بر اساس کد درس – چسباندن سوال و جواب – پیدا کردن یک درس در نیمسالهای مختلف و چسباندن به کتابچه همان درس – چسباندن نیمسالهای مختلف یک درس به یکدیگر – وارد کردن اطلاعات تک تک نیمسالها در سایت – آپلود کتابچه و خیلی موارد دیگر..

همچنین با توجه به تغییرات کدهای درسی دانشگاه استثنائات زیادی در ساخت کتابچه بوجود می آید که کار ساخت کتابچه را بسیار پیچیده می کند .

WWW.PNUEB.COM

فهرست مطالب

فصل۱ ..... ۴
فصل۲ ..... ۲۴
فصل۳ ..... ۴۶
فصل۴ ..... ۶۴
فصل۵ ..... ۸۲
فصل۷ ..... ۱۰۲
فصل۸ ..... ۱۲۴
فصل۱۰ ..... ۱۴۴
فصل۱۲ ..... ۱۷۶

فصل ۱

خاک و سنگ

مطالعهٔ طبیعت و خواص مهندسی خاک‌ها، بصورت جدی و مدرن اولین بار توسط ترزاقی در سال ۱۹۲۵ با انتشار کتاب *Erdbaumechanik* صورت گرفت و به همین سبب است که کارل ترزاقی را به درستی به عنوان پدر مکانیک خاک جدید می‌شناسند.

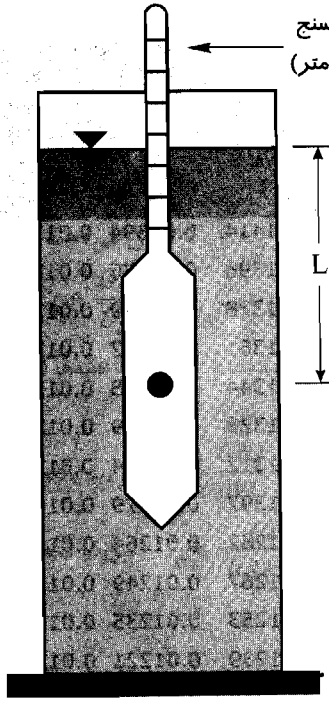
برای مطالعهٔ خاک‌ها، اولین قدم طبقه‌بندی و شناسایی آنها می‌باشد که به لحاظ اندازهٔ دانه‌هایشان به چهار طبقهٔ کلی یعنی شن، ماسه، لای و رس قابل تقسیم می‌باشند (البته هریک از موارد مذکور به دو حالت آلی و غیر آلی قابل تقسیم می‌باشند). برای تشریح خاک‌ها مؤسسات و سازمان‌های مختلف مرزهایی برای جداساختن چهار طبقهٔ کلی فوق قائل شده‌اند که چهار مورد مشهور این تقسیم‌بندی را در جدول ۱-۳ مشاهده می‌کنید. (در فصل سوم به توضیح مفصل راجع به طبقه‌بندی خاک‌ها خواهیم پرداخت).

جدول ۱-۳ حدود جداکنندهٔ اندازهٔ دانه‌های خاک.

نام سازمان	اندازهٔ دانه‌ها (mm)			
	شن	ماسه	لای	رس
انستیتو تکنولوژی ماساچوست (*MIT*)	>2	0.06 تا 2	0.002 تا 0.06	<0.002
سازمان کشاورزی آمریکا (*USDA*)	>2	0.05 تا 2	0.002 تا 0.05	<0.002
انجمن ادارات راه‌وترابری آمریکا (*AASHTO*)	2 تا 76.2	0.075 تا 2	0.002 تا 0.075	<0.002
سیستم طبقه‌بندی متحد	4.75 تا 76.2	0.075 تا 4.75	ریزدانه‌ها (رس و لای) <0.075	

دانه‌بندی خاک

به تعیین دامنهٔ اندازهٔ ذرات موجود در خاک که برمبنای توزیع وزنی دانه‌ها برحسب درصدی از وزن کل خشک خاک صورت می‌گیرد، دانه‌بندی خاک می‌گویند. که نتیجهٔ اینکار منحنی‌ای می‌شود که به آن منحنی دانه‌بندی می‌گویند که در دستگاهی که محور افقی لگاریتمی آن قطر دانه‌ها برحسب میلی‌متر و محور قائم غیرلگاریتمی آن درصد عبوری (درصد ریزتر) می‌باشد، ترسیم می‌شود.



جدول ۱ ـ ۵ اندازهٔ الکهای استاندارد آمریکایی

شمارهٔ الک	اندازهٔ روزنه (mm)
4	4.750
6	3.350
8	2.360
10	2.000
16	1.180
20	0.850
30	0.600
40	0.425
50	0.300
60	0.250
80	0.180
100	0.150
140	0.106
170	0.088
200	0.075
270	0.053

برای تعیین منحنی دانه‌بندی دو روش وجود دارد:

۱) استفاده از الک برای دانه‌های با قطر بزرگتر از 0.075 میلی‌متر؛

۲) آزمایش هیدرومتری برای ذراتی با قطر کوچکتر از 0.075 میلی‌متر.

آزمایش دانه‌بندی با الک، عبارت است از لرزاندن نمونهٔ خاک بر روی یک سری الک با اندازهٔ روزنه‌های استاندارد (جدول ۱-۵) که اندازه‌های آن به ترتیب از بالا به پائین کاهش می‌یابد.

آزمایش هیدرومتری بر پایهٔ اصول ته‌نشینی دانه‌های خاک در آب صورت می‌گیرد، که به کمک رابطهٔ زیر می‌توان قطر D که کوچکترین اندازهٔ ذره‌ایست که در لحظهٔ اندازه‌گیری از نقطهٔ اندازه‌گیری عبور کرده است، را بدست آورد.

$$D = K\sqrt{\frac{L}{t}}$$

در این رابطه:

D = قطر کوچکترین ذرهٔ ته‌نشین شده یا بزرگترین ذرهٔ معلق در عمق مؤثر در زمان t (برحسب زمان)

K = ثابتی که به درجهٔ حرارت آزمایش و چگالی دانه‌های خاک $(G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w})$ وابسته بوده و مقادیر آن در جدول ۱-۷ آمده است.

L = طول مؤثر برحسب سانتی‌متر

t = زمان مورد نظر بعد از شروع ته‌نشینی برحسب دقیقه

www.PnuB.com

جدول ۱-۷ مقدار K در رابطهٔ ۱-۶ (ASTM-1982)

w_c (%)	G_s							
	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80
16	0.01510	0.01505	0.01481	0.01457	0.01435	0.01414	0.01394	0.01374
17	0.01511	0.01486	0.01462	0.01439	0.01417	0.01396	0.01376	0.01356
18	0.01492	0.01467	0.01443	0.01421	0.01399	0.01378	0.01359	0.01339
19	0.01474	0.01449	0.01425	0.01403	0.01382	0.01361	0.01342	0.01323
20	0.01456	0.01431	0.01408	0.01386	0.01365	0.01344	0.01325	0.01307
21	0.01438	0.01414	0.01391	0.01369	0.01348	0.01328	0.01309	0.01291
22	0.01421	0.01397	0.01374	0.01353	0.01332	0.01312	0.01294	0.01276
23	0.01404	0.01381	0.01358	0.01337	0.01317	0.01397	0.01279	0.01261
24	0.01388	0.01365	0.01342	0.01321	0.01301	0.01282	0.01264	0.01246
25	0.01372	0.01349	0.01327	0.01306	0.01286	0.01267	0.01249	0.01232
26	0.01357	0.01334	0.01312	0.01291	0.01272	0.01253	0.01235	0.01218
27	0.01342	0.01319	0.01297	0.01277	0.01258	0.01239	0.01221	0.01204
28	0.01327	0.01304	0.01283	0.01264	0.01244	0.01225	0.01208	0.01191
29	0.01312	0.01290	0.01269	0.01249	0.01230	0.01212	0.01195	0.01178
30	0.01298	0.01276	0.01256	0.01236	0.01217	0.01199	0.01182	0.01169

www.PnuEB.com

اندازهٔ مؤثر، ضریب یکنواختی و ضریب دانه‌بندی

اگر از روی منحنی دانه‌بندی مقادیر D_{10}، D_{30} و D_{60} را که به‌ترتیب معرف قطر مربوط به درصد عبوری 10، درصد عبوری 30 و درصد عبوری 60 می‌باشد قرائت کنیم، خواهیم داشت:

۱) اندازهٔ مؤثر D_{10}

۲) ضریب یکنواختی (C_u)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

۳) ضریب دانه‌بندی (C_c)

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

سه پارامتر فوق در طبقه‌بندی خاک‌های دانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱-۱ برای خاکی معلومات زیر در دست است:

$D_{10} = 0.1mm$
$D_{30} = 0.41mm$
$D_{60} = 0.62mm$

مطلوب است محاسبهٔ ضرایب یکنواختی و ضریب دانه‌بندی برای این خاک.

توضیح: قطری که 10% دانه‌ها از آن عبور کنند (به عبارت دیگر 10 درصد دانه‌ها از آن ریزتر باشند) را اندازهٔ مؤثر نامیده و با D_{10} نشان می‌دهند و ضرایب یکنواختی و دانه‌بندی بترتیب با C_u و C_c نشان می‌دهند که از روابط روبرو بدست می‌آیند:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad \text{و} \quad C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

که در آن‌ها D_{60} و D_{30} بترتیب مربوط به قطر دانه‌هایی است که 60 درصد دانه‌ها و 30 درصد دانه‌ها از آنها ریزتر باشند.

ضریب یکنواختی $C_u = \frac{0.62}{0.1} = 6.2$

ضریب دانه‌بندی $C_u = \frac{(0.41)^2}{(0.1) \times (0.62)} = 2.71$

۱-۲ مسئلهٔ ۱-۱ را برای معلومات زیر تکرار نمائید.

$D_{10} = 0.082mm$ $\quad D_{30} = 0.29mm$ $\quad D_{60} = 0.51mm$

ضریب یکنواختی $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 6.22$ $\quad$ ضریب دانه‌بندی $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = 2.01$

۱-۳ مسئلهٔ ۱-۱ را برای $D_{10} = 0.18$ ، $D_{30} = 0.82$ و $D_{60} = 1.81$ میلیمتر تکرار کنید.

ضریب یکنواختی $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 10.06$ $\quad$ ضریب دانه‌بندی $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(0.82)^2}{(1.81)(0.18)} = 2.06$

۱-۴ مثال ۱-۲ را برای نتایج آزمایش دانه‌بندی زیر تکرار نمائید:

شمارهٔ الک	جرم خاک مانده روی هر الک (g)	درصد مانده روی هر الک (%)	درصد عبوری از هر الک (%)
4	28	4.54	95.46
10	42	6.81	88.65
20	48	7.78	80.87
40	128	20.74	60.13
60	221	35.82	24.31
100	86	13.94	10.37
200	40	6.48	3.89
زیر الک	24	3.89	0
	$\Sigma = 617gr$	$\Sigma = 100\%$	

www.PnuEB.com

الف) تعیین درصد عبوری از هر الک

برای ایـن مـنظور بـاید ابتدا مجموع جرمهای مانده روی هر الک را بدست‌آوریم و آنگاه نسبت $\frac{\text{جرم خاک مانده روی هر الک}}{\text{مجموع جرم مانده}} \times 100$ را بدست می‌آوریم که نمایانگر درصد مانده روی هر الک است که در ستون سوم جدول فوق آورده شده است.

بعد از تکمیل‌شدن ستون مربوط به درصد مانده به سراغ درصد عبوری می‌رویم. برای تکمیل این ستون مقدار 100%را از مقدار درصد مانده روی بزرگترین الک موجود (در مسألهٔ فوق الک #4 کم می‌کنیم تا درصد عبوری از آن بدست بیاید. جواب بدست‌آمده را از درصد مانده از الک دوم کم می‌کنیم تا درصد عبوری از آن بدست آید و این روند ادامه پیدا می‌کند تا به مقدار 0% در زیر الک برسیم و این بدین مفهوم است که هیچ مقدار خاکی از زیر الک عبور نخواهد کرد.

درصد عبوری از الک #4 = 100 - 4.54 = 95.46%

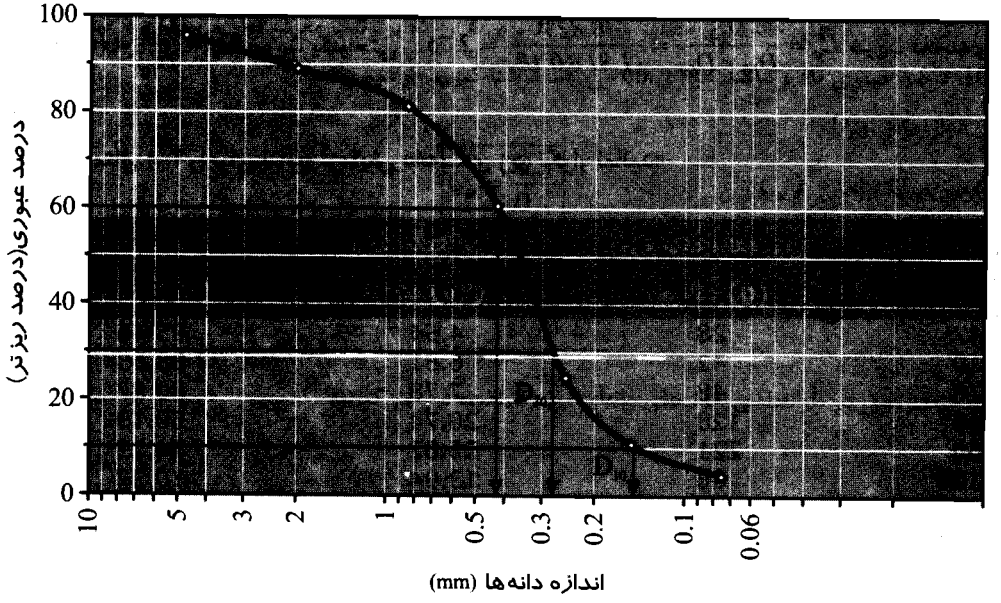
درصد عبوری از الک #10 = 95.46 - 6.81 = 88.65%

و

...

- **رسم منحنی دانه‌بندی:** برای اینکار قطر دانه‌ها در روی محور افقی لگاریتمی و درصد عبوری روی محور قائم و غیر لگاریتمی قرار می‌گیرند. برای داشتن اندازهٔ روزنهٔ هر الک (که در واقع معرف قطر دانه‌های خاکمان است) با توجه به شمارهٔ الکهای استاندارد آمریکایی از جدول ۱- ۵ عمل خواهیم کرد.

توصیه می‌شود قطر روزنه‌های الکهای 4 و 200 که بنا به طبقه‌بندی متحد (یونیناید) بترتیب معرف مرز بین شن و ماسه و مرز ریزدانه و درشت‌دانه است را حفظ نمائید (4.75mm و 0.075mm)



www.PnuEB*com

ب) برای تعیین D_{10}، D_{30} ، D_{60} در منحنی دانه‌بندی فوق از این درصد عبوری‌ها خطوط افقی رسم می‌کنیم و محل تلاقی آنها را روی محور افقی می‌خوانیم

$$D_{10} = 0.15mm \qquad D_{30} = 0.28mm \qquad D_{60} = 0.42mm$$

پ) تعیین ضریب یکنواختی (C_u)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.42}{0.15} = 2.8$$

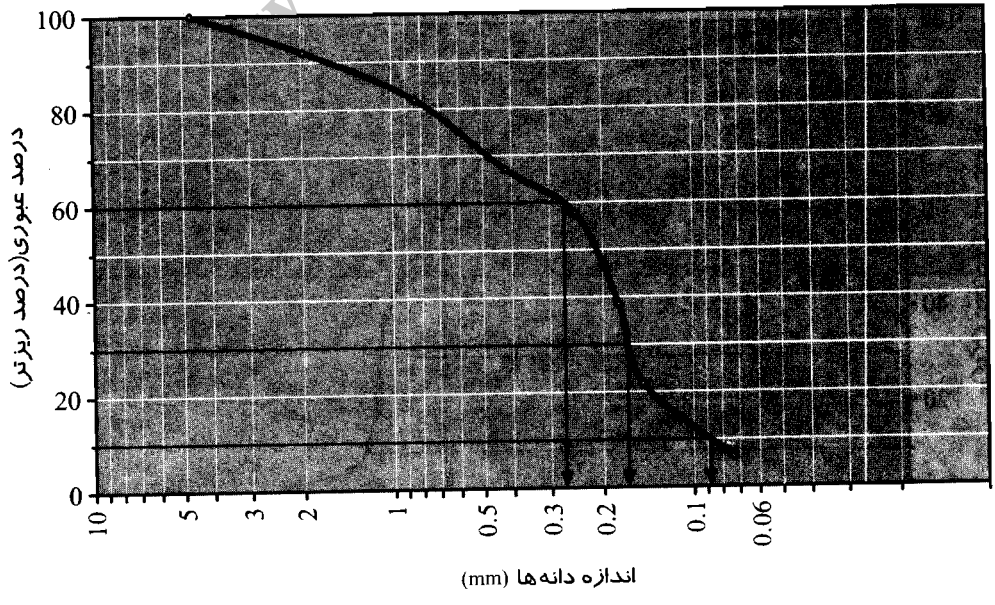
ت) تعیین ضریب دانه‌بندی (C_c)

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(0.28)^2}{(0.15)(0.42)} = 1.24$$

۱- ۵ مثال ۱-۲ را برای نتایج آزمایش دانه‌بندی زیر تکرار نمائید:

اندازه سوراخهای الک (mm)	شمارهٔ الک	جرم خاک مانده روی هر الک (gr)	درصد مانده در روی الک (%)	درصد عبوری از الک (%)
4.75	4	0	0	100
2	10	44	7.98	92.02
0.85	20	56	10.16	81.86
0.425	40	82	14.88	66.98
0.25	60	51	9.26	56.72
0.18	80	106	19.24	38.48
0.15	100	92	16.7	21.78
0.075	200	85	15.43	6.35
	زیر الک	35	6.35	0
		$\Sigma = 551gr$	$\Sigma = 100\%$	

الف) منحنی دانه‌بندی



ب) $D_{10} = 0.09mm \qquad D_{30} = 0.17mm \qquad D_{60} = 0.28mm$

پ) ضریب یکنواختی $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.28}{0.09} = 3.11$

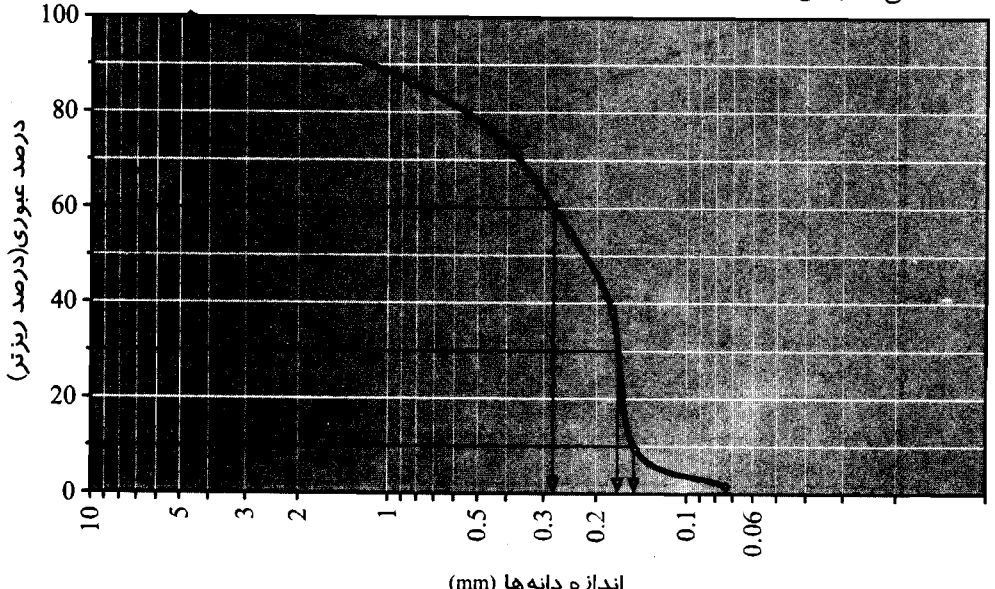
ت) ضریب دانه‌بندی $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{0.17^2}{0.28 \times 0.09} = 1.15$

۱-۶ مثال ۱-۲ را با داده‌های زیر تکرار کنید:

شماره الک (#)	جرم خاک مانده روی هر الک (gr)	درصد مانده در روی الک (%)	درصد عبوری (%)
4	0	0	100
10	40	5.5	94.5
20	60	8.23	86.27
40	89	12.2	74.07
60	140	19.2	54.87
80	122	16.74	38.13
100	210	28.8	9.33
200	56	7.68	1.65
زیر الک	12	1.65	0
	$\Sigma = 729gr$	$\Sigma = 100\%$	

www.PnuEP*

الف) منحنی دانه‌بندی



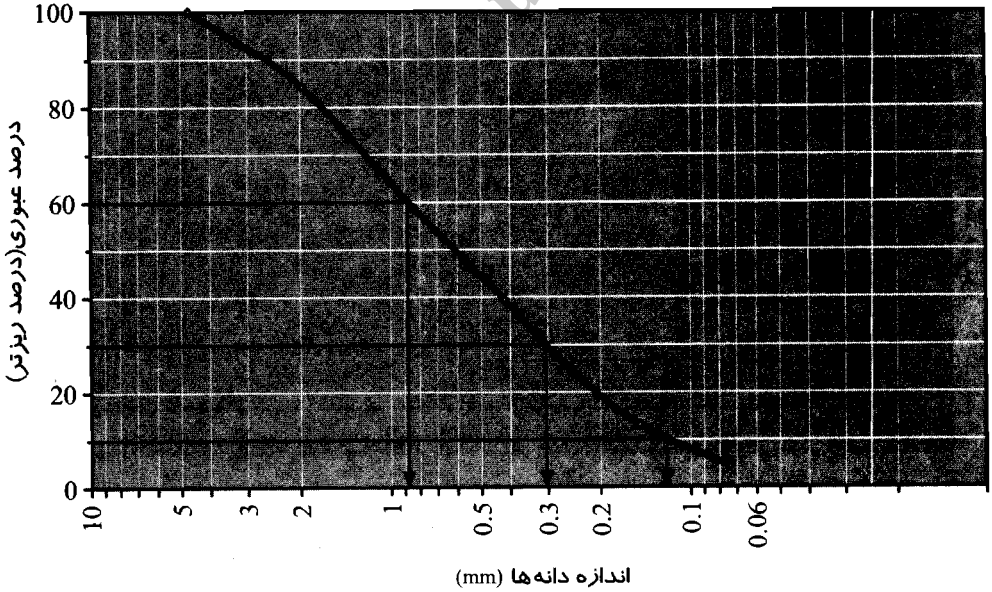
ب) $D_{10} = 0.16mm$ و $D_{30} = 0.17mm$ و $D_{60} = 0.29mm$

پ) ضریب یکنواختی $C_u = \frac{0.29}{0.16} = 1.81$

ت) ضریب دانه‌بندی $C_c = \frac{(0.17)^2}{(0.16)(0.29)} = 0.62$

۱-۷ مثال ۱-۲ را با داده‌های زیر تکرار کنید:

شمارهٔ الک	جرم خاک مانده روی هر الک (gr)	درصد مانده (%)	درصد عبوری (%)
4	0	0	100
6	30	6	94
10	48.7	9.74	84.26
20	127.3	25.46	58.8
40	96.8	19.36	39.44
60	76.6	15.32	24.12
100	55.2	11.04	13.08
200	43.4	8.68	4.4
زیر الک	22	4.4	0
	$\Sigma = 500gr$	$\Sigma = 100\%$	



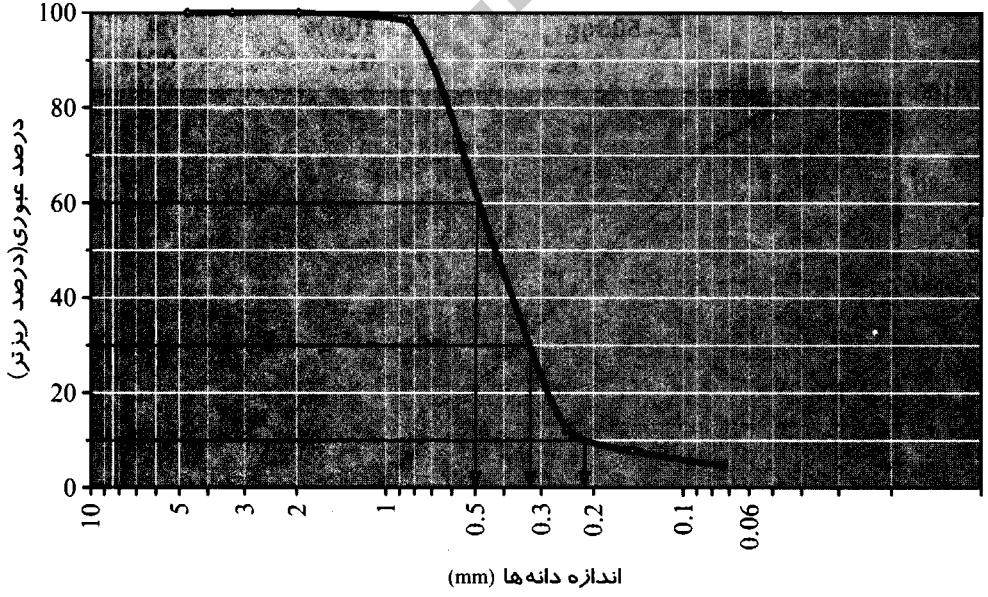
$D_{10} = 0.13mm$ $D_{30} = 0.31mm$ $D_{60} = 0.87mm$

ضریب یکنواختی $C_u = \frac{0.87}{0.13} = 6.7$

ضریب دانه‌بندی $C_c = \frac{(0.31)^2}{(0.13)(0.87)} = 0.85$

۱-۸ مثال ۱-۲ را با داده‌های زیر تکرار کنید:

شمارهٔ الک	جرم خاک مانده روی هر الک (gr)	درصد مانده (%)	درصد عبوری (%)
4	0	0	100
6	0	0	100
10	0	0	100
20	9.1	1.82	98.18
40	249.4	49.88	48.3
60	179.8	35.96	12.34
100	22.7	4.54	7.8
200	15.5	3.1	4.7
زیر الک	23.5	4.7	0
	$\Sigma = 500gr$	$\Sigma = 100\%$	



$D_{10} = 0.23mm$ $D_{30} = 0.34mm$ $D_{60} = 0.5mm$

ضریب یکنواختی $C_u = \frac{0.5}{0.23} = 2.17$

ضریب دانه‌بندی $C_c = \frac{(0.34)^2}{(0.5)\times(0.23)} = 1$

۱-۹ مشخصات دانه‌بندی خاکی مطابق جدول زیر است. مطلوبست رسم منحنی دانه‌بندی و تعیین درصد شن، ماسه، لای و رس طبق سیستم MIT (جدول ۱-۳).

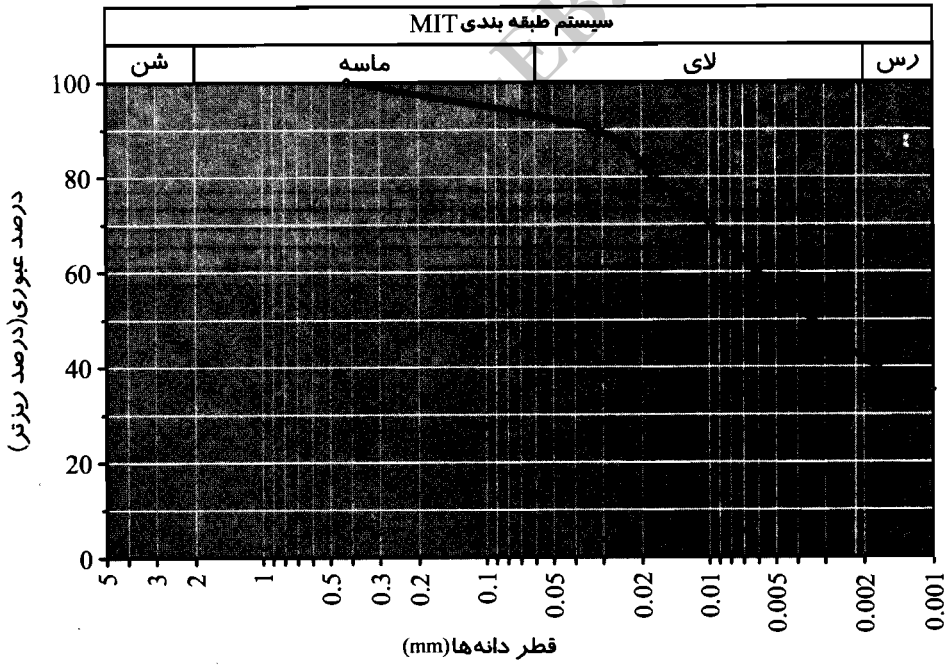
اندازه (mm)	درصد ریزتر
0.425	100
0.033	90
0.018	80
0.01	70
0.0062	60
0.0035	50
0.0018	40
0.001	35

لازم به ذکر است مقصود از «درصد ریزتر» همان «درصدعبوری» می‌باشد.

مطابق جدول (۱-۳):

طبق طبقه‌بندی **MIT**

اندازه دانه‌ها (mm)			
رس	لای	ماسه	شن
0.002	0.002 تا 0.06	0.06 تا 2	>2



0% = (بزرگتر از 2mm) درصد شن

100 - 93=7% = درصد ریزتر از 0.06mm ـ درصد ریزتر از 2mm = (بین 0.06 تا 2mm) درصد ماسه

93 - 42 =51% = درصد ریزتر از 0.002mm ـ درصد ریزتر از 0.06mm = (بین 0.002 تا 0.06mm) درصد لای

42% = (کوچکتر از 0.002mm) درصد رس

۱-۱۰ مثال ۱-۹ را با داده‌های زیر مجدداً حل کنید:

اندازه (mm)	درصد ریزتر
0.425	100
0.07	90
0.046	80
0.034	70
0.026	60
0.019	50
0.014	40
0.009	30
0.0054	20
0.0019	10

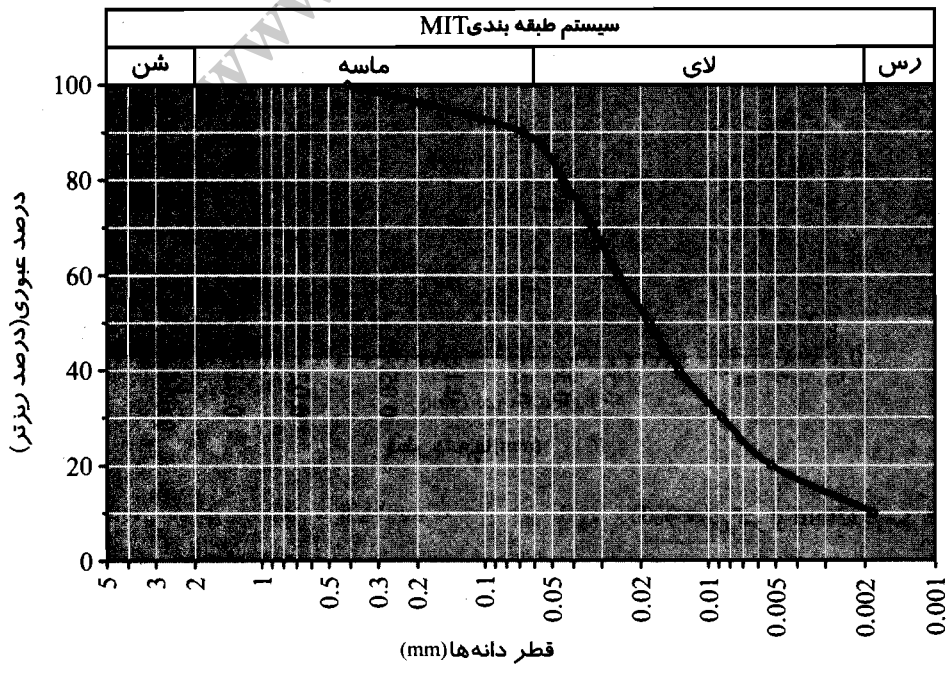
0% = درصد شن

100-88=12% = درصد ماسه

88-11=77% = درصد لای

11% = درصد رس

www.PnuEB.com



۱- ۱۱ مسئلهٔ ۱- ۹ را با داده‌های زیر مجدداً حل کنید:

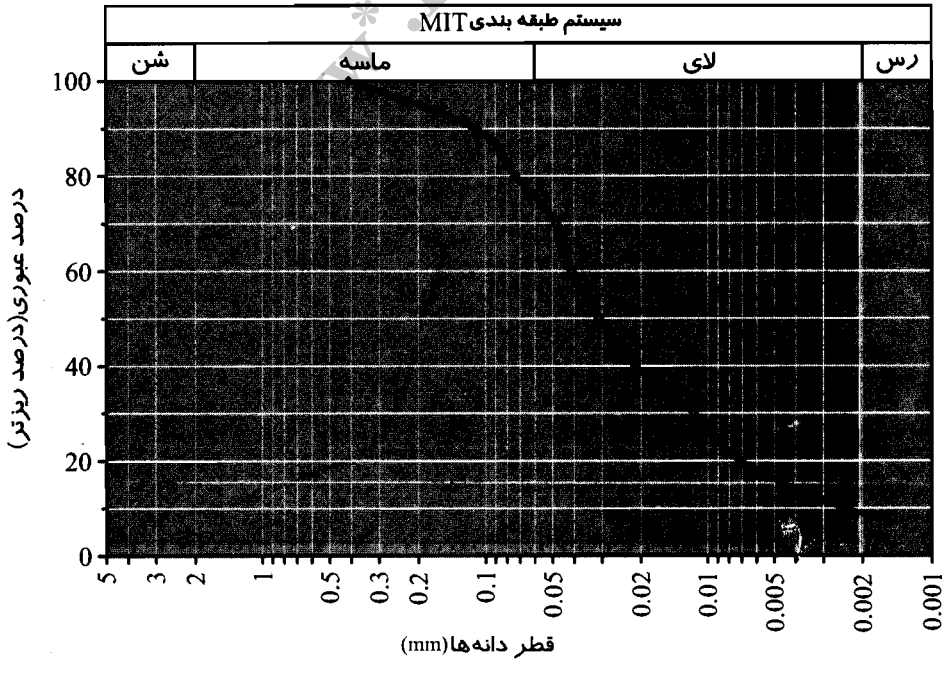
درصد ریزتر	اندازه (mm)
100	0.425
90	0.115
80	0.076
70	0.05
60	0.0425
50	0.032
40	0.022
30	0.012
20	0.0074
10	0.0025
8	0.0015

0% = درصد شن

100 - 75=25% = درصد ماسه

75 - 9= 66% = درصد ماسه

9% = درصد رس



www.PnuEB.com

۱-۱۲ مسئلهٔ ۱- ۹ را با داده‌های زیر مجدداً حل کنید:

اندازه (mm)	درصد ریزتر
0.425	100
0.14	90
0.1	80
0.088	70
0.076	60
0.064	50
0.056	40
0.048	30
0.035	20
0.011	10
0.0016	0

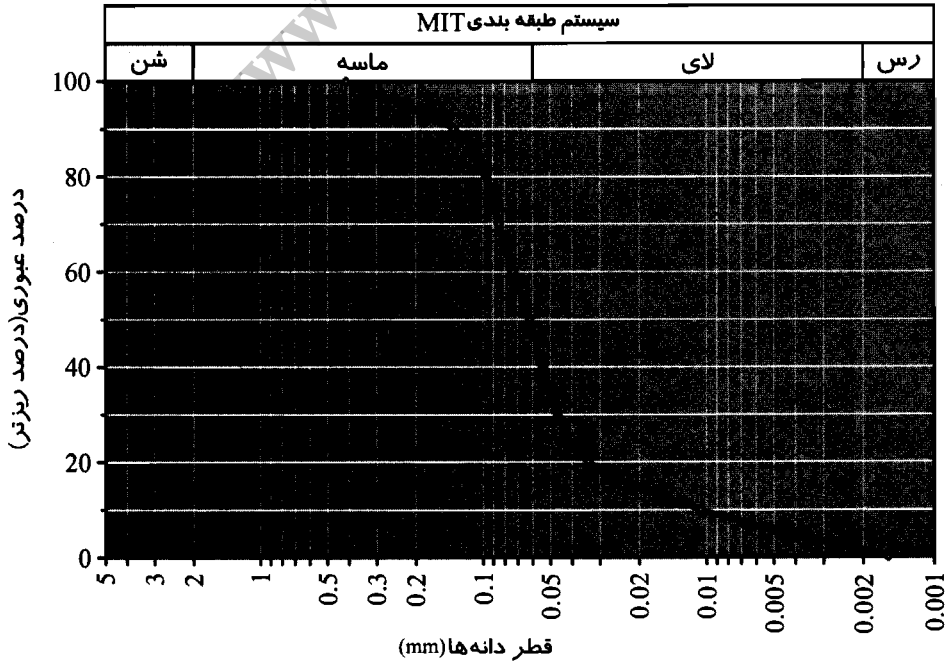
درصد شن = 0%

درصد ماسه = 100- 46 = 54%

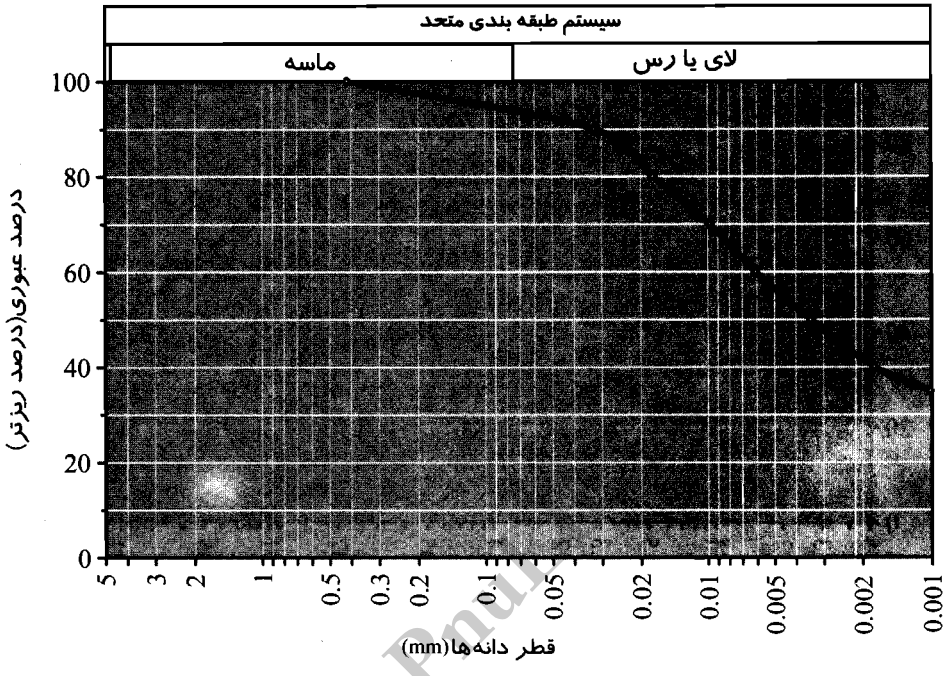
درصد لای = 46-3=43%

درصد رس = 3%

www.PnuEB.com



۱- ۱۳ مسئلهٔ ۱-۹ را با استفاده از سیستم طبقه‌بندی متحد و USDA تکرار کنید.



0% =درصد شن

درصد ریزتر از 0.075mm – درصد ریزتر از 4.75mm = (بین 4.75 و 0.075mm) درصد ماسه

= 100-94=6%

94%=کوچکتر از 0.075mm) درصد ریز دانه (لای و رس)

طبق طبقه‌بندی USDA:

اگر به جدول ۱-۳ مراجعه کنید مشاهده می‌کنید طبقه‌بندی MIT و USDA بسیار شبیه هم است و تنها تفاوت آنها مرز بین لای و ماسه است که در طبقه‌بندی USDA از 0.06 به 0.05 میلیمتر تغییر یافته‌است.

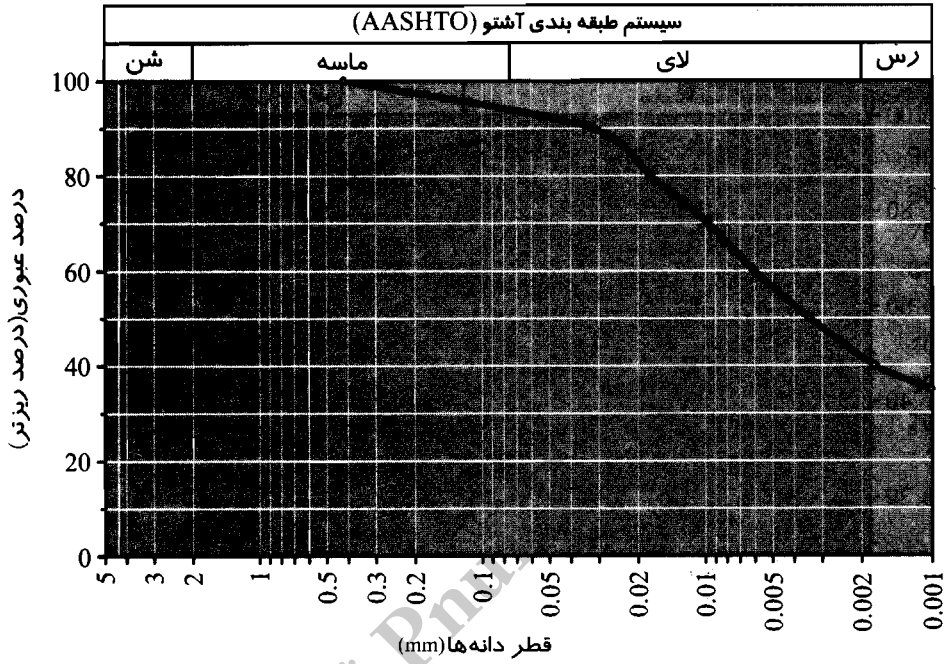
0%= درصد شن

8%= درصد ماسه

50%= درصد لای

42% = درصد رس

۱- ۱٤ مسئلهٔ ۱- ۹ را با استفاده از سیستم طبقه‌بندی آشتو تکرار کنید.



www.*.Pnu

0% = (بین 2 و 76.2mm) درصد شن

درصد ریزتر از 0.075mm – درصد ریزتر از 2mm = (بین 0.075 و 2mm) درصد ماسه
= 100 - 94 = 6%

درصد ریزتر از 0.002mm- درصد ریزتر از 0.075mm = (بین 0.002 و 0.075mm) درصد لای
= 94 - 42 =52%

42% = (ریزتر از 0.002mm میلیمتر) درصد رس

۱- ۱۵ مسئلهٔ ۱- ۱۰ را با استفاده از سیستم طبقه‌بندی متحد و USDA تکرار کنید.

اگر نمودار دانه‌بندی ترسیم شده در مسألهٔ ۱-۱۰ را در سیستم‌های طبقه‌بندی متحد و USDA بیاوریم نتایج زیر بدست‌می‌آید.

طبق طبقه‌بندی متحد:

0% = (بین 4.75 و 76.2mm) درصد شن

100 - 91=9% = (بین 0.075 و 4.75mm) درصد ماسه

91% = (کوچکتر از 0.075mm) درصد لای و رس

طبق طبقه‌بندی USDA :

0% = (بزرگتر از 2mm) درصد شن

100 - 83 =17% = (بین 0.05 و 2mm) درصد ماسه

83 - 11 =72% = (بین 0.002 و 0.05mm) درصد لای

11% = (کوچکتر از 0.002mm) درصد رس

۱-۱۶ مسئلهٔ ۱- ۱۰ را با استفاده از سیستم طبقه‌بندی آشتو تکرار کنید.

طبق طبقه‌بندی آشتو :
0% = (بین 2 و 76.2mm) درصد شن
100 - 91= 9% = (بین0.075 و 2mm) درصد ماسه
91 - 11= 80% = (بین 0.002 و 0.075mm) درصد لای
11% = (کوچکتر از 0.002mm) درصد رس

۱-۱۷ مسئلهٔ ۱- ۱۱ را با استفاده از سیستم طبقه‌بندی متحد و USDA تکرار کنید.

طبق طبقه‌بندی متحد:

0%= درصد شن
100-80=20%=درصد ماسه
80%= درصد ریزدانه (لای و رس)

طبقه‌بندی USDA:

0%= درصد شن
100 - 70 = 30%= درصد ماسه
70 - 9 = 61% درصد لای
9% = درصد رس

۱-۱۸ مسئلهٔ ۱- ۱۱ را با استفاده از سیستم طبقه‌بندی آشتو تکرار کنید.

0% = درصد شن
100 - 80 = 20% = درصد ماسه
80 - 9 =71% = درصد لای
9% = درصد رس

۱-۱۹ مسئلهٔ ۱- ۱۲ را با استفاده از سیستم طبقه‌بندی متحد و USDA تکرار کنید.

طبق طبقه‌بندی متحد:

0%= درصد شن
100-58=42% =درصد ماسه
58%= درصد ریزدانه (لای و رس)

طبقه‌بندی USDA:

0% = درصد شن
100 - 32 = 68% = درصد ماسه
32 - 3 = 29% = درصد لای
3%= درصد رس

www.PnuEB.com

۱- ۲۰ مسئلهٔ ۱- ۱۲ را با استفاده از سیستم طبقه‌بندی آشتو تکرار کنید.

0% = درصد شن

100 - 58 = 42% = درصد ماسه

58 - 3 = 55% = درصد لای

3% = درصد رس

۱- ۲۱ خاکی با دانه‌بندی زیـر در دست است. درصد شن، ماسه، لای و رس آن را طبق سیستم MIT تعیین نمائید.

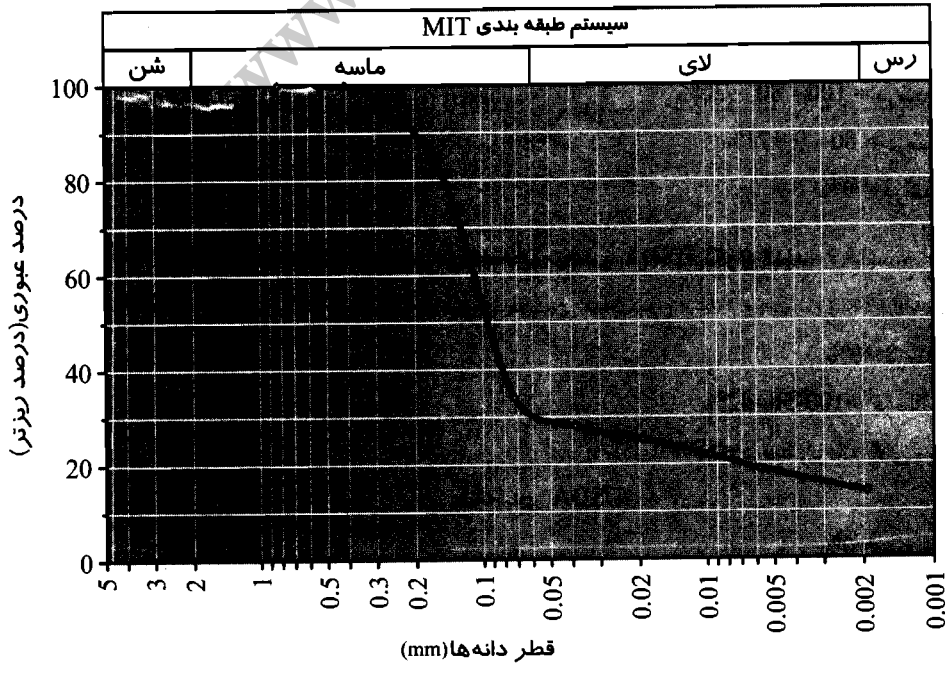
اندازه (mm)	درصد ریزتر
0.85	100
0.425	100
0.25	94.1
0.15	79.3
0.075	34.1
0.04	28
0.02	25.2
0.01	21.8
0.006	18.9
0.002	14

0% = درصد شن

100 − 30 = 70% = درصد ماسه

30 − 14 = 16% = درصد لای

14% = درصد رس



www.PnuEB.com

۱- ۲۲ مسئلهٔ ۱- ۲۱ را با استفاده از سیستم طبقه‌بندی متحد و USDA تکرار کنید.

با ترسیم نمودار دانه‌بندی فوق در جداول مربوط به هر یک از این سیستمها نتایج زیر بدست می‌آید:

طبق طبقه‌بندی متحد:

0% = (بین 4.75 و 76.2mm) درصد شن

65.9% = 100 - 34.1 = (بین 0.075 و 4.75mm) درصد ماسه

34.1% = (کوچکتر از 0.075mm) درصد ریزدانه (رس و لای)

طبق طبقه‌بندی USDA:

0% = (بزرگتر از 2mm) درصد شن

71% = 100 - 29 =(بین 0.05 و 2mm) درصد ماسه

15% = 29 - 14 = (بین 0.002 و 0.05mm) درصد لای

14% = (کوچکتر از 0.002mm) درصد رس

۱- ۲۳ مسئلهٔ ۱- ۲۱ را با استفاده از سیستم طبقه‌بندی آشتو تکرار کنید.

طبقه‌بندی آشتو:

0% = (بین 2 و 76.2mm) درصد شن

65.9% = 100 - 34.1 = (بین 0.075 و 2mm) درصد ماسه

20.1% = 34.1 - 14 = (بین 0.002 و 0.075mm) درصد لای

14% = (کوچکتر از 0.002mm) درصد رس

۱- ۲۴ در یک آزمایش هیدرومتری ، اطلاعات زیر در دست است:

$G_s = 2.70$

درجهٔ حرارت آزمایش $= 23^{\circ}C$

L = 12.8cm (۶۰ دقیقه بعد از شروع ته‌نشینی، به شکل ۱- ۱۴ مراجعه کنید)

مطلوبست تعیین قطر D کوچکترین اندازهٔ ذره‌ای که در لحظهٔ اندازه گیری از نقطهٔ اندازه‌گیری عبور کرده است.

$$D_{mm} = K\sqrt{\frac{L_{(cm)}}{t_{(min)}}}$$

با استفاده از جدول ۱- ۷ کتاب به‌ازای $G_s = 2.70$ و درجهٔ حرارت 23 درجهٔ سانتیگراد خواهیم داشت:

$K=0.01297$

$$D = 0.01297\sqrt{\frac{12.8}{60}} = 5.99\times10^{-3}\,mm$$

www.PouEB*com

۱- ۲۵ مسئلهٔ ۱-۲۴ را با اطلاعات زیر تکرار کنید:

$G_s = 2.60$

درجه حرارت آزمایش = $24^{\circ}C$

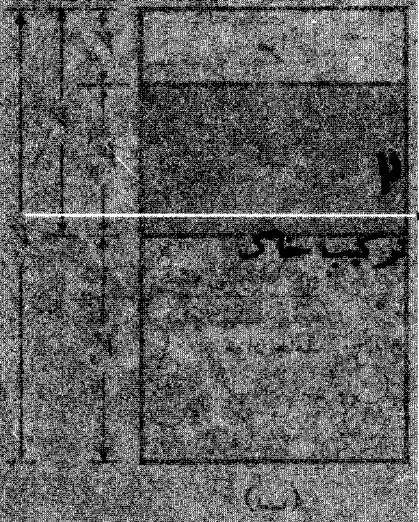
$L = 9.2cm$ ($t = 60min$)

با استفاده از جدول ۱-۷ کتاب به ازای $G_s = 2.60$ و درجه حرارت 24 درجه سانتیگراد خواهیم داشت:

$K = 0.01321$

$$D = 0.01321\sqrt{\frac{9.2}{60}} = 5.17 \times 10^{-3}\, mm$$

www.*PnuEB.*com

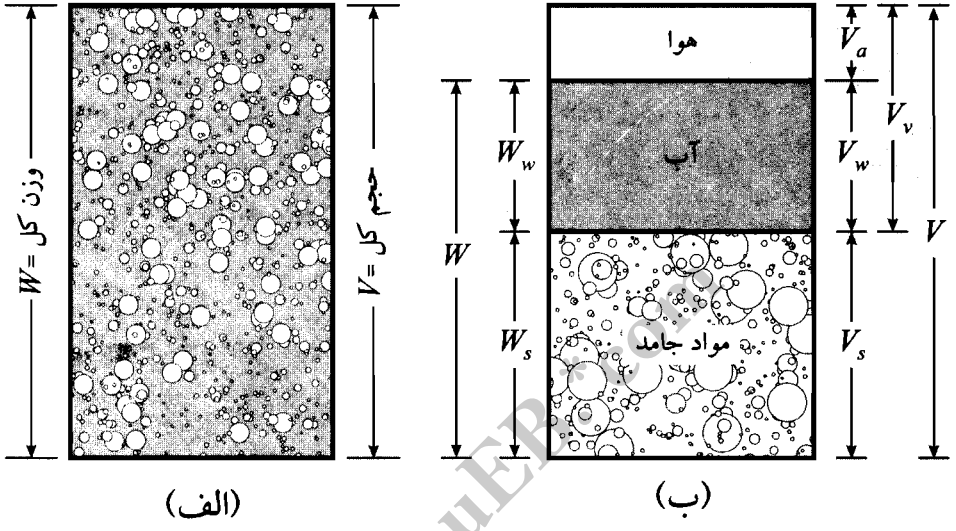


فصل ۲

ترکیب سلول

PnuEB.*com

در وضعیت طبیعی، خاک یک سیستم سه قسمتی شامل قسمت‌های جامد، آب و هوا می‌باشد (شکل۲-۱) که به مجموع حجم هوا و حجم آب، حجم حفرات یا فضاهای خالی گفته می‌شود و با V_v نشان داده می‌شود.



شکل ۲-۱ (الف) اجزای خاک در وضعیت طبیعی (ب) سه قسمت خاک

در مکانیک خاک روابط حجمی معمول، عبارتند از: نسبت تخلخل (e)، تخلخل یا پوکی (n) و درجهٔ اشباع (S_r)

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$n = \frac{V_v}{V}$$

$$e = \frac{n}{1-n} \quad \text{و} \quad n = \frac{e}{1+e}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

درجهٔ اشباع برای خاک کاملاً خشک صفر و یا 0% و برای خاک کاملاً اشباع (خاکی که تمام فضای حفرات آن توسط آب اشغال شده باشد و به عبارتی $V_w = V_v$) برابر با 1 یا 100% می‌باشد.

در مکانیک خاک روابط وزنی معمول، عبارتند از: درصد رطوبت (ω) و وزن مخصوص (γ)

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

www.PnuEP.ir

وزن مخصوص:

الف) وزن مخصوص مرطوب خاک (وزن مخصوص معمولی)

$$\gamma_t = \gamma = \frac{W}{V} = \frac{\text{وزن خاک}}{\text{حجم خاک}} = \rho g$$

(ρ: جرم مخصوص، g: شتاب ثقل زمین)

ب) وزن مخصوص دانه‌های جامد

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V} = \frac{\text{وزن دانه‌های جامد}}{\text{حجم خاک}}$$

پ) وزن مخصوص خشک خاک

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_s} = \frac{\text{وزن دانه‌های جامد}}{\text{حجم قسمت جامد}}$$

توجه: همواره داریم $\boxed{\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega}}$ (ω: درصد رطوبت)

ت) وزن مخصوص اشباع

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{W_w + W_s}{V_w + V_s}$$

ث) وزن مخصوص غوطه‌وری

$$\boxed{\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w}$$

اشکال مختلفی از روابط γ و γ_d و γ_{sat} در جدول ۲-۱ آورده شده است که توصیه می‌گردد تنها رابطهٔ کلی $\boxed{\gamma = \frac{G_s + eS_r}{1+e} \times \gamma_w}$ را به‌خاطر بسپارید و برای تعیین γ_d کافیست S_r را صفر قرار داده و برای تعیین γ_{sat} مقدار S_r را یک قرار دهید که خواهیم داشت:

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \times \gamma_w \quad \text{و} \quad \gamma_d = \frac{G_s \times \gamma_w}{1+e}$$

در این روابط G_s چگالی دانه‌ها بوده و از رابطهٔ $G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$ بدست می‌آید.

γ_w = وزن مخصوص آب $= (1\frac{gr}{cm^3} - 62.4\frac{lb}{ft^3} - 9.81\frac{kN}{m^3})$

از طرفی بین روابط حجمی و وزنی رابطهٔ مهم $\boxed{\omega \times G_s = e \times S_r}$ برقرار می‌باشد که با توجه به معلومات مسئله می‌توان در روابط وزن مخصوص ذکر شده بجای e از $\frac{\omega \times G_s}{S_r}$ استفاده کرد.

www.PnuEB.com

جدول ۲ ۱ اشکال مختلفی از روابط

شماره رابطه	رابطه
(۲-۱۵)	$\gamma = \frac{(1+\omega)G_s\gamma_w}{1+e}$
(۲-۲۶)	$\gamma = \frac{(G_s+Se)\gamma_w}{1+e}$
(۲-۲۷)	$\gamma = \frac{(1+\omega)G_s\gamma_w}{1+\frac{\omega G_s}{S}}$
(۲-۲۸)	$\gamma = G_s\gamma_w(1-n)(1+\omega)$

وزن مخصوص خشک

(۲-۱۲)	$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega}$
(۲-۱۶)	$\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e}$
(۲-۲۲)	$\gamma_d = G_s\gamma_w(1-n)$
(۲-۲۹)	$\gamma_d = \frac{G_s}{1+\frac{\omega G_s}{S}}\gamma_w$
(۲-۳۰)	$\gamma_d = \frac{eS\gamma_w}{(1+e)\omega}$
(۲-۳۱)	$\gamma_d = \gamma_{sat} - n\gamma_w$
(۲-۳۲)	$\gamma_d = \gamma_{sat} - \left(\frac{e}{1+e}\right)\gamma_w$

وزن مخصوص اشباع

(۲-۱۸)	$\gamma_{sat} = \frac{(G_s+e)\gamma_w}{1+e}$
(۲-۲۴)	$\gamma_{sat} = [(1-n)G_s+n]\gamma_w$
(۲-۳۳)	$\gamma_{sat} = \left(\frac{1+\omega}{1+\omega G_s}\right)G_s\gamma_w$
(۲-۳۴)	$\gamma_{sat} = \left(\frac{e}{\omega}\right)\left(\frac{1+\omega}{1+e}\right)\gamma_w$
(۲-۳۵)	$\gamma_{sat} = \gamma_d + n\gamma_w$
(۲-۳۶)	$\gamma_{sat} = \gamma_d + \left(\frac{e}{1+e}\right)\gamma_w$

www.PnuEB.com

تراکم نسبی

برای نشان‌دادن میزان تراکم و یا سستی **خاک‌های دانه‌ای** در محل، از پارامتری با عنوان تراکم نسبی (relative density) یا D_r استفاده می‌کنند که هر چقدر مقدار آن بیشتر باشد (دامنهٔ تغییرات آن از صفر تا حداکثر یک می‌باشد) نشان‌دهندهٔ متراکم‌تر بودن خاک است.

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} = \left[\frac{\gamma_d - \gamma_{d(min)}}{\gamma_{d(max)} - \gamma_{d(min)}}\right]\left[\frac{\gamma_{d(max)}}{\gamma_d}\right]$$

حدود اتربرگ

حدود رطوبتی که خاک مطابق شکل زیر تغییر حالت می‌دهد را حدود اتربرگ می‌گویند.

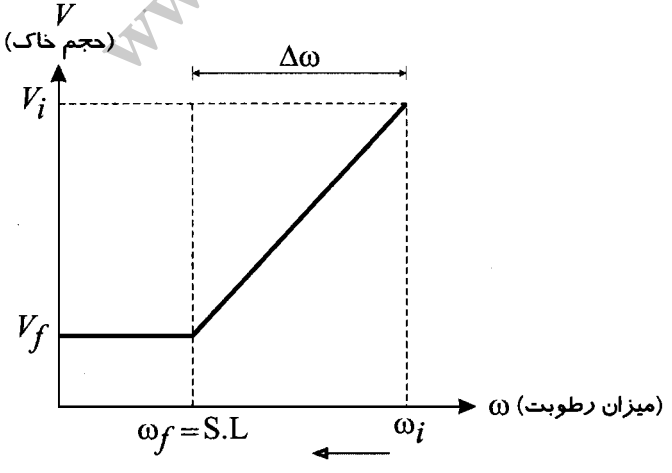
شرایط خاک	جامد	نیمه جامد	خمیری	روانی
نحوهٔ تغییر شکل	خرد می‌شود	ترک می‌خورد	حالت می‌پذیرد	حالت نمی‌پذیرد
حدود اتربرگ	حد انقباض S.L	حد خمیری P.L	حد مایع L.L	

جهت افزایش رطوبت ←

www.PnuEB.com

آزمایش تعیین حد انقباض:

همانطور که می‌دانید با کاهش رطوبت خاک، حجم آن کاهش می‌یابد تا جائیکه دیگر با کاهش رطوبت مقدار حجم تغییر نمی‌کند و به یک مقدار ثابت (V_f) می‌رسد. میزان رطوبت در این لحظه را حد انقباض می‌گویند.

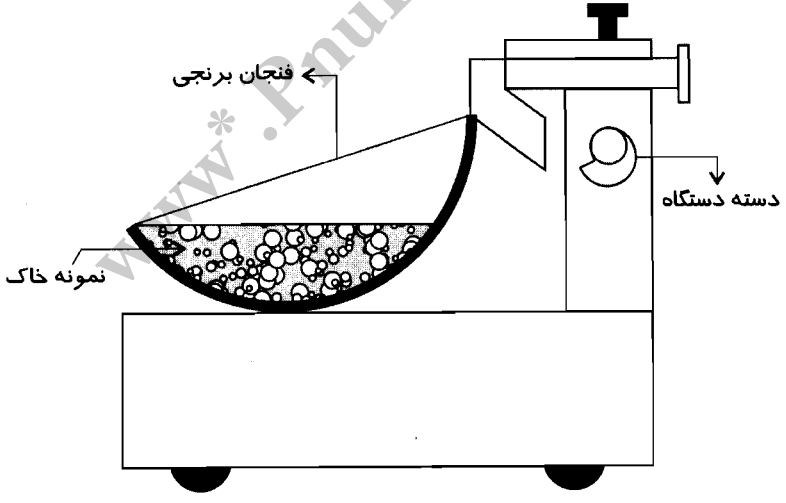


$$S.L = \omega_i - \Delta\omega = \left[\frac{m_1 - m_2}{m_2} - \frac{(V_i - V_f)\rho_w}{m_2}\right] \times 100$$

که در این رابطه:
m_1 = جرم خاک در شروع آزمایش
m_2 = جرم خاک خشک شده در ظرف
V_i = حجم اولیهٔ خاک مرطوب
V_f = حجم خاک خشک شده (حجم نهایی و ثابت شدهٔ خاک)
ρ_w = جرم مخصوص آب

آزمایش تعیین حدخمیری: در این آزمایش تکه‌ای از خمیر خاک با روش غلتاندن بر روی یک صفحهٔ شیشه‌ای، فتیله‌ای به قطر ۳/۲ میلیمتر می‌سازد که میزان رطوبت مربوط به این فتیله زمانیکه ترک بخورد حدخمیری است و با $P.L$ نشان می‌دهند.

آزمایش تعیین حدروانی (حدمایع): وسیلهٔ انجام این آزمایش در زیر بصورت شماتیک کشیده شده است. برای انجام این آزمایش ابتدا نمونه‌ای از خاک موردنظر را در فنجان برنجی ریخته و با شیارزنی، شیار استانداردی زده و با پیچاندن دستهٔ دستگاه، فنجان از روی پایه بلند شده و از ارتفاع ۱۰میلیمتری روی پایه می‌افتد.

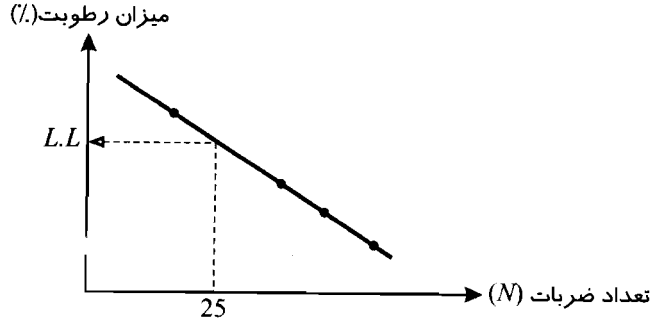


دستگاه اندازه گیری حد مایع

تعداد ضربات لازم برای بسته‌شدن شیار را ثبت می‌کنیم و با اندازه گرفتن رطوبت این نمونهٔ خاک مختصات یک نقطه از منحنی جریان را بدست می‌آوریم (منحنی جریان، منحنی‌ای است که در دستگاهی که محور قائم آن میزان رطوبت به درصد و در مقیاس غیرلگاریتمی و محور افقی آن تعداد ضربات در مقیاس لگاریتمی می‌باشد، ترسیم می‌شود). این آزمایش را روی حداقل سه نمونهٔ دیگر از خاکمان انجام می‌دهیم و با داشتن نقاط مربوط به هر آزمایش، خطی به عنوان منحنی جریان از بین این نقاط عبور می‌دهیم. میزان رطوبت متناظر با ۲۵ ضربه، حد

www.PnuEB.com

مایع یا حد روانی یا L.L می باشد. شیب خط جریان را نشانهٔ جریان می‌گویند و با I_f نشان می‌دهند.



منحنی جریان

دو تعریف مهم:

نشانهٔ خمیری(PI): اختلاف بین حدمایع و حدخمیری خاک را نشانهٔخمیری می‌گویند.

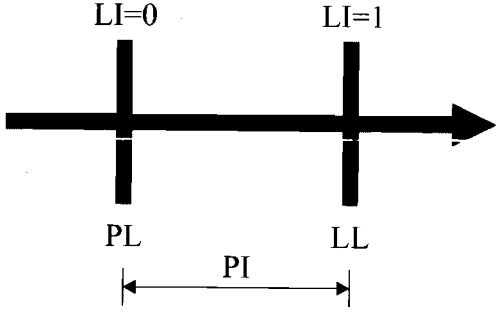
$$PI = L.L - P.L$$

نشانهٔ مایع(LI): برای بیان سفتی نسبی یک **خاک چسبنده** در وضعیت طبیعی از این شاخص استفاده می‌گردد و از رابطهٔ زیر تعیین می‌گردد:

$$LI = \frac{\omega - P.L}{PI}$$

ω در این رابطه، رطوبت طبیعی (در جای) خاک می‌باشد.

در نهشته‌های خاکی پیش تحکیم یافتهٔزیاد ممکن است میزان رطوبت طبیعی خاک از حدخمیری کمتر باشد. در این صورت LI می‌تواند نزدیک به صفر و یا منفی گردد.



www.*PnuEB.*com

۲-۱ تا ۲-۵ روابط زیر را اثبات نمایید.

۲-۱

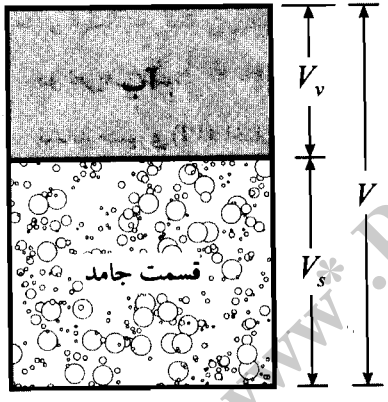
$$\gamma_d = \gamma_{sat} - n\gamma_w \qquad \text{(رابطهٔ ۲-۳۱)}$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{W_w + W_s}{V} = \frac{n.\gamma_w.V + W_s}{V} = n\gamma_w + \frac{W_s}{V} = n\gamma_w + \gamma_d$$

$$\Rightarrow \gamma_d = \gamma_{sat} - n\gamma_w$$

دررابطهٔ γ_{sat} دقت نمودید که بجای W_w، $n\gamma_w V$ را جایگزین نمودیم زیرا در اینحالت (saturation):



$$n = \frac{V_v}{V} \text{ و } \gamma_w = \frac{W_w}{V_v} \Rightarrow W_w = n\gamma_w V$$

۲-۲

$$\gamma_{sat} = \left(\frac{e}{\omega}\right)\left(\frac{1+\omega}{1+e}\right)\gamma_w \qquad \text{(رابطهٔ ۲-۳۴)}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{W_w + W_s}{V} = \frac{\omega W_s + W_s}{V_v + V_s} = \frac{W_s(\omega+1)}{V_s(e+1)} = \frac{W_s}{V_s} \times \left(\frac{1+\omega}{1+e}\right)$$

$$\frac{W_s}{V_s} = \frac{V_v}{V_s} \times \frac{W_s}{V_v} = e \times \frac{W_s}{W_w \times V_v} \times W_w = e \times \frac{1}{\frac{W_w}{W_s} \times V_v} \times W_w$$

$$= \frac{e}{\omega} \times \frac{W_w}{V_v} = \frac{e}{\omega} \times \gamma_w$$

جایگذاری ⟵

$$\gamma_{sat} = \frac{e}{\omega} \times \left(\frac{1+\omega}{1+e}\right) \times \gamma_w$$

توجه شود در عبارات فوق از روابط $e = \frac{V_v}{V_s}$ و $\omega = \frac{W_w}{W_s}$ سود جستیم.

www.PnuEB.com

$$e=\frac{\gamma_{sat}-\gamma_w}{\gamma_d-\gamma_{sat}+\gamma_w}$$ ۲-۳

این رابطه صحیح نمی‌باشد زیرا با طرفین - وسطین کردن رابطهٔ فوق خواهیم داشت:

$$e\gamma_d-e\gamma_{sat}+e\gamma_w=\gamma_{sat}-\gamma_w$$

$$\gamma_{sat}+e\gamma_{sat}+e\gamma_d+e\gamma_w+\gamma_w$$

$$(1+e)\gamma_{sat}=e\gamma_d+(1+e)\gamma_w$$

$$\gamma_{sat}=\frac{e}{1+e}\gamma_d+\gamma_w=n\gamma_d+\gamma_w$$

در حالیکه طبق مسئلهٔ (۲-۱) بدست آوردیم:

$$\gamma_{sat}=\gamma_d+n\gamma_w$$

$$G_s=\frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w-\omega_{sat}(\gamma_{sat}-\gamma_w)}$$ ۲-۴

$$\gamma_{sat}=\frac{W_w+W_s}{V_v+V_s}=\frac{W_s(1+\omega_{sat})}{V_s(1+e)}=\frac{\frac{W_s}{V_s}(1+\omega_{sat})}{1+e}=\gamma_s\frac{1+\omega_{sat}}{1+e}$$

$$\omega.G_s=e.S_r \xrightarrow{\text{در حالت اشباع } S_r=1} \omega_{sat}.G_s=e$$

$$\Rightarrow \gamma_{sat}=\frac{\gamma_s(1+\omega_{sat})}{1+\omega_{sat}G_s}=\frac{G_s\gamma_w(1+\omega_{sat})}{1+\omega_{sat}G_s}$$

$\Rightarrow$ طرفین – وسطین :

$$\gamma_{sat}+\omega_{sat}\gamma_{sat}G_s=G_s\gamma_w+G_s\gamma_w\omega_{sat}$$

$$G_s\gamma_w+G_s\gamma_w\omega_{sat}-\omega_{sat}\gamma_{sat}G_s=\gamma_{sat}$$

$$G_s(\gamma_w+\gamma_w\omega_{sat}-\omega_{sat}\gamma_{sat})=\gamma_{sat}$$

$$\Rightarrow G_s=\frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w+\gamma_w\omega_{sat}-\omega_{sat}\gamma_{sat}}$$

$$\Rightarrow G_s=\frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w-\omega_{sat}(\gamma_{sat}-\gamma_w)}$$

$$\omega_{sat}=\frac{n\gamma_w}{\gamma_{sat}-n\gamma_w}$$ ۲-۵

$$\omega_{sat}=\frac{W_w}{W_s}=\frac{W_w}{W-W_w}$$

www.PnuFB.com

صورت و مخرج کسر را در $\frac{n}{V_v}$ ضرب می‌کنیم ⟶

$$\omega_{sat} = \frac{n\frac{W_w}{V_v}}{n\frac{W}{V_v} - n\frac{W_w}{V_v}} = \frac{n\gamma_w}{n\frac{W}{V_v} - n\gamma_w}$$

$$= \frac{n\gamma_w}{\frac{V_v}{V} \times \frac{W}{V_v} - n\gamma_w} = \frac{n\gamma_w}{\frac{W}{V} - n\gamma_w} = \frac{n\gamma_w}{\gamma_{sat} - n\gamma_w}$$

۲-۶ برای خاکی اطلاعات زیر در دست است:

$\omega = 10.8\%$ و $\gamma = 17.6\ kN/m^3$ و $G_s = 2.67$

مطلوبست تعیین: الف) وزن مخصوص خشک خاک ب) نسبت تخلخل پ) پوکی و ت) درجهٔ اشباع.

الف) $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{17.6}{1+0.108} = 15.88\ kN/m^3$

ب) $\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e}$ داریم:

$$15.88 = \frac{2.67 \times 9.81}{1+e} \Rightarrow e = 0.65$$

پ) $n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.65}{1+0.65} = 0.39$

ت) $e.S_r = \omega.G_s$

$$0.65 \times S_r = 0.108 \times 2.67$$

$$\Rightarrow S_r = 0.444 = 44.4\%$$

۲-۷ و ۲-۸ : مسئلهٔ ۲- ۶ را با داده‌های زیر تکرار کنید:

۲-۷ $G_s = 2.7$ $\gamma = 20.1\ kN/m^3$ $\omega = 18.6\%$

الف) $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{20.1}{1+0.186} = 16.95\ kN/m^3$

ب) $\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} \Rightarrow 16.95 = \frac{2.7 \times 9.81}{1+e} \Rightarrow e = 0.56$

پ) $n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.56}{1+0.56} = 0.36$

ت) $e.S_r = \omega.G_s \Rightarrow 0.56 \times S_r = 0.186 \times 2.7 \Rightarrow S_r = 0.897 = 89.7\%$

www.PnuEB.com

۸-۲ $G_s = 2.74 \qquad \gamma = 20.6\ kN/m^3 \qquad \omega = 16.6\%$

الف) $\gamma_d = \dfrac{20.6}{1+0.166} = 17.67\ kN/m^3$

ب) $17.67 = \dfrac{2.74 \times 9.81}{1+e} \Rightarrow e = 0.52$

پ) $n = \dfrac{0.52}{1+0.52} = 0.34$

ت) $S_r = \left(\dfrac{0.166 \times 2.74}{0.52}\right) \times 100 = 87.5\%$

۹-۲ در مسئلهٔ ۲- ۶ وزن آبی را تعیین کنید که باید به یک متر مکعب خاک اضافه شود تا بصورت اشباع درآید (وزن آب بر حسب کیلو نیوتن).

وزن آبی که باید اضافه شود $= \gamma_{sat} - \gamma$

(به یک متر مکعب خاک؛ منظور اینست که وزن مخصوص برابر با وزن است)

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w$$

$$= \frac{2.67 + 0.65}{1+0.65} \times 9.81 = 19.74\ kN/m^3$$

$\Rightarrow$ وزن آبی که باید افزوده شود $= 19.74 - 17.6 = 2.14\ kN/m^3$

۱۰-۲ مسئلهٔ ۲- ۹ را برای مسئلهٔ ۲- ۷ حل کنید.

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w$$

$$= \frac{2.7 + 0.56}{1+0.56} \times 9.81 = 20.5\ kN/m^3$$

وزن آبی که باید اضافه شود $= \gamma_{sat} - \gamma = 20.5 - 20.1 = 0.4\ kN/m^3$

۱۱-۲ مسئلهٔ ۲- ۹ را برای مسئلهٔ ۲- ۸ حل کنید.

$$\gamma_{sat} = \frac{2.74 + 0.52}{1+0.52} \times 9.81 = 21.04\ kN/m^3$$

وزن آبی که باید اضافه شود $= 21.04 - 20.6 = 0.44\ kN/m^3$

۱۲-۲ وزن مرطوب 2832 سانتیمتر مکعب خاک 54.34 نیوتن است. اگر میزان رطوبت 12 درصد و چگالی دانه‌ها 2.72 باشد، مطلوبست:

(الف) وزن مخصوص مرطوب (γ) بر حسب کیلو نیوتن بر متر مکعب

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{54.34 \times 10^{-3}(kN)}{2832 \times 10^{-6}(m^3)} = 19.2\ kN/m^3$$

www.*PnEB.*com

(ب) وزن مخصوص خشک (γ_d) بر حسب کیلو نیوتن بر متر مکعب

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{19.2}{1+0.12} = 17.14\ {}^{kN}/_{m^3}$$

(پ) نسبت تخلخل (e)

$$\gamma_d = \frac{G_s}{1+e}\gamma_w \Rightarrow 17.14 = \frac{2.72}{1+e} \times 9.81 \Rightarrow e = 0.56$$

(ت) پوکی (n)

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.56}{1+0.56} = 0.36$$

(ث) درجهٔ اشباع (S)

$$\omega \times G_s = e \times S_r \Rightarrow 0.12 \times 2.72 = 0.56 \times S_r \Rightarrow S_r = 0.583$$

بر حسب درصد $S_r = 58.3\%$

(ج) حجم اشغال شده توسط آب (V_w)

$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \Rightarrow$ وزن دانه‌ها (قسمت جامد) $W_s = 17.14 \times 2832 \times 10^{-6} = 0.048kN$

وزن آب $W_w = W_{کل} - W_s = 54.34 \times 10^{-3} - 0.048 = 6.34 \times 10^{-3} kN$ $\Rightarrow$ می‌دانیم هوا وزنی ندارد

$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \Rightarrow$ حجم اشغال شده توسط آب $V_w = \frac{6.34 \times 10^{-3}}{9.81} = 6.463 \times 10^{-4} m^3 = 646.3m^3$

۲-۱۳ و ۲-۱۴: مسئلهٔ ۲-۱۲ را با داده‌های زیر تکرار کنید.

۱۳-۲

$\mathbf{V = 1.2m^3}$ $\mathbf{W = 23.04kN}$ $\mathbf{\omega = 8.6\%}$ $\mathbf{G_s = 2.71}$

الف) $\gamma = \frac{W}{V} = \frac{23.04}{1.2} = 19.2\ {}^{kN}/_{m^3}$

ب) $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{19.2}{1+0.086} = 17.68\ {}^{kN}/_{m^3}$

پ) $\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} \Rightarrow e = 0.504$

ت) $n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.504}{1+0.504} = 0.335$

ث) $S_r = \frac{\omega \times G_s}{e} = \frac{0.086 \times 2.71}{0.504} = 0.462 \xrightarrow{\text{برحسب درصد}} S_r = 46.2\%$

ج) $W_s = \gamma_d \times V = 17.68 \times 1.2 = 21.216kN$

$W_w = W - W_s = 23.04 - 21.216 = 1.824kN$

$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{1.824}{9.81} = 0.186m^3$

www.*PnuEB.*com

۲-۱۴ $V = 0.8m^3$ $W = 17.2kN$ $\omega = 9\%$ $G_s = 2.69$

الف) $\gamma = \frac{W}{V} = \frac{17.2}{0.8} = 21.5\,^{kN}/_{m^3}$

ب) $\gamma_d = \frac{21.5}{1+0.09} = 19.72\,^{kN}/_{m^3}$

پ) $19.72 = \frac{2.69\times 9.81}{1+e} \Rightarrow e = 0.34$

ت) $n = \frac{0.34}{1+0.34} = 0.25$

ث) $S_r = \frac{0.09\times 2.69}{0.34} = 0.712 \xrightarrow{\text{برحسب درصد}} S_r = 71.2\%$

ج) $W_s = 19.72\times 0.8 = 15.776kN$

$W_w = 17.2 - 15.776 = 1.424kN$

$V_w = \frac{1.424}{9.81} = 0.145m^3$

۲-۱۵ جرم مخصوص ماسه‌ای با پوکی0.387 مساوی 1600 کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. مطلوبست تعیین چگالی دانه و نسبت تخلخل خاک.

$\rho = 1600\,^{kg}/_{m^3}$ و $n = 0.387$ $G_s = ?$ و $e = ?$

نسبت تخلخل $e = \frac{n}{1-n} = \frac{0.387}{1-0.387} = 0.63$

در صورت مسئله بایستی قید می‌شد «جرم مخصوص خشک ماسه‌ای.....» زیرا در غیر اینصورت معلومات مسئله ناقص است (به روابط (۲- ۱۵)، (۲- ۲۶)، (۲- ۲۷)، (۲- ۲۸) اگردقت کنید مشاهده می‌کنید برای تعیین G_s با مفروضات فوق به S_r و یا ω هم نیاز داریم) پس:

$\rho_d = 1600\,^{kg}/_{m^3}$

$\gamma_d = \rho_d \times g = 1600\times 9.81 = 15696\,^{N}/_{m^3} = 15.696\,^{kN}/_{m^3}$

$\gamma_d = \frac{G_s\cdot\gamma_w}{1+e} \Rightarrow G_s = \frac{15.696\times(1+0.63)}{9.81} = 2.608$

۲-۱۶ وزن مخصوص مرطوب خاکی مساوی 19.2 کیلونیوتن بر مترمکعب است. اگر چگالی دانه‌ها 2.69 و میزان رطوبت 9.8 درصد باشد، مطلوب است:

(الف) وزن مخصوص خشک (γ_d) بر حسب کیلونیوتن بر مترمکعب

$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{19.2}{1+0.098} = 17.48\,^{kN}/_{m^3}$

(ب) نسبت تخلخل(e)

$\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} \Rightarrow 17.48 = \frac{2.69\times 9.81}{1+e} \Rightarrow e = 0.51$

www.PnuEB.com

(پ) پوکی (n)

$$n=\frac{e}{1+e}=\frac{0.51}{1+0.51}=0.34$$

درجهٔ اشباع (S_r)

$$\omega\times G_s=e\times S_r \Rightarrow \qquad S_r=\frac{0.098\times 2.69}{0.51}=0.517$$

بر حسب درصد $\qquad S_r=51.7\%$

۲-۱۷ برای یک نمونهٔ خاک اشباع، میزان رطوبت 40 درصد و چگالی دانه‌ها 2.71 می‌باشد. مطلوب است تعیین وزن مخصوص خشک و مرطوب آن.

$\omega_{sat}=40\%$ و $G_s=2.71$ و $\gamma_{sat}=?$ و $\gamma_d=?$

در خاک اشباع آب تمام حفرات بین دانه‌ها را پوشانده است لذا منظور از وزن مخصوص مرطوب، همان وزن مخصوص اشباع است.

$$\gamma_{sat}=\frac{G_s+\omega_{sat}G_s}{1+\omega_{sat}G_s}\times\gamma_w$$

نکته: توصیه می‌شود برای ممانعت از حفظ فرمولهای گسترده مربوط به γ، γ_d، γ_{sat} که در جدول ۲-۱کتاب نیز آورده شده است تنها فرمولِ کلیِ زیر را به خاطر بسپارید.

$$\gamma=\frac{G_s+eS_r}{1+e}\times\gamma_w$$

آنگاه برای γ_d می‌دانیم $S_r=0 \Leftarrow \gamma_d=\frac{G_s\gamma_w}{1+e}$ و در حالت اشباع می‌دانیم

$$\gamma_{sat}=\frac{G_s+e}{1+e}\times\gamma_w \Leftarrow S_r=1$$

و در مواقعی که e جزء معلومات مسئله نیست، $\frac{\omega G_s}{S_r}$ را جایگزین می‌کنیم.

$$\gamma_{sat}=\frac{2.7+0.4\times 2.71}{1+0.4\times 2.71}\times 9.81=17.85\,{}^{kN}/_{m^3}$$

$$\gamma_d=\frac{\gamma}{1+\omega}=\frac{17.85}{1+0.4}=12.75\,{}^{kN}/_{m^3}$$

۲-۱۸ جرم یک نمونه خاک مرطوب 465 گرم و جرم خشک شده در کورهٔ آن 405.76 گرم است. اگر چگالی دانه‌ها 2.68 و نسبت تخلخل در وضعیت طبیعی 0.83 باشد، مطلوبست:

(الف) جرم مخصوص مرطوب خاک در وضعیت طبیعی.

$m=465gr$ $\qquad m_s=405.76\,gr$ $\qquad G_s=2.68$ $\qquad e=0.83$ $\qquad \rho_t=?$

www.PnuEB.com

جرم آب موجود در خاک $m_w = m - m_s = 465 - 405.76 = 59.24\,gr$

میزان رطوبت $\omega = \frac{m_w}{m_s} = \frac{59.24}{405.76} = 0.146$

$$\rho_t = \frac{G_s + \omega G_s}{1+e} \times \rho_w = \frac{2.68 + 0.146 \times 2.68}{1+0.83} \times 1 = 1.68\,{}^{gr}/_{cm^3}$$

(ب) جرم مخصوص خشک خاک در وضعیت طبیعی.

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1+\omega} = \frac{1.68}{1+0.146} = 1.46\,{}^{gr}/_{cm^3}$$

(پ) جرم آبی که باید به خاک طبیعی اضافه شود تا به حالت اشباع در آید.

$$\rho_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \times \rho_w = \frac{2.68 + 0.83}{1+0.83} \times 1 = 1.92\,{}^{gr}/_{cm^3}$$

$\rho_{sat} - \rho_t = 1.92 - 1.68 = 0.24\,{}^{gr}/_{cm^3}$ جرم آب لازم برای اشباع کردن 1سانتی‌متر مکعب خاک

حجم خاک در حالت طبیعی $V = \frac{m}{\rho_t} = \frac{465}{1.68} = 276.78 cm^3$

$0.24 \times 276.78 = 66.43 gr$ جرم آب لازم برای اضافه کردن به حجم واقعی خاک تا رسیدن به اشباع

۲-۱۹ وزن مخصوص خاکی 19.94 کیلونیوتن بر مترمکعب است. اگر چگالی دانه‌ها 2.67 و میزان رطوبت 12.6 درصد باشد، مطلوب است:

(الف) وزن مخصوص خشک

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{19.94}{1+0.126} = 17.71\,{}^{kN}/_{m^3}$$

(ب) نسبت تخلخل

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \Rightarrow 17.71 = \frac{2.67 \times 9.81}{1+e} \Rightarrow e = 0.48$$

(پ) پوکی

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.48}{1+0.48} = 0.32$$

(ت) وزن آب بر حسب کیلونیوتن بر مترمکعب که برای اشباع لازم است.

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \times \gamma_w = \frac{2.67 + 0.48}{1+0.48} \times 9.81 = 20.88\,{}^{kN}/_{m^3}$$

$\gamma_{sat} - \gamma = 20.88 - 19.94 = 0.94\,{}^{kN}/_{m^3}$ = وزن آب لازم برای رسیدن به اشباع در یک متر مکعب

۲-۲۰ وزن مخصوص اشباع خاکی مساوی 20.12 کیلونیوتن بر مترمکعب است. اگرچگالی دانه‌ها 2.74 باشد مطلوبست تعیین:

(الف) وزن مخصوص خشک

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \times \gamma_w$$

$$20.12 = \frac{2.74 + e}{1+e} \times 9.81 \Rightarrow 20.12e + 20.12 = 26.88 + 9.81e \Rightarrow e = 0.65$$

www.PnuFB.com

$$\gamma_d = \frac{G_s \times \gamma_w}{1+e} = \frac{2.74 \times 9.81}{1+0.65} = 16.29\ {}^{kN}/_{m^3}$$

(ب) نسبت تخلخل : در قسمت قبل حساب شد: $e = 0.65$

(پ) پوکی

$$\text{پوکی } n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.65}{1+0.65} = 0.39$$

(ت) میزان رطوبت

خاک اشباع می‌باشد $\Leftarrow$ $S_r = 1$

$$\omega_{sat} \times G_s = e \times S_r$$

$$2.74 \times \omega_{sat} = 0.65 \Rightarrow \omega_{sat} = 0.237 \xrightarrow{\text{بر حسب درصد}} \omega(\%) = 23.7\%$$

۲-۲۱ برای خاکی نسبت تخلخل 0.87 و میـــزان رطوبت 28 درصد و چگالی دانه‌ها 2.72 می‌باشد، مطلوبست:

(الف) وزن مخصوص مرطوب

$$\gamma_t = \frac{G_s + \omega G_s}{1+e} \times \gamma_w = \frac{2.72(1+0.28)}{1+0.87} \times 9.81 = 18.26\ {}^{kN}/_{m^3}$$

(ب) درجهٔ اشباع بر حسب درصد

$$\omega(\%) \times G_s = e \times S_r(\%) \Rightarrow S_r(\%) = \frac{28 \times 2.72}{0.87} = 87.5\%$$

۲-۲۲ برای یک خـــاک اشبـاع، وزن مخصـــوص خشک 15.29 کیلـونیوتن بر مترمکعب و میزان رطوبت 21 درصد می‌باشد، مطلوب است:

(الف) وزن مخصوص اشباع

میزان رطوبت خاک اشباع، همان ω_{sat} می‌باشد که مقدار آن معلومست پس می‌توان از رابطهٔ $\gamma_d = \frac{\gamma_{sat}}{1+\omega_{sat}}$ استفاده کرد.

$$\gamma_{sat} = 15.29\,(1 + 0.21) = 18.5\ {}^{kN}/_{m^3}$$

(ب) تخلخل

$$\text{خاک اشباع} \Rightarrow S_r = 1 \Rightarrow e = \omega_{sat} \times G_s = 0.21 \times G_s \qquad (I)$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = \frac{G_s \gamma_w}{1+0.21G_s}$$

$$15.29 = \frac{9.81G_s}{1+0.21G_s} \Rightarrow G_s = 2.317 \xrightarrow{\text{جایگذاری در (I)}} \text{نسبت تخلخل} \quad e = 0.486$$

$$\text{پوکی } n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.486}{1+0.486} = 0.327$$

www.* PnuEB.com

(پ) چگالی دانه‌ها

در قسمت قبل محاسبه شد $G_s = 2.317$

(ت) وزن مخصوص مرطوب وقتی که درجهٔ اشباع 50 درصد باشد.

$$\gamma_t = \frac{G_s + eS_r}{1+e} \times \gamma_w = \frac{2.317 + 0.486 \times 0.5}{1+0.486} \times 9.81 = 16.9\ {}^{kN}/_{m^3}$$

۲-۲۳ نشان دهید که برای هر خاکی رابطهٔ زیر برقرار است:

$$\gamma_{sat} = \gamma_w \left(\frac{e}{\omega}\right) \left[\frac{(1+\omega)}{(1+e)}\right]$$

این رابطه در مسئلهٔ (۲-۲) اثبات شده است.

۲-۲۴ حداکثر و حداقل نسبت تخلخل به ترتیب 0.8 و 0.41 است. نسبت تخلخل خاک مربوط به تراکم نسبی 48 درصد چقدر است؟

تراکم نسبی (relative density) : $D_r = \dfrac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$

$$0.48 = \frac{0.8 - e}{0.8 - 0.41} \quad \Rightarrow \quad e = 0.613$$

۲-۲۵ برای یک ماسه، حداکثر و حداقل نسبت تخلخل، که در آزمایشگاه بدست آمده، بترتیب مساوی 0.94 و 0.33 می‌باشند. مطلوب است تعیین وزن مخصوص مرطوب این ماسه که با تراکم نسبی 60درصد و میزان رطوبت 10درصد متراکم شده است. وزن مخصوص دانه‌ها 2.65 می‌باشد. همچنین حداکثر و حداقل ممکن وزن مخصوص خشک ماسه را محاسبه کنید.

چگالی دانه‌ها: $G_s = 2.65$ و $\gamma_t = ?$ و $\omega = 10\%$ و $D_r = 60\%$ و $e_{min} = 0.33$ و $e_{max} = 0.94$

- ابتدا بایستی نسبت تخلخل موجود در این تراکم نسبی (60%) را بدست آوریم:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e}$$

$$0.6 = \frac{0.94 - e}{0.94 - 0.33} \Rightarrow e = 0.574$$

$$\gamma_t = \frac{G_s + \omega G_s}{1+e} \times \gamma_w = \frac{2.65(1+0.1)}{1+0.574} \times 9.81 = 18.17\ {}^{kN}/_{m^3}$$

حداکثر و حداقل ممکن وزن مخصوص خشک ماسه به ترتیب به ازای e_{min} و e_{max} اتفاق می‌افتد:

$$\gamma_{d\,max} = \frac{G_s \gamma_w}{1+e_{min}} = \frac{2.65 \times 9.81}{1+0.33} = 19.55\ {}^{kN}/_{m^3}$$

$$\gamma_{d\,min} = \frac{G_s \gamma_w}{1+e_{max}} = \frac{2.65 \times 9.81}{1+0.94} = 13.4\ {}^{kN}/_{m^3}$$

www.PnuFB.com

۲-۲۶ از آزمایش حدود مایع (روانی) و خمیری خاکی اطلاعات زیر در دست است:

(الف) آزمایش حد مایع (روانی):

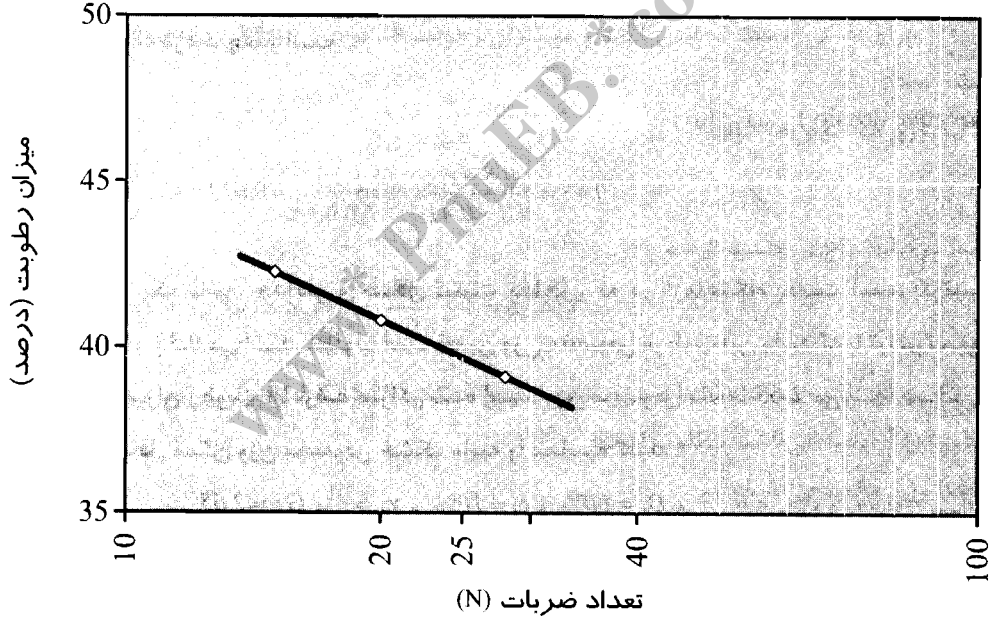
میزان رطوبت (درصد)	تعداد ضربات (N)
42	15
40.8	20
39.1	28

(ب) آزمایش حد خمیری:

میزان رطوبت مساوی 18.7درصد

(الف) منحنی جریان مربوط به آزمایش حد مایع را رسم نموده و حد مایع (روانی) را بدست آورید.

همانطور که می‌دانید منحنی جریانی منحنی‌ای است که محور قائم آن میزان رطوبت بر حسب درصد و محور افقی آن تعداد ضربات در مقیاس لگاریتمی است و حد مایع مربوط به 25 ضربه می‌باشد.



www.PnuEB.com

$LL = 39.7\%$: بازای $N = 25$

(ب) نشانهٔ خمیری خاک چقدر است؟

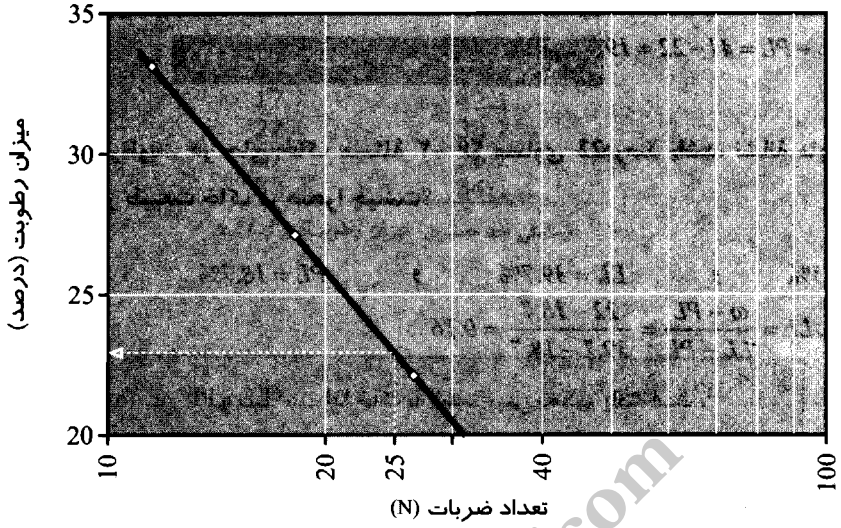
نشانهٔ خمیری $PI = LL - PL = 39.7 - 18.7 = 21$

۲-۲۷ مسئلهٔ ۲- ۲۶ را برای داده‌های زیر تکرار کنید.

میزان رطوبت (درصد)	تعداد ضربات (N)
33	13
27	18
22	29

حد خمیری = 16.5%

الف)



$\Rightarrow LL = 23.5\%$

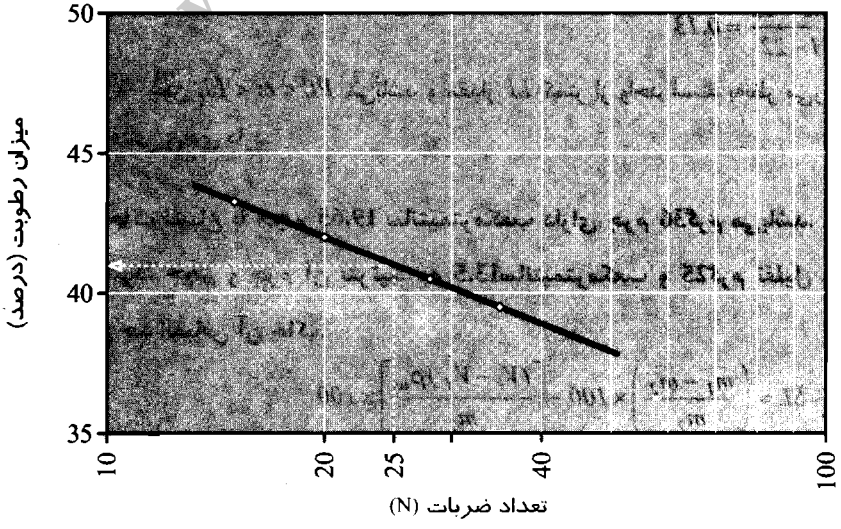
$PI = LL - PL = 23.5 - 16.5 = 7$

ب)

۲-۲۸ مسئلهٔ ۲- ۲۶ را با داده‌های زیر تکرار کنید.

میزان رطوبت (درصد)	تعداد ضربات (N)
43	15
42	20
40.5	28
39	35

حد خمیری = 22%



www.PNEB.com

الف) $LL = 41\%$

ب) $PI = LL - PL = 41 - 22 = 19$

۲-۲۹ اگر میزان رطوبت در جای خاک مسئلهٔ ۲- ۲۶ مساوی 22درصد باشد، نشانهٔ مایع چقدر است؟ حدس شما از طبیعت خاک در صحرا چیست؟

$\omega = 24.5\%$ و $LL = 39.7\%$ و $PL = 18.7\%$

نشانهٔ مایع $LI = \dfrac{\omega - PL}{LL - PL} = \dfrac{22 - 18.7}{39.7 - 18.7} = 0.16$

چون میزان رطوبت (ω) بین PL و LL است لذا خاک به شدت پیش تحکیم یافته است.

۲-۳۰ اگر میزان رطوبت در جای خاک مسئلهٔ ۲- ۲۷ مساوی 14.8درصد باشد، نشانهٔ مایع چقدر است. حدس شما از طبیعت خاک در صحرا چیست؟

$\omega = 14.8\%$ و $LL = 23.5\%$ و $PL = 16.5\%$

$LI = \dfrac{14.8 - 16.5}{23.5 - 16.5} = -0.24$

چون $LI < 1$ شده است، خاک پیش تحکیم یافته است.

۲-۳۱ اگر میزان رطوبت در جای خاک مسئلهٔ ۲- ۲۸ مساوی 24.5درصد باشد، نشانهٔ مایع چقدر است، حدس شما از طبیعت خاک در صحرا چیست؟

$\omega = 24.5\%$ و $LL = 41\%$ و $PL = 22\%$

$LI = \dfrac{24.5 - 22}{41 - 22} = 0.13$

همانند مسئلهٔ ۲- ۲۹- چون $PL < \omega < LL$ می‌باشد و مقدار LI کمتر از واحد است، به‌نظر می‌رسد خاک میزان پیش تحکیم یافتگی زیادی دارد.

۲-۳۲ یک نمونه خاک اشباع با حجم 19.65 سانتیمترمکعب دارای جرم 36گرم می‌باشد. وقتی که نمونه خشک می‌شود، حجم و جرم آن بترتیب به 13.5سانتیمترمکعب و 25گرم تقلیل می‌یابند. مطلوب است تعیین حد انقباض آن خاک.

حد انقباض $SL = \left(\dfrac{m_1 - m_2}{m_2}\right) \times 100 - \left[\dfrac{(V_i - V_f)\rho_w}{m_2}\right] \times 100$

$$\Rightarrow SL = \left(\frac{36 - 25}{25}\right) \times 100 - \left[\frac{(19.65 - 13.5) \times 1}{25}\right] \times 100$$

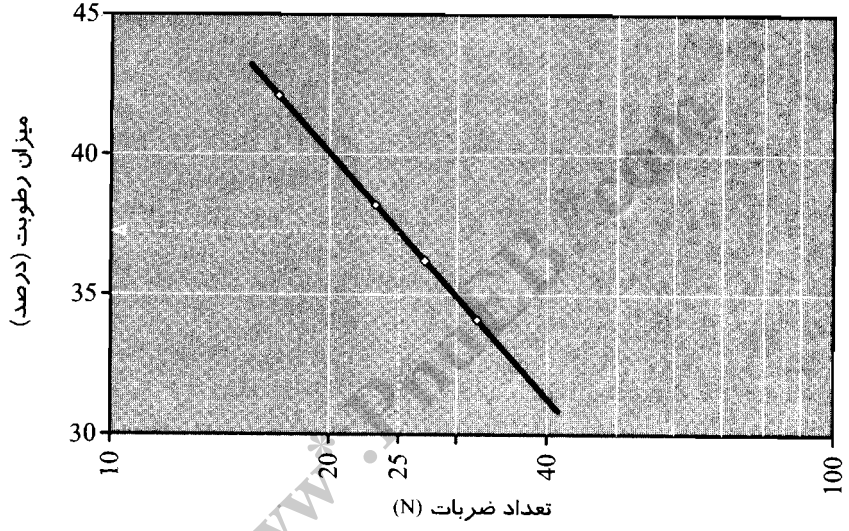
$SL = 19.4\%$

www.PnuEB.com

۲-۳۳ مسئلهٔ ۲- ۲۶ را با داده‌های زیر مجدداً حل کنید.

میزان رطوبت (درصد)	تعداد ضربات (N)
42.1	17
38.2	22
36.2	27
34.1	32

آزمایش حد خمیری، میزان رطوبت = $\%21.3$



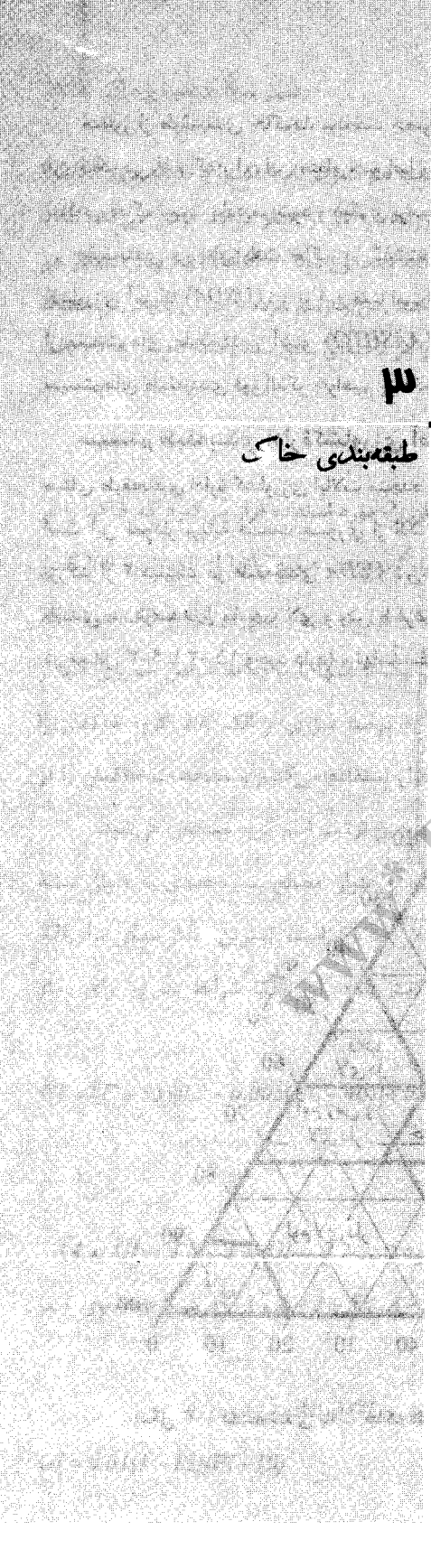
الف) $LL = 37\%$

ب) نشانهٔ خمیری $PI = LL - PL = 37 - 21.3 = 15.7$

www*.PnuEB*.com

فصل ۳

طبقه‌بندی خاک



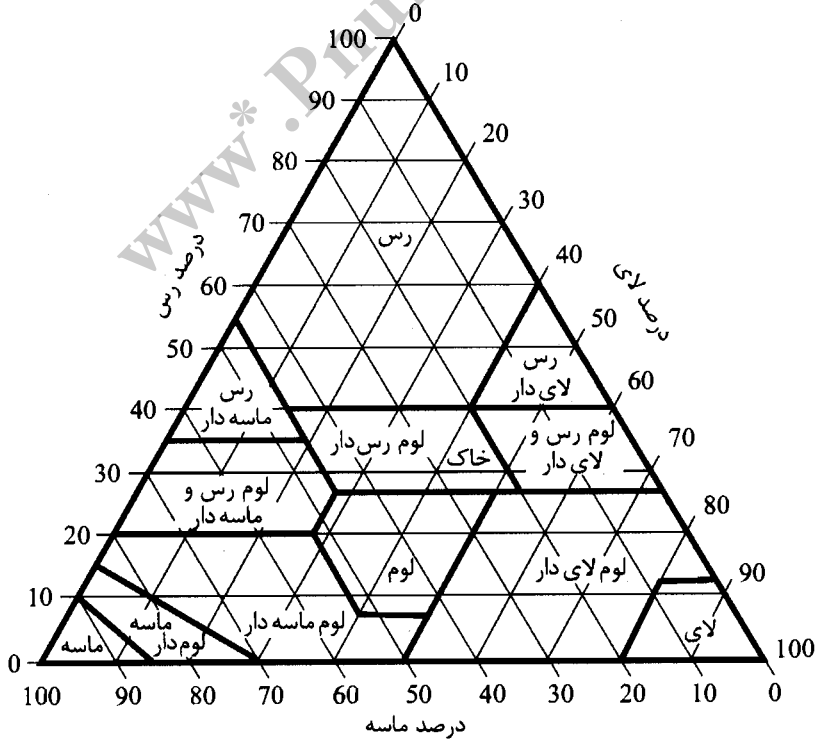
www.PnuEB.com

منظور از طبقه‌بندی خاک‌ها، شناخت خصوصیات و رفتار خاک‌ها از روی اسم و صفت نسبت داده شده به آن خاک می‌باشد که برای این منظور، دو اصل کلی، یکی برمبنای بافت خاک که از نقطه نظر عمومی به ظاهر سطحی خاک نسبت داده می‌شود و دیگری برمبنای استفاده از خاک، طبقه‌بندی صورت می‌گیرد.

طبقه‌بندی برمبنای بافت خاک، در گذشته زیاد مورد استفاده قرار می‌گرفت که طبقه‌بندی سیستم ادارهٔ کشاورزی آمریکا (*USDA*) نیز بر این مبنا استوار است. اما در مورد طبقه‌بندی خاک برحسب استفاده، می‌توان از سیستم‌های طبقه‌بندی آشتو (*AASHTO*) و متحد (*USCS*) یاد کرد که در ادامه، به خلاصه‌ای از سیستم‌های طبقه‌بندی فوق‌الذکر خواهیم پرداخت.

سیستم طبقه‌بندی ادارهٔ کشاورزی آمریکا (*USDA*)

مبنای طبقه‌بندی ادارهٔ کشاورزی ایالات متحده *(USDA)* نموداری شبیه شکل ۳-۱ کتاب می‌باشد. لازم به ذکر است این نمودار برپایهٔ قسمت عبوری از الک نمرهٔ *10* (قطر*2mm*) قرار دارد (که طبق جدول ۱-۳ ذرات بزرگتر از ۲ میلیمتر در طبقه‌بندی *USDA* شن می‌باشند). پس اگر در دانه‌بندی خاکی؛ درصدِ شن وجود داشت بایستی در درصدهای ماسه و لای و رس با فرض مقدار صفر درصد شن، اصلاحاتی صورت بگیرد (که این نکته در مسائل ۳-۹ تا ۳- ۱۵ وجود دارد) و نهایتاً صفتِ شن‌دار در طبقه‌بندی خاک به‌انتهای نام آن اضافه شود.



شکل ۳-۱ طبقه بندی بافت خاک طبق طبقه بندی اداره کشاورزی ایالت متحده (USDA)

www.*PayEB*.com

همانطور که می‌دانید با داشتن دو تا از درصدهای رس، لای و ماسه هم قادریم نام خاک را با طبقه‌بندی *USDA* تشخیص دهیم، زیرا همانطور که قبلاً هم گفته شد، این روش مقدار شن را صفر درصد فرض می‌کند لذا با داشتن درصد عبوری مربوط به دو تا، سومی هم بدست خواهد آمد (مجموع دوتا -100%) و از روی نمودار هم کافیست از درصد رس استفاده کرده و خطی افقی متناظر با درصد رس را رسم کرده و سپس با یکی از خطوط درصد مربوط به ماسه و یا لای قطع دهیم. نقطهٔ بدست آمده در هر ناحیه‌ای واقع شده باشد، نام آنرا به نام بافت خاک نسبت می‌دهیم.

سیستم طبقه‌بندی آشتو(*AASHTO*)

طبقه‌بندی آشتو: این طبقه‌بندی خاکها بیشتر توسط مهندسان راه مورد استفاده قرار می‌گیرد که خاکها را در دو گروه اصلی یعنی خاکهای دانه‌ای ($A-1$، $A-2$ و $A-3$) که درصد عبوری آنها از الک نمرهٔ *200* کمتر از *35* درصد است و گروه لای و رس ($A-4$، $A-5$، $A-6$ و $A-7$) که درصد عبوری آنها از الک نمرهٔ *200* بیشتر از *35* درصد است، تقسیم‌بندی می‌کند که تشخیص هر یک از اینها با توجه به خواص خمیری آنها از جدول ۳-۱ صورت می‌پذیرد به این ترتیب که ابتدا با توجه به درصد عبوری از الک *200* گروه خاکمان را تشخیص داده و بر طبق آن از قسمت بالایی و پائینی این جدول استفاده می‌کنیم و مشخصات خاکمان را **از چپ** به **راست** با مشخصات موجود در جدول مطابقت می‌دهیم، بدین ترتیب اسم گروه مشخص می‌شود.

اما از طرفی در این روش، برای داشتن تخمینی از کیفیت خاک به عنوان مصالح بستر، عددی به عنوان نشانهٔ گروه (*GI*) در داخل پرانتز بعد از اسم گروه آورده می‌شود، که لازم به ذکر است کمترین مقدار ممکن برای*GI* صفر بوده ولی کران بالایی ندارد و هر چقدر که *GI* خاکی کمتر باشد، آن خاک شرایط بهتری برای بستر (زیرسازی) دارد.

$$GI = (F-35)[0.2+0.005(LL-40)]+0.01(F-15)(PI-10)$$

که نکاتی در رابطه با این فرمول به قرار زیر وجود دارد:

۱) اگرGI مقداری منفی بدست آمد آنرا صفر منظور می‌کنیم.

۲) GI بدست آمده از رابطه، به نزدیکترین عدد کامل گرد می‌شود (مثلاً $GI = 3.2$ به *3* و $GI = 3.5$ به *4*).

۳) GI مربوط به گروههای $A-1-a$ ، $A-1-b$ ، $A-2-4$ ، $A-2-5$ و $A-3$ همواره مساوی صفر است.

۴) برای گروههای $A-2-6$ و $A-2-7$ از رابطهٔ زیر برای تعیین *GI* استفاده می‌شود:

$$GI = 0.01(F-15)(PI-10)$$

www.PnuEB.com

جدول ۳-۱ طبقه‌بندی مصالح بستر راهها طبق طبقه‌بندی آشتو

طبقه‌بندی عمومی	مصالح دانه‌ای (درصد عبوری از الک ۲۰۰ مساوی ۳۵درصد و یا کمتر)						
طبقه‌بندی گروهی	A – 1			A – 2			
	A – 1 – a	A – 1 – b	A – 3	A – 2 – 4	A – 2 – 5	A – 2 – 6	A – 2 – 7
آزمایش دانه‌بندی (درصد عبوری)							
No.10 (الک نمره ۱۰)	50 max.						
No.40 (الک نمره ۴۰)	30 max.	50 max.	51 min.				
No.200 (الک نمره ۲۰۰)	15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.
مشخصات قسمت عبوری از الک ۴۰							
حد مایع				40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
نشانهٔ خمیری	6 max.		NP	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
نوع مصالح تشکیل دهنده	ماسه و شن با قلوه سنگ		ماسهٔ ریز	ماسه و شن رس‌دار و یا لای‌دار			
مناسب‌بودن به عنوان مصالح بستر	عالی تا خوب						

طبقه‌بندی عمومی	مصالح رس – لای (درصد عبوری از الک ۲۰۰ بزرگتر از ۳۵ درصد)			
طبقه‌بندی گروهی	A-4	A-5	A-6	A - 7 A - 7 - 5* A - 7 - 6+
آزمایش دانه‌بندی (درصد عبوری)				
No.10 (الک نمره ۱۰)				
No.40 (الک نمره ۴۰)				
No.200 (الک نمره ۲۰۰)	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
مشخصات قسمت عبوری از الک ۴۰				
حد مایع	40 max.	42 min.	40 max.	41 min.
نشانهٔ خمیری	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
نوع مصالح تشکیل دهنده	خاک‌های لای‌دار		خاک‌های رس‌دار	
مناسب‌بودن به‌عنوان مصالح بستر	متوسط تا بد			

* *For* $A-7-5, PI \le LL-30$

\+ *For* $A-7-6, PI > LL-30$

www.*PnuEB.*com

در حالت عمومی، کیفیت عملکرد یک خاک به عنوان مصالح بستر، تناسب معکوس با نشانهٔ گروه (GI) دارد، یعنی هر چقدر GI خاکی کمتر باشد آن خاک برای مصالح بستر مناسبتر می‌باشد و بالعکس.

سیستم طبقه‌بندی یونیفاید یا متحد (*USCS*)

این روش طبقه‌بندی خاکها بیشترین کاربرد را بخصوص برای مهندسین ژئوتکنیک داراست و مطابق گامهای زیر می‌توان خاک را به راحتی طبقه‌بندی کرده و علامت و نام گروه آن را تشخیص داد.

کلیاتی در مورد سیستم طبقه‌بندی متحد (یونیفاید):

۱- درصد عبوری از الک نمرهٔ ۲۰۰ (۰/۰۷۵ میلیمتر) را بدست آورد. و با F نشان می‌دهیم اگر $F > 50\%$ خاک ریزدانه بوده (یعنی حرف اول آن C یا M یا O می‌باشد) و اگر $F > 50\%$ آنگاه خاک درشت دانه می‌باشد و حرف اول نام آن G یا S خواهد بود.

۲- اگر خاک درشت دانه باشد بایستی درصد عبوری از الک نمرهٔ ۴ (۴/۷۵ میلیمتر) و مانده بر روی الک۲۰۰ را نشان می‌دهیم. اگر $F_1 < \frac{(100-F)}{2}$ باشد، خاک شنی است و برای تعیین علامت گروه شکل ۳-۳ کتاب مراجعه می‌نمائیم. و اما اگر $F_1 \geq \frac{(100-F)}{2}$ باشد خاک ماسه‌ای است و ین علامت گروه به جدول ۳-۳ و شـــکل۳-۳ کتاب مراجعه می‌کنیم.

خاک ریزدانه باشد $(F < 50\%)$ برای تعیین علامت گروه به جدول ۳ - ۴ و شکل ۳ - ۳ مراجعه می‌نمائیم.

جدول ۳-۲ سیستم طبقه‌بندی متحد-علائم گروه برای خاک های شنی

معیار	علامت گروه
عبوری از الک نمره ۲۰۰ کوچکتر از ۵درصد، C_u بزرگتر یا مساوی ۴ و C_c بین ۱ و ۳	GW
عبوری از الک نمره ۲۰۰ کوچکتر از ۵درصد، و هیچکدام از دو شرط GW برآورده نمی‌شود	GP
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ است. حدود اتربرگ زیر خط A قرار می‌گیرد (شکل ۳-۳) یا نشانهٔ خمیری کمتر از ۴ است.	GM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ است. حدود اتربرگ بالای خط A است (شکل ۳-۳) و نشانهٔ خمیری بزرگتر از ۷ است.	GC
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ است. حدود اتربرگ در ناحیهٔ سایه‌خوردهٔ شکل ۳-۳ قرار می‌گیرد (ناحیهٔ CL-ML)	GC-GM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای GW و GM برآورده می‌شود.	GW-GM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای GW و GC برآورده می‌شود.	GW-GC
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای GP و GM برآورده می‌شود.	GP-GM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای GP و GC برآورده می‌شود.	GP-GC

www.PnuFB.com

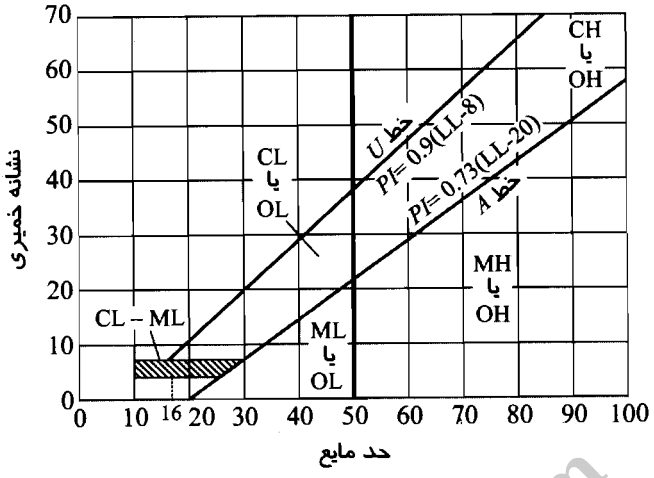
جدول ۳-۳ سیستم طبقه‌بندی متحد-علامت گروه برای خاکهای ماسه‌ای

معیار	علامت گروه
عبوری از الک نمره ۲۰۰ کوچکتر از ۵درصد، C_u بزرگتر یا مساوی ۶ و C_c بین ۱ و ۳	SW
عبوری از الک نمره ۲۰۰ کوچکتر از ۵درصد، و هیچکدام از دو شرط SW برآورده نمی‌شود	SP
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ است. حدود اتربرگ زیر خط A قرار می‌گیرد (شکل ۳-۳) یا نشانهٔ خمیری کمتر از ۴ است.	SM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ است. حدود اتربرگ بالای خط A است (شکل ۳-۳) و نشانهٔ خمیری بزرگتر از ۷ است.	SC
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ است. حدود اتربرگ در ناحیهٔ سایه‌خوردهٔ شکل ۳-۳ قرار می‌گیرد (ناحیهٔ CL-ML)	SC-SM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای SW و SM برآورده می‌شود.	SW-SM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای SW و SC برآورده می‌شود.	SW-SC
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای SP و SM برآورده می‌شود.	SP-SM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای SP و SC برآورده می‌شود.	SP-SC

جدول ۳-۴ سیستم طبقه‌بندی متحد-علامت گروه برای خاک های رسی و لای

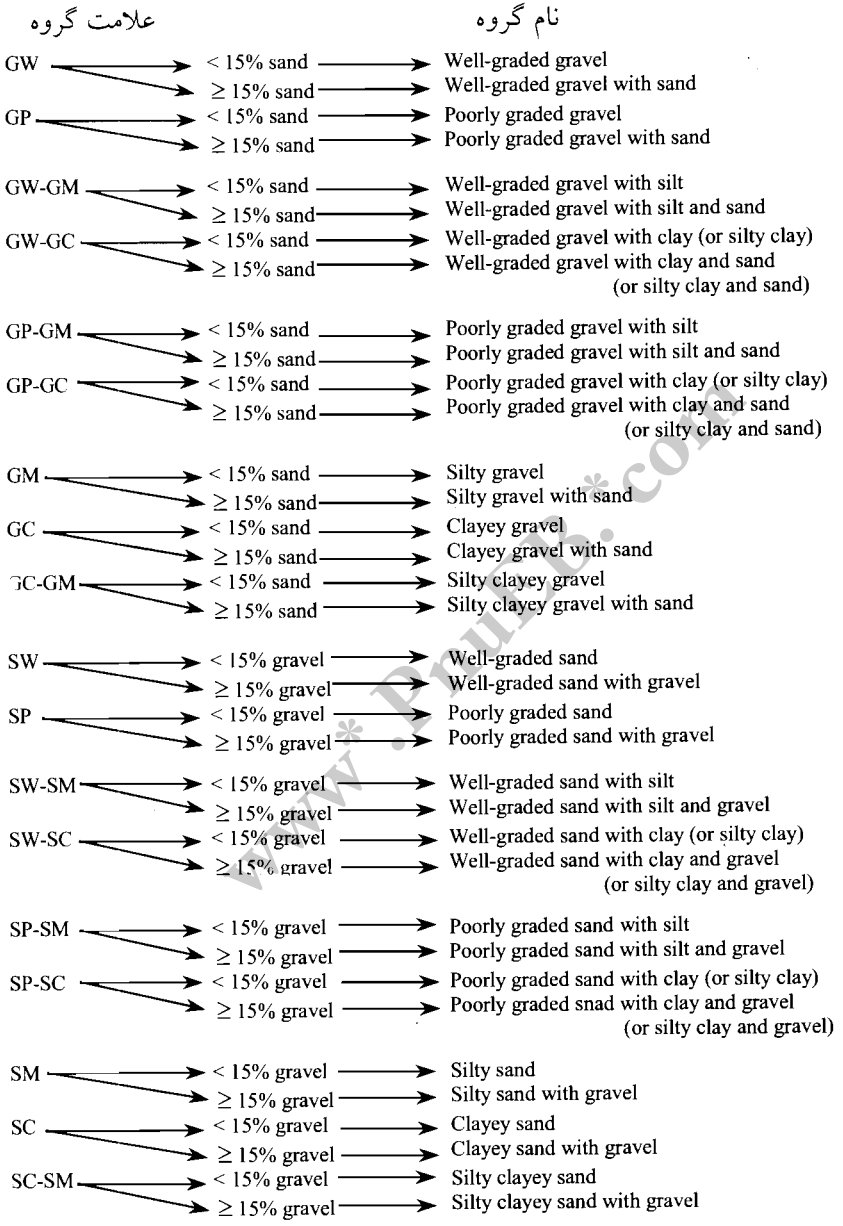
معیار	علامت گروه
غیرآلی، LL<50 و PI>7 و منطبق یا بالای خط A (به ناحیهٔ CL در شکل ۳-۳ توجه شود)	CL
غیرآلی، LL<50 و PI<4 و زیر خط A (به ناحیهٔ ML در شکل ۳-۳ توجه شود)	ML
آلی، 0.75> (LL خشک نشده) / (LL خشک شده) و LL<50 (به ناحیهٔ OL در شکل ۳-۳ توجه شود.)	OL
غیرآلی، LL ≥ 50 و PI منطبق و یا بالای خط A (به ناحیهٔ CH در شکل ۳-۳ توجه شود.)	CH
غیرآلی، LL ≥ 50 و PI زیر خط A (به ناحیهٔ MH در شکل ۳-۳ توجه شود.)	MH
آلی، 0.75> (LL خشک نشده)/ (LL خشک شده) و LL ≥ 50 (به ناحیهٔ OH در شکل ۳-۳ توجه شود.)	OH
غیرآلی، در ناحیهٔ هاشور خورده در شکل ۳-۳	CL-ML
تورب، ماک، و یا سایر خاکهای آلی	Pt

www.PnuEB.com



بعد از اینکه علامت گـــروه را تعیین کردیم، برای تعیین نام گروه بر حسب نوع خاکمان به اشکال ۳- ۴ ، ۳- ۵، و یا ۳- ۶ مراجعه می‌نمائیم.

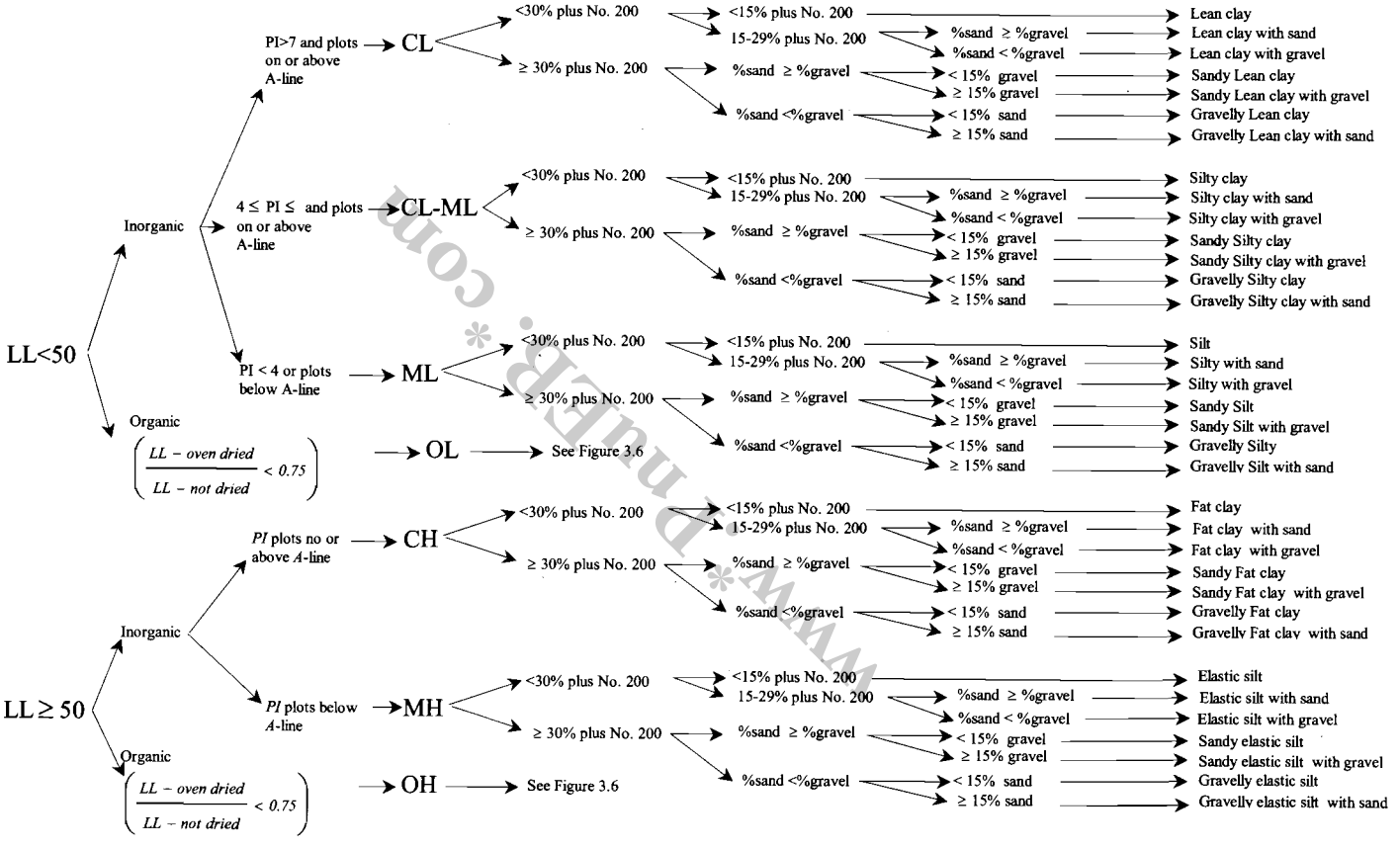
www.PnuEB.com



Gravel = شن	Sand = ماسه	Well graded = دانه‌بندی خوب
Poorly graded= دانه‌بندی بد	Silt= لای	Clay =رس
Organic= آلی	Inorganic= غیرآلی	Lean clay=رس لاغر
Fat clay=رس چاق	Silty sand=ماسه لای‌دار	Clayey sand=ماسه رس‌دار
Silty gravel=شن لای‌دار	Clayey gravel=شن رس‌دار	

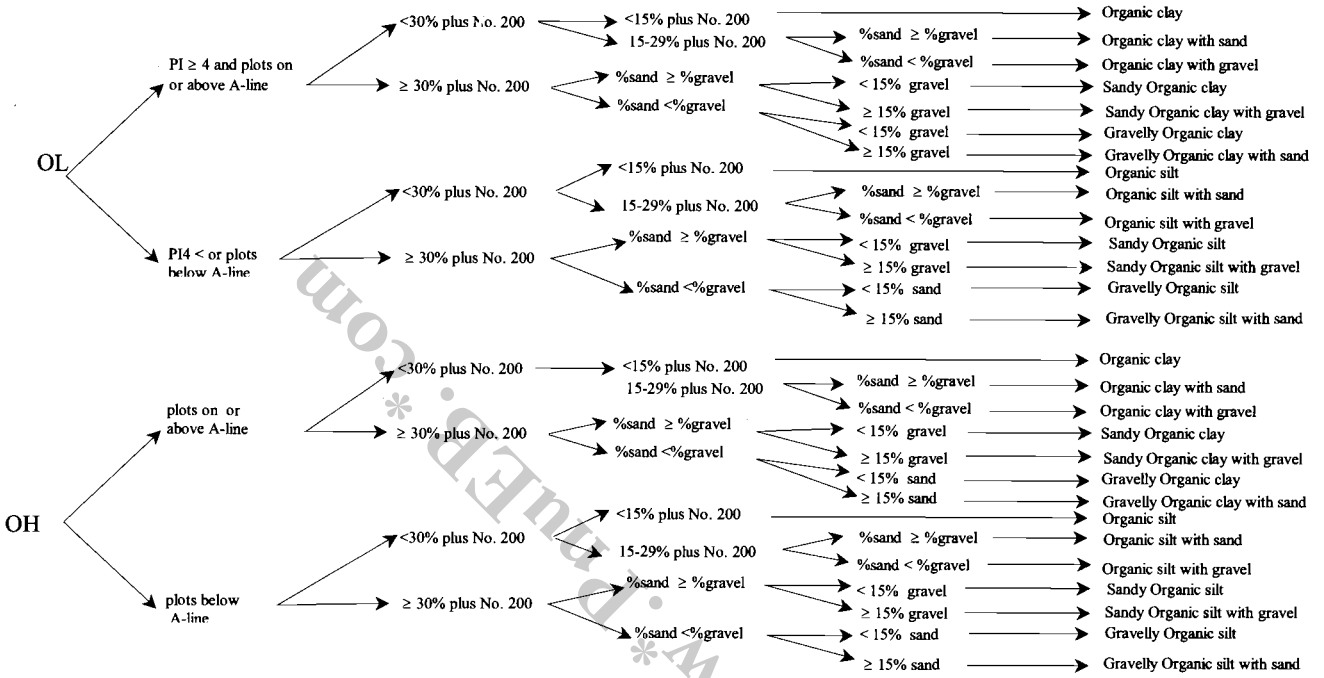
شکل ۳-۴ نمودار تعیین علامت و نام گروه برای خاک‌های شنی و ماسه‌ای

www.PnuTab.com



شکل ۳- ۵ نمودار تغییر علامت و نام گروه برای خاک‌های رسی و لای غیرآلی

www.DuneB.com



gravel = شن
poorly graded = دانه‌بندی بد
organci = آلی
fat clay = رس چاق
silty gravel = شن لای‌دار

sand = ماسه
silt = لای
inorganic = غیرآلی
silty snad = ماسهٔ لای‌دار
clayey gravel = شن رس‌دار

well graded = دانه‌بندی خوب
clay = رس
lean clay = رس لاغر
clayey sand = ماسهٔ رس‌دار

شکل ۳- ۶ نمودار تعیین علامت و نام گروه خاکهای رسی و لای آلی

www.pnupp.com

۳-۱ تا ۳-۲۰ خاکهای زیر را طبق طبقه‌بندی بافت ادارهٔ کشاورزی ایالات متحده طبقه‌بندی نمائید:

شماره مسئله	شن	ماسه	لای	رس	طبقه‌بندی بر مبنای USDA
۳-۱	0	30	30	40	لوم رس دار تا رس
۳-۲	0	20	70	10	لوم لای دار
۳-۳	0	10	80	10	لای تا لوم لای دار
۳-۴	0	5	60	35	لوم رس و لای دار
۳-۵	0	25	65	10	لوم لای دار
۳-۶	0	8	32	60	رس
۳-۷	0	5	16	79	رس
۳-۸	0	5	7	68	رس
۳-۹	15	20	35	30	- طبق جدول زیر -
۳-۱۰	20	40	22	18	- طبق جدول زیر -
۳-۱۱	14	50	20	16	- طبق جدول زیر -
۳-۱۲	24	30	30	16	- طبق جدول زیر -
۳-۱۳	18	52	22	8	- طبق جدول زیر -
۳-۱۴	14	65	15	6	- طبق جدول زیر -
۳-۱۵	15	32	25	28	- طبق جدول زیر -
۳-۱۶	0	48	40	12	لوم
۳-۱۷	0	35	40	25	لوم
۳-۱۸	0	20	38	42	رس
۳-۱۹	0	15	62	23	لوم لای دار
۳-۲۰	0	16	37	47	رس

شماره مسئله	درصد ماسه اصلاح‌شده $\frac{\text{ماسه}\ (\%)}{100 - \text{رس}\ (\%)} \times 100$	درصد لای اصلاح شده $\frac{\text{لای}\ (\%)}{100 - \text{رس}\ (\%)} \times 100$	درصد رس اصلاح شده $\frac{\text{رس}\ (\%)}{100 - \text{شن}\ (\%)} \times 100$	طبقه‌بندی بر مبنای USDA
۳-۹	$\frac{20}{85} \times 100 = 23.5$	$\frac{35}{85} \times 100 = 41.2$	$\frac{30}{85} \times 100 = 35.3$	لوم رس‌دار و شن‌دار
۳-۱۰	$\frac{40}{80} \times 100 = 50$	$\frac{22}{80} \times 100 = 27.5$	$\frac{18}{80} \times 100 = 22.5$	لوم رس و ماسه‌دار و شن‌دار
۳-۱۱	$\frac{56}{86} \times 100 = 58.1$	$\frac{20}{86} \times 100 = 23.3$	$\frac{16}{86} \times 100 = 18.6$	لوم ماسه‌دار و شن‌دار
۳-۱۲	$\frac{30}{76} \times 100 = 39.5$	$\frac{30}{76} \times 100 = 39.5$	$\frac{16}{76} \times 100 = 21$	لوم شن‌دار
۳-۱۳	$\frac{52}{82} \times 100 = 63.4$	$\frac{22}{82} \times 100 = 26.8$	$\frac{8}{82} \times 100 = 9.8$	لوم ماسه‌دار و شن‌دار
۳-۱۴	$\frac{65}{86} \times 100 = 75.6$	$\frac{15}{86} \times 100 = 17.4$	$\frac{6}{86} \times 100 = 7$	ماسهٔ لوم‌دار و شن‌دار
۳-۱۵	$\frac{32}{85} \times 100 = 37.6$	$\frac{15}{85} \times 100 = 29.4$	$\frac{28}{85} \times 100 = 33$	لوم رس‌دار و شن‌دار

www.PnuEB.com

۳-۲۱ تا ۳-۴۰ خاکهای زیر را طبق طبقه‌بندی آشتو طبقه‌بندی نمائید.

درصد ریزتر

شمارهٔ مسئله	نمره ۱۰	نمره ۴۰	نمره ۲۰۰	حد مایع	حد خمیری	نشانهٔ خمیری
۳-۲۱	100	82	38	42	23	19
۳-۲۲	100	71	46	32	18	14
۳-۲۳	92	81	51	29	16	13
۳-۲۴	100	58	32	32	14	18
۳-۲۵	95	69	30	42	24	18
۳-۲۶	90	70	34	38	30	8
۳-۲۷	48	29	8	-	2	-
۳-۲۸	61	44	22	-	NP	NP
۳-۲۹	81	57	9	-	NP	NP
۳-۳۰	100	80	64	47	29	18
۳-۳۱	100	92	55	39	21	18
۳-۳۲	100	72	48	32	23	9
۳-۳۳	94	85	52	43	34	
۳-۳۴	40	23	12	-	NP	NP
۳-۳۵	88	72	46	36	24	12
۳-۳۶	72	61	33	36	22	14
۳-۳۷	100	92	78	61	26	35
۳-۳۸	100	84	71	55	21	34
۳-۳۹	100	78	8	-	NP	NP
۳-۴۰	100	87	68	34	25	9

توضیح: حروف *NP* در ستون حد خمیری برخی مسائل مخفف *Nonplastic* (غیر پلاستیک) می‌باشد.

شمارهٔ مسئله	طبقه‌بندی با سیستم آشتو	توضیحات تکمیلی
۳-۲۱	$A-7-6(3)$	$GI=(38-35)[0.2+0.005(42-40)]+0.01(38-15)(19-10)$ $=2.7\simeq 3$
۳-۲۲	$A-6(3)$	$GI=3$
۳-۲۳	$A-6(3)$	$GI=3.4\simeq 3$
۳-۲۴	$A-2-6(1)$	$GI=0.01(32-15)(18-10)=1.36\simeq 1$
۳-۲۵	$A-2-7(1)$	$GI=0.01(30-15)(18-10)=1.2\simeq 1$
۳-۲۶	$A-2-4(0)$	طبق نکتهٔ ۳ مربوط به GI
۳-۲۷	$A-1-a-(0)$	طبق نکتهٔ ۳ مربوط به GI

www.PnEB.com

شمارهٔ مسئله	طبقه‌بندی با سیستم آشتو	توضیحات تکمیلی
۳-۲۸	$A-1-b(0)$	طبق نکتهٔ ۳ مربوط به GI
۳-۲۹	$A-3(0)$	طبق نکتهٔ ۳ مربوط به GI
۳-۳۰	$A-7-6(11)$	$GI=10.735\simeq 11$ $PI(=18)>LL(=47)-30\Rightarrow A-7-6$
۳-۳۱	$A-6(7)$	$GI=7.1\simeq 7$
۳-۳۲	$A-4(2)$	$GI=1.72\simeq 2$
۳-۳۳	$A-5(3)$	$GI=3.285\simeq 3$
۳-۳۴	$A-1-a(0)$	طبق نکتهٔ ۳ مربوط GI
۳-۳۵	$A-6(3)$	$GI=2.6\simeq 3$
۳-۳۶	$A-2-6(1)$	$GI=0.01(33-15)(14-10)=0.72\simeq 1$
۳-۳۷	$A-7-6(29)$	$GI=28.865\simeq 29$ $\quad 35>61-30\Rightarrow A-7-6$
۳-۳۸	$A-7-6(23)$	$GI=23.34\simeq 23$ $\quad 34>55-30\Rightarrow A-7-6$
۳-۳۹	$A-3(0)$	$GI=0$ طبق نکتهٔ ۳
۳-۴۰	$A-4(5)$	$GI=5.08\simeq 5$

از میان خاکهای داده شدهٔ فوق، خاکی با مشخصات داده شده در مسئلهٔ ۳-۳۷ برای بستر از همه نامناسبتر است زیرا GI بزرگتری نسبت به سایرین دارد.

۳-۴۱ تا ۳-۴۵ خاکهای زیر را طبق سیستم متحد طبقه‌بندی نمائید. علامت و نام گروه را بنویسید.

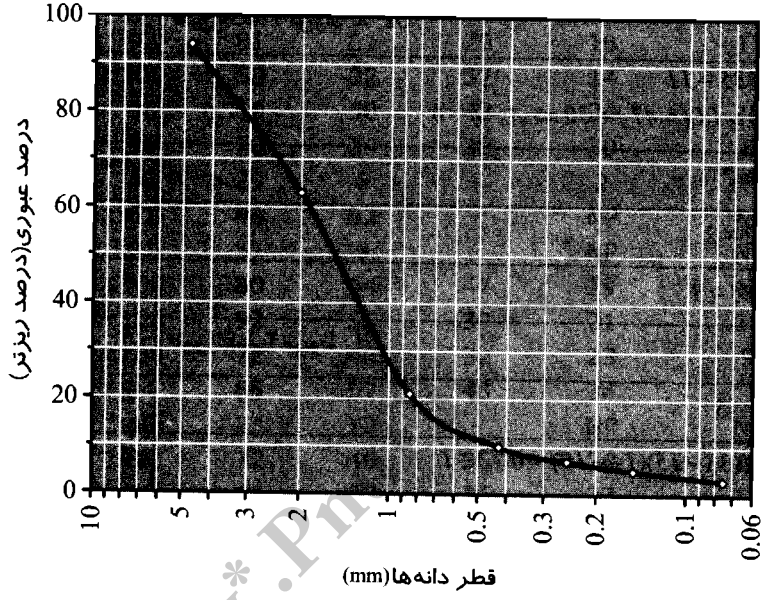
شمارهٔ مسئله	درصد عبوری NO. 4	NO. 10	NO. 20	NO. 40	NO. 60	NO. 100	NO. 200	حد مایع	نشانهٔ خمیری
۳-۴۱	94	63	21	10	7	5	3		NP
۳-۴۲	98	86	50	28	18	14	10		NP
۳-۴۳	100	100	98	93	88	83	77	63	25
۳-۴۴	100	100	100	99	95	90	86	55	28
۳-۴۵	100	100	100	94	82	66	45	36	22

www.PnEB.com

۳-۴۱ خاک درشت دانه $\rightarrow$ $F = 3\% < 50\%$ درصد عبوری از الک $\#200$

خاک ماسه‌ای است $\Rightarrow$ $F_1 = 94 - 3 = 91\% \geq \left(\frac{100 - F}{2} = 48.5\%\right)$ عبوری از الک نمرهٔ 4 و مانده بر روی الک $\#200$

چون به C_u و C_c نیاز داریم بایستی منحنی دانه‌بندی این خاک را ترسیم کنیم:



$$\Rightarrow \begin{cases} D_{10} = 0.425mm \\ D_{30} = 1.1mm \\ D_{60} = 1.9mm \end{cases}$$

$$\Rightarrow C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1.98}{0.425} = 4.66 \quad \text{و} \quad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(0.91)^2}{0.425 \times 1.98} = 0.98$$

$\Leftarrow$ با توجه به ردیف دوم جدول۳- ۳ علامت گروه این خاک $\boxed{SP}$ و نام این گروه با توجه به شکل ۳- ۴ و اینکه میزان شن (بین ۴/۷۵ میلیمتر تا ۷۶/۲ میلیمتر) برابر با $6\% = 94 - 100$ و کمتر از 15% است پس ماسه بد دانه‌بندی شده یا *poorly graded sand* می‌باشد.

۳-۴۲ خاک درشت دانه است $\rightarrow$ $F = 10 < 50\%$ درصد عبوری از الک $\#200$

خاک ماسه‌ای است $\Rightarrow$ $F_1 = 98 - 10 = 88\% \geq \frac{100 - 10}{2} = 45\%$ عبوری از الک $\#4$ و مانده روی الک $\#200$

با رسم منحنی دانه‌بندی این خاک خواهیم داشت:

$D_{10} = 0.075mm$ و $D_{30} = 0.43mm$ و $D_{60} = 1$

$$\Rightarrow C_u = \frac{1}{0.075} = 13.33 \qquad \text{و} \qquad C_c = \frac{(0.43)^2}{1 \times 0.075} = 2.46$$

درصد شن $= 100 - 98 = 2\%$

با مراجعه به جدول ۳- ۳ و *Nonplastic* بودنِ خاک علامت گروه این خاک به $SW - SM$ نزدیکتر بوده و با مراجعه به شکل ۳- ۴ نام این گروه ماسه خوب دانه‌بندی شده با لای می‌باشد.

۴۳-۳

$F = 77\% > 50\% \rightarrow$ خاک ریزدانه است

$LL = 63 \geq 50$, $PI = 25$ $\xrightarrow{\text{با مراجعه به شکل ۳- ۳}}$ زیرِ خط A

اگر به شکل ۳- ۳ دسترسی نداشتید با داشتن معادلهٔ خط A $[PI = 0.73(LL - 20)]$ می‌توانید متوجه شوید شرایط خاکتان بالای این خط و یا پائین آن قرار دارد به عنوان مثال برای این مسئله:

$PI = 0.73(63 - 20) = 31.39 > 25 \Rightarrow$ زیر خط A قرار دارد

$\Leftarrow$ با توجه به جدول ۳- ۴ علامت گروه این خاک MH می‌باشد.

مجموع مانده روی الک #200 $= 100 - F = 23\% < 30\%$

درصد ماسه $= 100 - 77 = 23\%$ $>$ درصد شن $= 0\%$

$\Leftarrow$ با توجه به شکل ۳- ۵ نام گروه این خاک لای الاستیک با ماسه یا *Elastic silt with sand* می‌باشد.

۴۴-۳

$F = 86\% \rightarrow$ خاک ریزدانه است

$LL = 55$, $PI = 28$ $\xrightarrow{\text{با توجه به شکل ۳- ۳ (نمودار خمیری)}}$ بالای خط A قرار دارد

با توجه به جدول ۳- ۴ علامت گروه CH می‌باشد.

$100 - F = 100 - 86 = 14\% < 30\%$

با توجه به شکل ۳- ۵ نام این خا ک $fat\ clay$ یا رس چاق می‌باشد.

۴۵-۳

$F = 45\% < 50\% \rightarrow$ خاک درشت دانه است

$F_1 = 100 - F = 55\% > \frac{100 - F}{2} \rightarrow$ خاک ماسه‌ای است

چون درصد عبوری از الک نمره *200* بزرگتر از *12* درصد است، با توجه به جدول ۳- ۳ مشاهده خواهید نمود که یکی از حالات ردیفهای سوم، چهارم و یا پنجم این جدول اتفاق خواهد افتاد که در هیچ یک از این حالت به دانستن مقادیر C_c و C_u نیازی نیست.

www.*BndEB.*com

چون $PI = 22$ و $LL = 36$ با توجه به شکل ۳- ۳ حدود اتربرگ بالای خط A است لذا علامت گروه SC می‌باشد.

با توجه به شکل ۳- ۴ نام این گروه *clayey sand* یا ماسه رس‌دار است.

۳-۴۶ تا ۳-۶۶ خاکهای زیر را طبق سیستم طبقه‌بندی متحد طبقه‌بندی کنید. علامت ونام گروه را بنویسید.

شماره مسئله	شن (%)	ماسه (%)	لای و رس (%)	حد مایع	نشانه خمیری	C_u	C_c
۳-۴۶	30	40	30	33	12		
۳-۴۷	52	28	20	41	19		
۳-۴۸	5	25	70	52	24		
۳-۴۹	0	18	82	30	11		
۳-۵۰	0	26	74	35	14		
۳-۵۱	0	36	64	28	10		
۳-۵۲	12	62	26	38	20		
۳-۵۳	9	50	41	42	21		
۳-۵۴	12	10	78	69	31		
۳-۵۵	29	67	4			3.4	2.6
۳-۵۶	1	42	57	54	28		
۳-۵۷	4	44	52	29	11		
۳-۵۸	12	40	48	32	13		
۳-۵۹	28	38	34	29	14		
۳-۶۰	29	60	11	32	16	4.8	2.9
۳-۶۱	0	98	2			7.2	2.2
۳-۶۲	31	65	4			5.4	3.6
۳-۶۳	11	24	65	44	23		
۳-۶۴	10	82	8	39	8	3.9	2.1
۳-۶۵	0	24	76	55	26		
۳-۶۶	0	10	90	61	34		

درصد لای و رس همان درصد عبوری از الک نمرهٔ *200* می‌باشد *(F)* که اگر بزرگتر از 50% باشد خاک ریزدانه و اگر کوچکتر از 50% باشد خاک درشت دانه است و همچنین واضح است که در مورد خاکهای درشت دانه درصد هر یک از موارد ماسه یا شن بیشتر باشد خا ک از آن نوع می‌باشد.

www.PnuEB.com

شماره مسئله	علامت گروه	نام گروه
۳- ۴۶	SC	ماسهٔ رس‌دار با شن
۳- ۴۷	GC	شن رس‌دار با ماسه
۳- ۴۸	CH	رس چاق ماسه‌دار $100-70=30\geq 30\%$ = درصد مانده روی #200
۳- ۴۹	CL	رس لاغر $100-F=12\%<30\%$
۳- ۵۰	CL	رس لاغر با ماسه $100-F=26\%<30\%$
۳- ۵۱	CL	رس لاغر ماسه‌دار $100-F=36\%\geq 30\%$
۳- ۵۲	SC	ماسهٔ رس‌دار
۳- ۵۳	SC	ماسهٔ رس‌دار
۳- ۵۴	MH	لای الاستیک با شن $100-F=22\%<30\%$
۳- ۵۵	SP	ماسهٔ بد دانه‌بندی شده با شن
۳- ۵۶	CH	رس چاق ماسه‌دار $100-F=43\%\geq 30\%$
۳- ۵۷	CL	رس لاغر ماسه‌دار $100-F=48\%\geq 30\%$
۳- ۵۸	SC	ماسهٔ رس‌دار
۳- ۵۹	SC	ماسهٔ رس‌دار با شن
۳- ۶۰	SP-SC	ماسهٔ بد دانه‌بندی شده با رس و شن
۳- ۶۱	SW	ماسهٔ خوب دانه‌بندی شده
۳- ۶۲	SP	ماسهٔ بد دانه‌بندی شده با شن
۳- ۶۳	CL	رس لاغر ماسه‌دار $100-F=35\%\geq 30\%$
۳- ۶۴	SP-SC	ماسهٔ بد دانه‌بندی شده با رس
۳- ۶۵	CH	رس چاق با ماسه $100-F=24\%<30\%$
۳- ۶۶	CH	رس چاق $100-F=10\%<30\%$

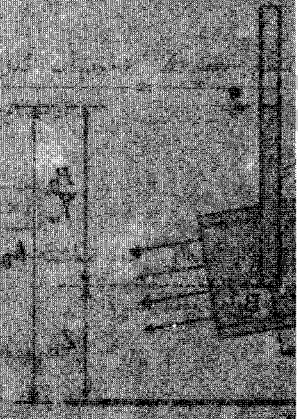
www.*PnuEB*.com

www*.PnuEB*.com

فصل ۴

جریان آب در خاک

قانون دارسی و نشت



PnuEB.*com

از مکانیک سیالات می‌دانیم مطابق رابطهٔ برنولی، بار آبی کل یک نقطهٔ آب در حال جریان، با مجموع بار فشار، بار سرعت و بار ارتفاع برابر می‌باشد یعنی:

$$h = \underbrace{\frac{P}{\gamma_w}}_{\text{بار فشار}} + \underbrace{\frac{V^2}{2g}}_{\text{بار سرعت}} + \underbrace{Z}_{\text{بار ارتفاع}}$$

بار آبی کل

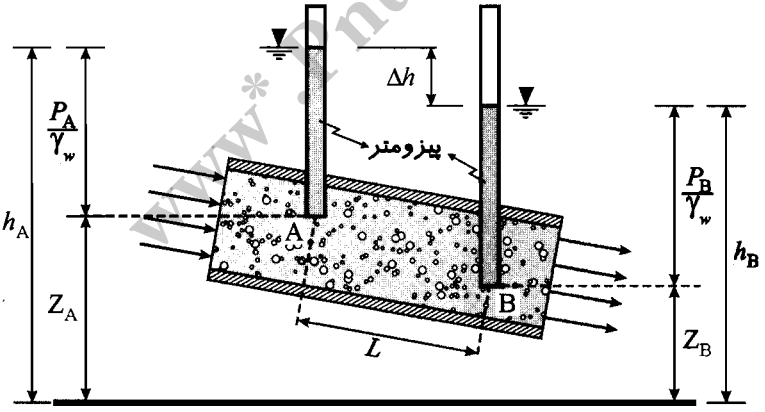
حال اگر رابطهٔ برنولی را برای جریان آب داخل محیط متخلخل خاک در نظر بگیریم، به علت سرعت کم جریان، از بار سرعت می‌توان صرفنظر نمود و در آنصورت:

$$\boxed{h = \frac{P}{\gamma_w} + Z}$$

در رابطهٔ فوق $\frac{P}{\gamma_w}$ بار فشار می‌باشد که برای تعیین آن در هر نقطه‌ای کافیست پیزومتری در آن نقطه نصب شود؛ آنگاه ارتفاع آبی که در این لولهٔ پیزومتر بالا می‌آید همان $\frac{P}{\gamma_w}$ می‌باشد و Z نیز در این رابطه ارتفاع نقطهٔ مورد نظر از تراز مبنای اختیاری می‌باشد.

توجه شود انتخاب تراز مبنا، کاملاً اختیاری است، اما برای تمام نقاط خاک باید این تراز ثابت بماند.

با شکل زیر، می‌توان مفهوم گرادیان هیدرولیکی را بیان داشت:



B و A افت بار بین دو نقطهٔ : $\Delta h = h_A - h_B = (\frac{P_A}{\gamma_w} + Z_A) - (\frac{P_B}{\gamma_w} + Z_B)$

گرادیان (شیب) هیدرولیکی: $\boxed{i = \frac{\Delta h}{L}}$

که در این رابطه، Δh اختلاف بار آبی بین دو نقطهٔ A و B بوده و L طولی از خاک (در امتداد شیب خاک) است که آب آنرا بین نقاط A و B طی کرده است.

www.*nuEB*.com

سرعت جریان

الف) سرعت متوسط یا سرعت جریان (V): این سرعت، براساس سطح مقطع کلی خاک تعریف می‌شود.

ب) سرعت واقعی آب یا سرعت تراوش (V_s): این سرعت، براساس سطح مقطع فضای خالی خاک تعریف می‌شود و ثابت می‌شود که:

$$V_s = \frac{V}{n}$$ ← پوکی یا تخلخل

برای سرعت جریان (V)، دارسی رابطهٔ ساده و مهم زیر را در سال ۱۸۵۶ ارائه داده است:

$$V = k.i$$

که در این رابطه i گرادیان هیدرولیکی و بدون واحد و k ضریب نفوذپذیری خاک برحسب $\frac{m}{sec}$ که در ادامه به توضیح آن خواهیم پرداخت و V نیز سرعت جریان یا به عبارتی مقدار آبی است که در واحد زمان از واحد سطح خاک می‌گذرد.

$$(\frac{m^3}{m^2.sec} = \frac{m}{sec})$$

با توجه به تعریفی که برای V صورت گرفت، مفهوم مهم دیگری تحت عنوان دبی جریان مطرح می‌گردد که عبارتست از مقدار آبی که در واحد زمان از یک مقطع مشخص می‌گذرد و با q نشان می‌دهند و برحسب $\frac{m^3}{sec}$ بیان می‌گردد:

$$q = \frac{Q(\text{حجم آب گذرنده})}{t(\text{زمان})} = \frac{A(\text{سطح مقطع}) \times L(\text{طول طی شده})}{t(\text{زمان})} = A \times V$$ ← سرعت جریان

پس می‌توان نتیجه گرفت:

$$q = A \times k \times i$$

حال اگر مسیر جریانی باز باشد یعنی در طول مسیر، چاه و یا چشمه‌ای وجود نداشته باشد طبق **مفهوم پیوستگی**، دبی جریان در طول مسیر برای مقاطع مختلف یکسان خواهد بود، یعنی:

$$q_1 = q_2 = q_3 = ... = q_n$$

ضریب نفوذپذیری

قابلیت نفوذ آب در خاک را نفوذپذیری خاک می‌گویند و ضریب نفوذپذیری را با k نشان داده و دارای همان واحد سرعت جریان می‌باشد که مطابق رابطهٔ زیر مشخص است که به وزن مخصوص و ویسکوزیتهٔ سیال بستگی دارد:

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta}.\overline{K}$$

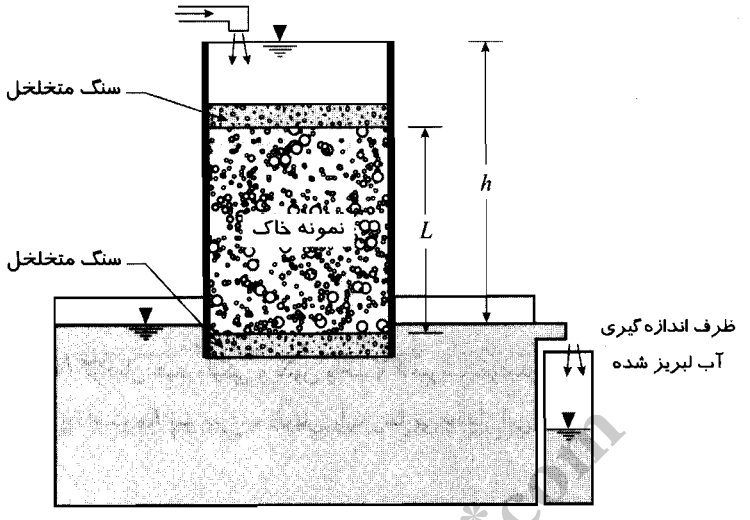
که در این رابطه: γ_w = وزن مخصوص آب

η = ویسکوزیتهٔ آب

$\overline{K}$ = نفوذپذیری مطلق خاک و دارای بعد L^2 (cm^2 یا m^2) می‌باشد.

برای تعیین k در آزمایشگاه، از آزمایشهای با بار آبی ثابت (برای خاک‌های درشت‌دانه که دارای k بزرگی هستند) و با بار آبی نزولی (برای خاک‌های ریزدانه با ضریب نفوذپذیری کم) استفاده می‌کنند.

www.*PnuEB*.com



آزمایش نفوذپذیری با بار آبی ثابت

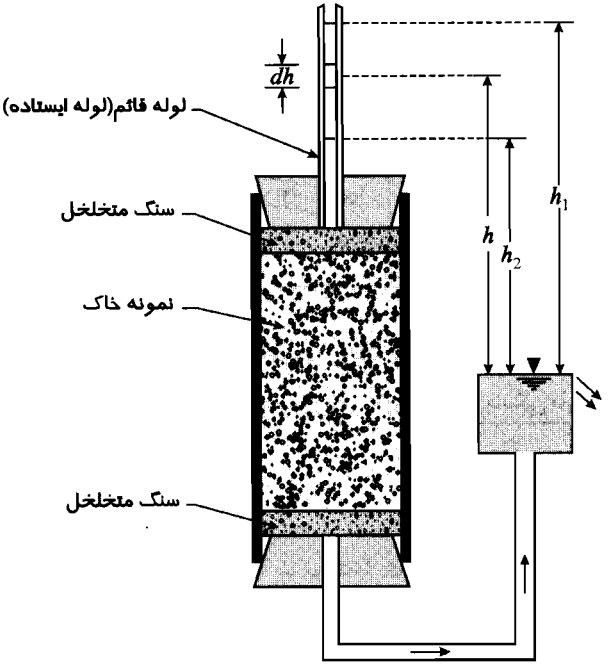
$$k = \frac{QL}{Aht}$$

در این رابطه: Q= حجم آب جمع شده در ظرف اندازه‌گیری آب لبریز شده

L= طول نمونهٔ خاک A= سطح مقطع نمونهٔ خاک

h= اختلاف بار آبی بین نقاط ورودی و خروجی از نمونه t= مدت زمان جمع‌آوری آب

www.*PnEB*.com



آزمایش نفوذپذیری با بار نزولی(پتانسیل نزولی)

$$k = 2.303\frac{aL}{At}.\log\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

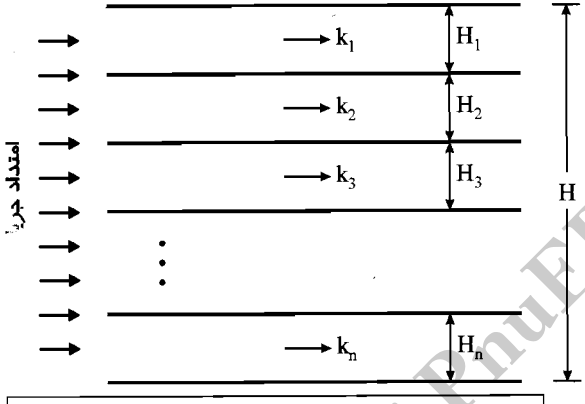
که در این رابطه: a= سطح مقطع لولهٔ قائم L= طول نمونهٔ خاک A= سطح مقطع نمونهٔخاک
t= زمان آزمایش h_1 = اختلاف بار آبی بین ابتدا و انتهای نمونه در لحظهٔ $t = 0$
h_2 = اختلاف بار آبی بین ابتدا و انتهای نمونه در لحظهٔ t

علاوه بر روابط فوق، روابط تجربی‌ای نیز برای تعیین k وجود دارد. همچنین برای تعیین k در صحرا از روش پمپاژ چاه استفاده می‌شود که در اینجا از ذکر این روابط چشمپوشی می‌کنیم (در مسائل به آنها اشاره شده است).

نفوذپذیری معادل در خاک‌های لایه‌بندی شده

اگر خاک موجود متشکل از چندین لایه خاک با ضریب نفوذپذیری‌های مختلف باشد برای مجموعهٔ موجود با توجه به جهت جریان (عمود بر لایه‌ها یا هم‌جهت با لایه‌ها) می‌توان یک k معادل بدست آورد.

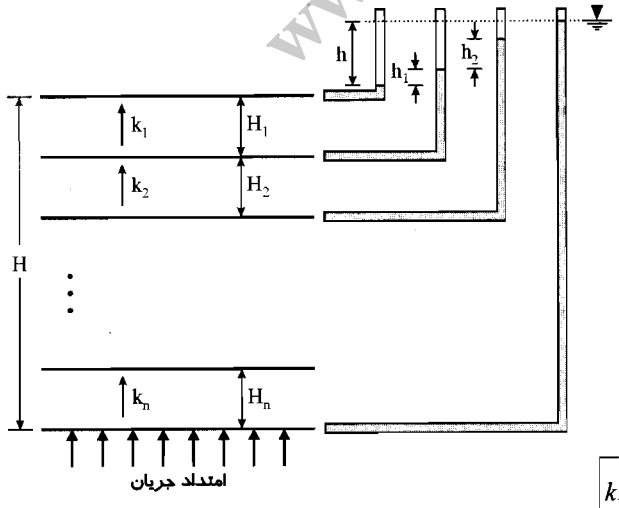
الف) جریان در امتداد لایه‌ها



ضریب نفوذپذیری معادل در راستای افقی:

$$k_{H(eq)} = \frac{1}{H}(k_1H_1 + k_2H_2 + k_3H_3 + \ldots + k_nH_n)$$

ب) جریان عمود بر لایه‌ها



ضریب نفوذپذیری معادل در راستای قائم:

$$k_{v(eq)} = \frac{H}{\left(\frac{H_1}{k_1}\right) + \left(\frac{H_2}{k_2}\right) + \ldots + \left(\frac{H_n}{k_n}\right)}$$

www.PnuEB.com

شبکهٔ جریان

شبکهٔ جریان متشکل از دو سری منحنی عمود بر هم می‌باشد که به یک دسته از این منحنی‌ها، خطوط جریان و به دستهٔ دیگر، خطوط هم‌پتانسیل می‌گویند. خط جریان خطی است که ذرات آب در امتداد آن، از سمت بالا دست به سمت پائین دست در خاک نفوذپذیر، جریان می‌یابند و خط هم‌پتانسیل خطی است که نقاط واقع روی آن دارای یک انرژی پتانسیل هستند به این معنا که اگر پیزومترهایی در نقاط مختلف یک خط هم‌پتانسیل قرار دهیم، ارتفاع آب داخل این پیزومترها با همدیگر مساوی خواهد بود. یکی از مهمترین کاربردهای شبکهٔ جریان تعیین میزان دبی (نشت) از زیر یک سد می‌باشد، برای این منظور ابتدا بایستی شبکهٔ جریان را به طریق صحیحی (به مسئلهٔ ۴-۱۶ مراجعه کنید) ترسیم کنیم و تعداد کانال‌های جریان (N_f) و کانال‌های هم‌پتانسیل (N_d) را تعیین کنیم (توجه کنید منظور از کانال، نوار بین دو خط مجاور می‌باشد) و سپس از رابطهٔ زیر دبی عبوری از زیر سد (یا سپر) را تعیین نمائیم:

$$q = kH(\frac{N_f}{N_d}).n$$

که در این رابطه H اختلاف آب بالادست و پائین‌دست می‌باشد و n نسبت عرض به طول خانه‌های مستطیلی شبکهٔ جریان می‌باشد (البته ترسیم شبکه‌های جریان مربعی مرسوم‌تر و سهل‌تر می‌باشد که در آنصورت $n = 1$)

اگر خاک غیر ایزوتروپ (غیر همسانگرد) باشد در آنصورت $k_x \neq k_z$ و رابطهٔ دبی در این محیط و با شبکه‌ای مربعی خواهد بود:

$$q = \sqrt{k_x.k_z}\,\frac{HN_f}{N_d}$$

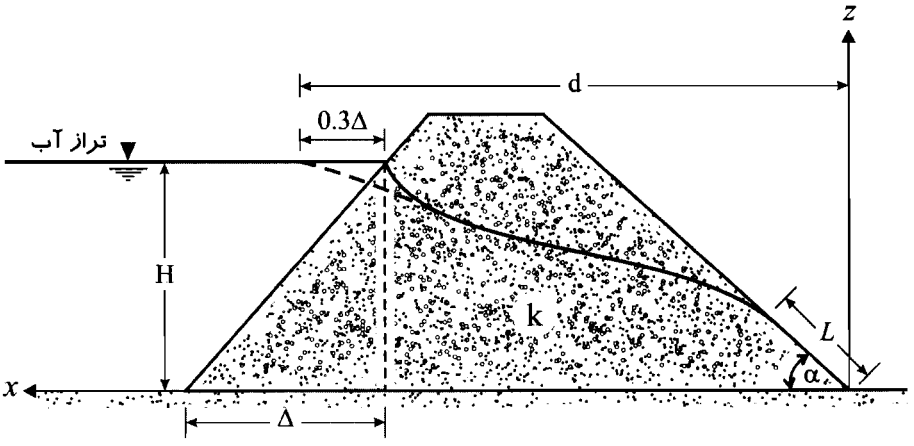
فشار بر کنش یا فشار بالابرنده یا فشار *uplift* در زیر سازه‌های هیدرولیکی

فشار برکنش درواقع برآیند فشار آب حفره‌ای وارده در طول سد می‌باشد که برای ایمنی سازهٔ مذکور باید فشار بالابرنده (برکنش) با ضریب اطمینانی از وزن سازه کمتر باشد.

نشت آب از بدنهٔ سد خاکی همگن واقع در روی پی نفوذناپذیر

مقطعی از این سد را در شکل زیر مشاهده می‌کنید:

www.PnuEB.com



برای تعیین دبی (نشت) از بدنهٔ این سدخاکی، گامهای زیر بترتیب باید انجام شود:

۱- تعیین α

۲- محاسبهٔ Δ و سپس 0.3Δ

۳- محاسبهٔ d

۴- محاسبهٔ L به کمک رابطهٔ زیر:

$$L = \frac{d}{\cos\alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2\alpha} - \frac{H^2}{\sin^2\alpha}}$$

۵- محاسبهٔ q به کمک رابطهٔ زیر:

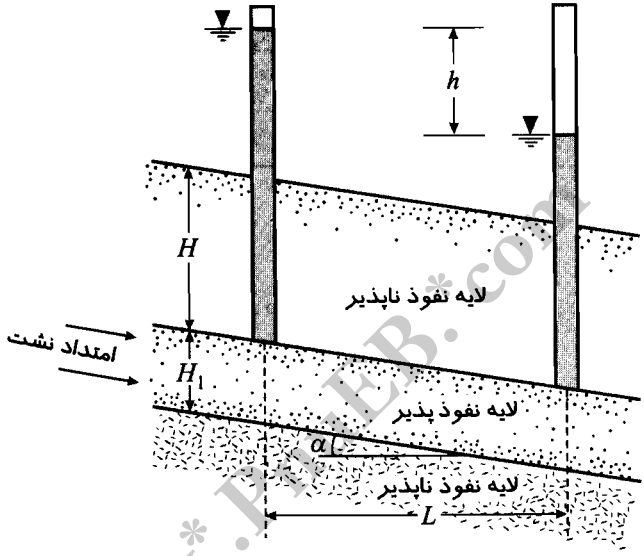
$$q = k.L.tg\alpha.\sin\alpha$$

www.PnuEB.com

۴-۱ مطابق شکل یک لایهٔ نفوذپذیر (تراوا) بین دو لایهٔ نفوذناپذیر قرار داشته و آب از داخل آن جریان دارد. داریم:

$H = 4m$ و $H_1 = 2m$ و $h = 3.1m$ و $L = 30m$ و $\alpha = 14^\circ$ و $k = 0.05\,{}^{cm}/_{sec}$

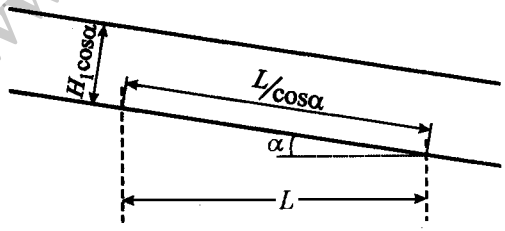
مطلوب است تعیین دبی آب نشتی (مترمکعب بر ساعت بر یک متر عرض)



$q = k.A.i$ یک متر عرض

$A = H_1 \cos\alpha \times \overbrace{1}$

$i = \dfrac{\text{افت بار}}{\text{طول}} = \dfrac{h}{\dfrac{L}{\cos\alpha}}$



$$q = k \times (H_1 \cos\alpha \times 1) \times \frac{h}{L} \times \cos\alpha = (0.05 \times 10^{-2} \times 3600\,{}^{m}/_{hr}) \times (2 \times \cos 14) \times (\frac{3.1}{30} \times \cos 14)$$

$$q = 0.35 m^3 / h / m$$

۴-۲ مسئلهٔ ۴-۱ را با استفاده از داده‌های زیر مجدداً حل کنید.

$H = 2m$ و $H_1 = 1.35m$ و $h = 2.5m$ و $L = 4.5m$ و $\alpha = 20^\circ$ و $k = 0.0006\,{}^{m}/_{min}$

دبی را بر حسب مترمکعب بر ساعت بر یک متر عرض بدست آورید.

$$k = 0.0006 \times 60 = 0.036\,{}^{m}/_{hr}$$

$$q = k \times (H_1 \cos\alpha) \times (\frac{h}{\frac{L}{\cos\alpha}}) = 0.036 \times 1.35 \times (\cos 20)^2 \times \frac{2.5}{4.5} = 0.0238 m^3 / h / m$$

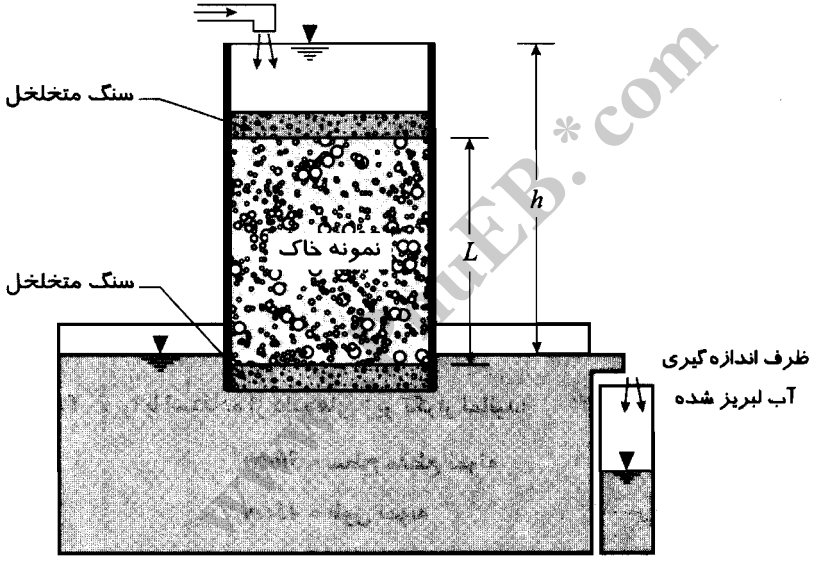
www.*.IR.LB.com

۴-۳ یک نمونهٔ خاک برای آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت دارای ارتفاع 25 و قطر 12.5 سانتیمتر است. در حین آزمایش برای اختلاف بار 75 سانتیمتر، آب جمع‌آوری شده در 3 دقیقه مساوی 650 سانتیمترمکعب اندازه‌گیری شده است. مطلوب است تعیین ضریب نفوذپذیری خاک.

$$k = \frac{QL}{Aht}$$

$$k = \frac{650 \times 25}{\pi \frac{(12.5)^2}{4} \times 75 \times 3 \times 60} = 0.0098 \, {}^{cm}/_{sec}$$

۴-۴ با مراجعه به شکل برای آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت، معلومات زیر در دست است:



آزمایش نفوذپذیری با بار آبی ثابت

$0.0244 \, {}^{cm}/_{sec}$ ضریب نفوذپذیری و $A =$ مقطع نمونه $= 32cm^2$ و $L = 300mm$

اگر دبی جریان مساوی 250 سانتیمترمکعب در4 دقیقه باشد، اختلاف ارتفاع h در حین آزمایش چقدر است؟

$$k = \frac{QL}{Aht} \quad \Rightarrow \quad h = \frac{QL}{Akt} = \frac{250 \times 30}{32 \times 0.0244 \times 4 \times 60} = 40.02cm$$

۴-۵ ضریب نفوذپذیری یک خاک رسی 3×10^{-7} سانتیمتر بر ثانیه است. ویسکوزیتهٔ آب در25 درجهٔ سانتیگراد مساوی $0.0911 \times 10^{-4} \, {}^{g.sec}/_{cm^2}$ می‌باشد. مطلوب است محاسبهٔ ضریب نفوذپذیری مطلق $\overline{K}$ برای خاک.

$$k = 3 \times 10^{-7} \, {}^{cm}/_{sec} \qquad \eta = 0.0911 \times 10^{-4} \, {}^{g.sec}/_{cm^2} \qquad \gamma_w = 1 \, {}^{g}/_{cm^3}$$

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta} \times \overline{K} \quad \Rightarrow \quad \overline{K} = \frac{0.0911 \times 10^{-4} \times 3 \times 10^{-7}}{1} = 2.733 \times 10^{-12}\, cm^2$$

٤-٦ برای یک آزمایش نفوذپذیری با بار (پتانسیل) نزولی، اطلاعات زیر در دست است:

سطح مقطع نمونه = $1200mm^2$

طول نمونه = $150mm$

سطح مقطع لولهٔ قائم = $50mm^2$

اختلاف ارتفاع در زمان $(t=0)$ = $400mm$

اختلاف ارتفاع در زمان (دقیقه $t=5$) = $200mm$

مطلوب است تعیین ضریب نفوذپذیری خاک بر حسب سانتیمتر بر ثانیه.

نکته: از آنجایی که $2.303\log_{10}^{x}$ تقریباً برابر با Lnx می‌باشد در برخی کتب این رابطه به شکل $k = \frac{aL}{At} Ln(\frac{h_1}{h_2})$ ارائه می‌شود.

$$k = 2.303 \frac{aL}{At} \log \frac{h_1}{h_2}$$

$$k = 2.303 \frac{50 \times 150}{1200 \times 5} \times \log(\frac{400}{200}) = 0.866\, {}^{mm}/_{min} = 1.44 \times 10^{-3}\, {}^{cm}/_{sec}$$

٤-٧ مسئلهٔ ۴-۶ را با استفاده از داده‌های زیر تکرار نمائید:

سطح مقطع نمونه = $30cm^2$

طول نمونه = $45cm$

سطح مقطع لولهٔ قائم = $1.3cm^2$

اختلاف ارتفاع در زمان t=0 = $75cm$

اختلاف ارتفاع در زمان t=2 دقیقه = $50cm$

مطلوب است تعیین ضریب نفوذپذیری خاک بر حسب سانتیمتر بر ثانیه.

$$k = 2.303 \times \frac{1.3 \times 45}{30 \times 2 \times 60} \times \log(\frac{75}{50}) = 6.59 \times 10^{-3}\, {}^{cm}/_{sec}$$

٤-٨ برای آزمایش نفوذپذیری مسئلهٔ ۴-۷، در زمان $t = 1$ دقیقه، اختلاف ارتفاع چقدر است؟

$$k = 2.303 \frac{aL}{At} \log(\frac{h_1}{h_2})$$

$$6.59 \times 10^{-3} = 2.303 \frac{1.3 \times 45}{30 \times 1 \times 60} \times \log(\frac{75}{h_2})$$

www.PnuEB.com

$$\Rightarrow \log(\frac{75}{h_2}) = 0.088$$

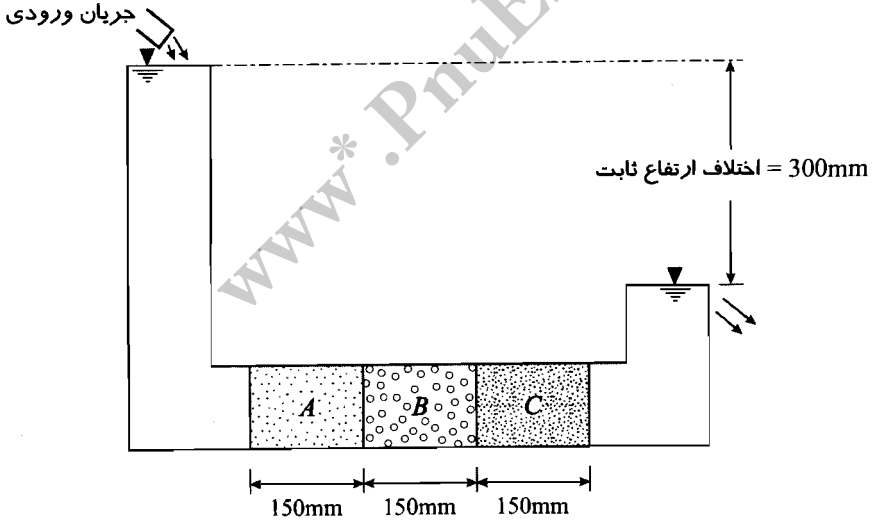
$$\Rightarrow \frac{75}{h_2} = 10^{(0.088)} = 1.225 \quad \Rightarrow h_2 = 61.24cm$$

۹-٤ **در شکل نشـان داده شـده، ابـعاد مقـــطع مجـرایی که در آن نمـونه‌های خاک قرار دارد، 100×100 میلیمتر است.**

جریان ورودی آب طوری تنظیم شده که اختلاف ارتفاع ثابت و مساوی 300 میلیمتر گردد. ضرایب نفوذپذیری خاکها در امتداد جریان به شرح زیر می‌باشند:

خاک	$k(cm/sec)$
A	10^{-2}
B	3×10^{-3}
C	4.9×10^{-4}

مطلوب است تعیین دبی جریان بر حسب سانتیمترمکعب بر ساعت.



www.PnuEB.com

جهت جریان عمود بر لایه‌ها می‌باشد لذا k معادل را از رابطهٔ زیر بدست می‌آوریم (k_v)

$$\text{معادل } k = \frac{\Sigma H_i}{\Sigma \frac{H_i}{k_i}} = \frac{15+15+15}{\frac{15}{10^{-2}} + \frac{15}{3\times10^{-3}} + \frac{15}{4.9\times10^{-4}}} = 1.21\times10^{-3}\ cm/sec$$

$$\text{دبی } q = k\times i\times A = k\times\frac{\Delta h}{L}\times A = 1.21\times10^{-3}\times\frac{30}{3\times15}\times(10\times10)$$

$$= 0.081\ cm^3/sec = 290.4\ cm^3/hr$$

٤-١٠ ضریب نفوذپذیری ماسه در نسبت تخلخل *0.55* مساوی *3* سانتیمتر بر دقیقه است. با استفاده از رابطهٔ ۴- ۲۴ نفوذپذیری آن را در نسبت تخلخل *0.7* بدست آورید.

(در رابطهٔ ۴-۲۴) $k = 1.4e^2 k_{0.85}$

$$3 = 1.4 \times (0.55)^2 \times k_{0.85} \quad \Rightarrow \quad k_{0.85} = 7.08\ ^{cm}/_{min}$$

$$k_{0.7} = 1.4 \times (0.7)^2 \times 7.08 = 4.86\ ^{cm}/_{min}$$

٤-١١ مسئله ۴- ۱۰ را با استفاده از رابطهٔ ۴- ۲۶ تکرار نمائید.

(در رابطهٔ ۴-۲۶) $k = c_1 \dfrac{e^3}{1+e}$

$$3 = c_1 \times \frac{(0.55)^3}{1+0.55} \Rightarrow c_1 = 27.95$$

$$k_{0.7} = 27.95 \times \frac{(0.7)^3}{1+0.7} = 5.64\ ^{cm}/_{min}$$

٤-١٢ برای یک رس عادی تحکیم یافته، اطلاعات زیر در دست است:

نسبت تخلخل (e)	k(cm/sec)
1.1	0.302×10^{-7}
0.9	0.12×10^{-7}

مطلوب است تعیین ضریب نفوذپذیری رس در نسبت تخلخل *1.2*

(رابطهٔ ۴-۳۱) $k = c_3 \left(\dfrac{e^n}{1+e} \right)$

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{(\frac{e_1^n}{1+e_1})}{(\frac{e_2^n}{1+e_2})} \quad \Rightarrow \quad \frac{0.302 \times 10^{-7}}{0.12 \times 10^{-7}} = \frac{\frac{(1.1)^n}{1+1.1}}{\frac{(0.9)^n}{1+0.9}}$$

$$\Rightarrow 2.782 = (\frac{1.1}{0.9})^n \Rightarrow \quad Ln(2.782) = n\, Ln(\frac{1.1}{0.9})$$

$$\Rightarrow n = 5.1$$

برای تعیین c_3 نیز از یکی از eهای داده شده در صورت مسأله استفاده می‌کنیم

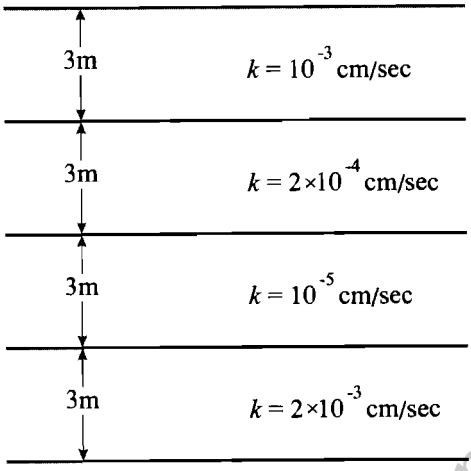
$$k = c_3(\frac{e^n}{1+e})$$

$$0.12 \times 10^{-7} = c_3(\frac{(0.9)^{5.1}}{1+0.9}) \Rightarrow c_3 = 3.9 \times 10^{-8}$$

$$\Rightarrow k_{1.2} = 3.9 \times 10^{-8}(\frac{(1.2)^{5.1}}{1+1.2}) = 4.5 \times 10^{-8}\ ^{cm}/_{sec}$$

٤-١٣ در شکل یک خاک لایه‌لایه نشان داده شده است. برای جریان در امتداد قائم لوب است تعیین ضریب نفوذپذیری معادل برحسب سانتیمتر بر ثانیه.

www.PnuEB.com



$$k_{v(eq)} = \frac{\Sigma H_i}{\Sigma \frac{H_i}{K_i}} = \frac{4\times 300}{\frac{300}{10^{-3}} + \frac{300}{2\times10^{-4}} + \frac{300}{10^{-5}} + \frac{300}{2\times10^{-3}}} = 3.76\times10^{-5}\ {}^{cm}/_{sec}$$

۴-۱۴ با مراجعه به شکل مسئلهٔ ۴-۱۳، مطلوب است تعیین ضریب نفوذپذیری معادل برای جریان در امتداد افق برحسب سانتیمتر بر ثانیه. همچنین مطلوب است محاسبهٔ $k_{v(eq)}/k_{H(eq)}$

$$k_{H(eq)} = \frac{\Sigma k_i \times H_i}{\Sigma H_i}$$

$$k_{H(eq)} = \frac{300(10^{-3} + 2\times10^{-4} + 10^{-5} + 2\times10^{-3})}{4\times300} = 8.025\times10^{-4}\ {}^{cm}/_{sec}$$

$$\frac{k_{V(eq)}}{k_{H(eq)}} = \frac{3.76\times10^{-5}}{8.025\times10^{-4}} = 0.047$$

توجه کنید این مسئله با فرض $k_{H_i} = k_{V_i}$ و برابر با مقادیر موجود در شکل فرض شده است.

۴-۱۵ با مراجعه به شکل ۴-۱۴، برای آزمایش پمپاژ چاه در حالت دائمی اطلاعات زیر بدست آمده است

$q = 24\ {}^{m^3}/_{min}$ و $h_1 = 18.5m$ و $r_1 = 200mm$

و $h_2 = 16.4m$ و $r_2 = 100mm$

مطلوب است تعیین ضریب نفوذپذیری لایهٔ نفوذپذیر.

$$k = \frac{2.303q.\log(\frac{r_1}{r_2})}{\pi(h_1^2 - h_2^2)} = \frac{2.303\times24\times\log(\frac{200}{100})}{\pi(18.5^2 - 16.4^2)} = 0.072\ {}^{m}/_{min}$$

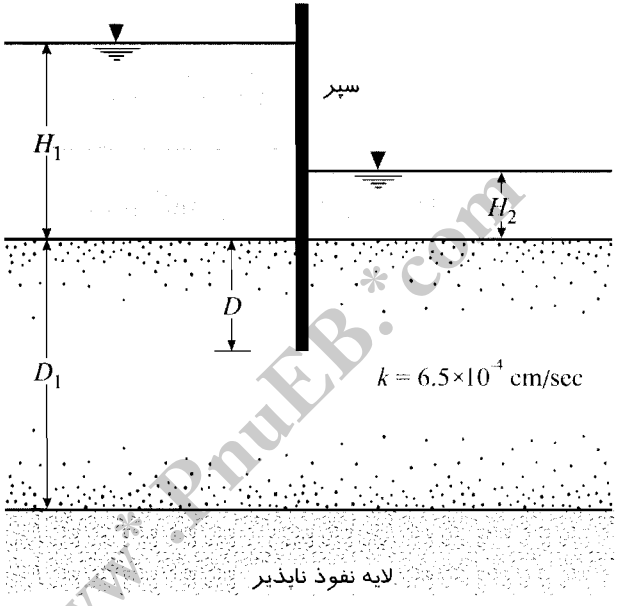
www.*PnuEB*.com

٤-١٦ با مراجعه به شکل، اطلاعات زیر در دست است:

$H_1 = 20m$ $\quad D = 10m$

$H_2 = 5m$ و $\quad D_1 = 20m$

مطلوب است رسم شبکهٔ جریان و محاسبهٔ دبی نشت برای عرض واحد.



www.PnuEB.com

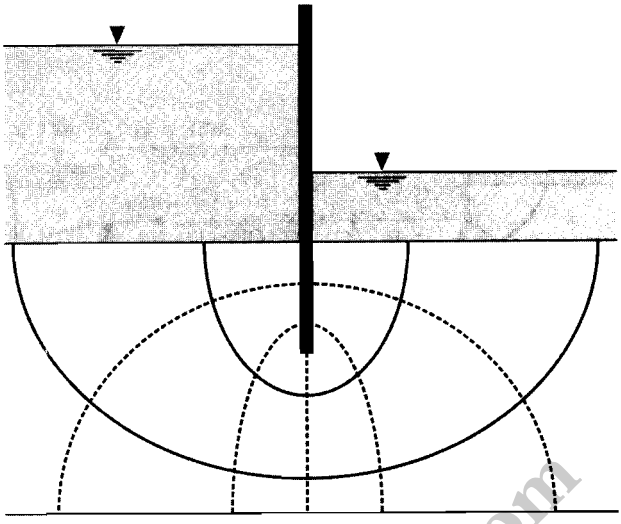
نکته: ترسیم صحیح شبکهٔ جریان، نیاز به تمرین و ممارست زیادی دارد که در این مسیر باید سه نکتهٔ زیر همواره رعایت گردد:

۱) خطوط جریان و خطوط همپتانسیل (که در واقع جوابهای معادلهٔ پیوستگی لاپلاس هستند) بر هم عمودند.

۲) در محیط‌های ایزوتروپیک ($k_x = k_z$)، هر یک از چشمه‌های شبکهٔ جریان، تقریباً باید مربع باشند بطوریکه بتوان یک دایره در داخل آن محاط نمود.

۳) شرایط مرزی (عمود بودن خطوط در مرزها) نیز برقرار باشد.

توجه کنید که در راه رسیدن به اهداف فوق ممکن است برای ترسیم یک شبکهٔجریان از چندین بار آزمون و خطا استفاده کنید. لیکن باید بدانید در عمل هم اگر به طریق دستی عمل شود ممکن است چندین بار آزمون و خطا نیاز باشد. هرچند که ترسیم شبکهٔ جریان با کامپیوتر با برنامه‌هایی نظیر flownet و Seepage هم انجام می‌شود.



با توجه به شبکهٔ جریان ترسیم شده: $N_f = 3$ و $N_d = 6$

$$q = kH\frac{N_f}{N_d} = 6.5\times10^{-6}\times(20-5)\times\frac{3}{6} = 4.9\times10^{-5}\,m^3/sec/m = 0.49cm^3/sec/m$$ دبی نشت

۴-۱۷ مسئلهٔ ۴-۱۶ را با اطلاعات زیر تکرار کنید.

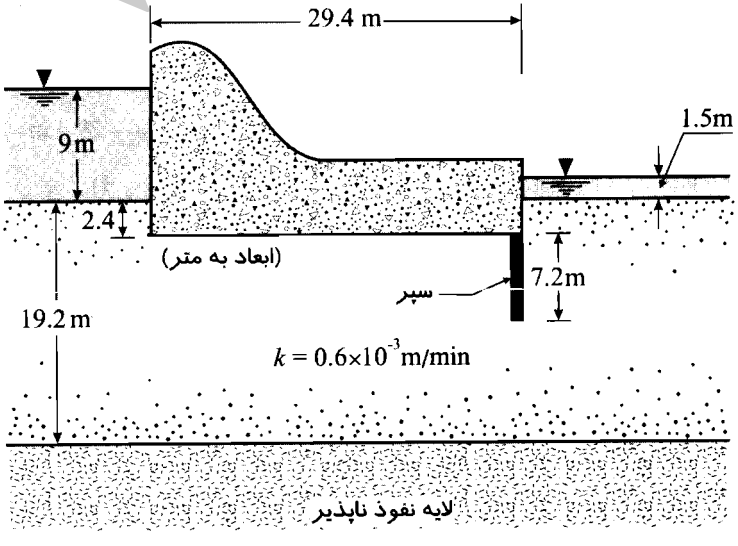
$H_1 = 5m$ $D = 4m$

$H_2 = 0.7m$ $D_1 = 10m$

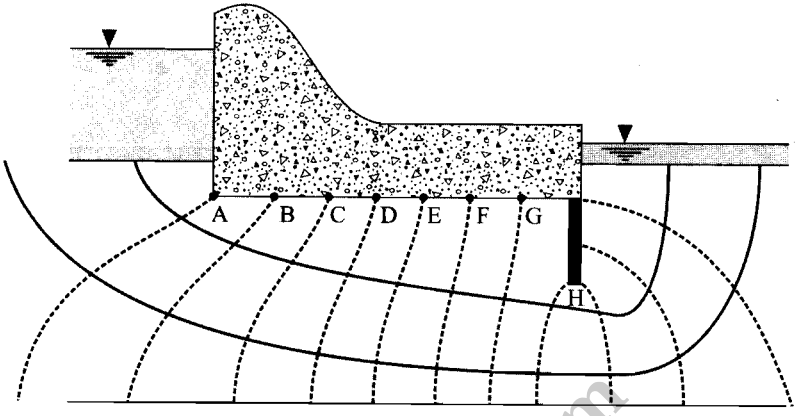
اگر شبکهٔ جریان با این پارامترها را رسم کنیم خواهیم داشت: $N_f = 5$ و $N_d = 8$

$$q = 6.5\times10^{-6}\times(5-0.7)\times\frac{5}{8} = 1.75\times10^{-5}\,m^3/sec/m = 0.175m^3/sec/m$$

۴-۱۸ برای سرریز نشان داده شده، شبکهٔ جریان نشت را در لایهٔ نفوذپذیر رسم نمائید.



www.PnuED.com



۱۹-٤ برای شبکهٔ جریان رسم شده برای مسئلهٔ ۴-۱۸، مطلوب است محاسبهٔ نیروی بر کنش در زیر پایهٔ سرریز برای واحد عرض.

طبق شبکهٔ جریان ترسیم شده: 12 = تعداد خطوط همپتانسیل

اختلاف هد بالادست و پائین دست $H = (9 + 2.4) - (1.5 + 2.4) = 7.5m$

افت ارتفاع آب در هرخط پتانسیل نسبت به قبلی (با حرکت از سمت بالادست به سمت پائین دست) $= \frac{7.5}{12} = 0.625$

در نتیجه قادریم به راحتی فشار آب وارده زیر پایهٔ سرریز در نقاط برخورد خطوط همپتانسیل با کف سرریز (A تا H) را بدست آوریم.

$$P_A = (9 + 2.4 - 0.625) \times \gamma_w = 10.775\gamma_w$$

$$P_B = (10.775 - 0.625) \times \gamma_w = 10.15\gamma_w$$

$$P_C = (10.15 - 0.625) \times \gamma_w = 9.525\gamma_w$$

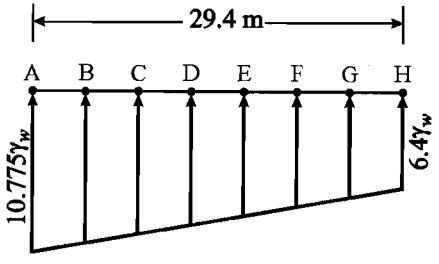
$$P_D = (9.525 - 0.625) \times \gamma_w = 8.9\gamma_w$$

$$P_E = (8.9 - 0.625) \times \gamma_w = 8.275\gamma_w$$

$$P_F = (8.275 - 0.625) \times \gamma_w = 7.65\gamma_w$$

$$P_G = (7.65 - 0.625) \times \gamma_w = 7.025\gamma_w$$

$$P_H = (7.025 - 0.625) \times \gamma_w = 6.4\gamma_w$$



مساحت زیر نمودار فشار= نیروی برکنش (F)

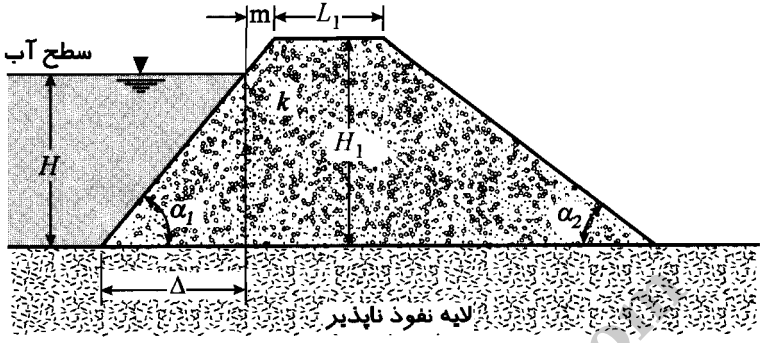
$$F = (\frac{10.775 + 6.4}{2}) \times 29.4 \times \gamma_w = 252.47\gamma_w$$

$$F = 252.47 \times 9.81 = 2476.75\ ^{kN}/_{m}$$

www.PnuEB.com

۴-۲۰ برای یک سد خاکی که مقطع آن در شکل نشان داده شده است، دبی نشت را در واحد طول محاسبهٔ نمائید:

$\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$ و $L_1 = 15m$ و $H = 30m$ و $H_1 = 40m$ و $k = 4.2 \times 10^{-4}\ m/min$



برای تعیین دبی نشت از بدنهٔ سدهای خاکی عملیات گام به گام زیر را انجام می‌دهیم:

۱- محاسبهٔ Δ:

$$\Delta = \frac{H}{tg\alpha_1} = \frac{30}{tg45} = 30m$$

۲- محاسبهٔ 0.3Δ:

$$0.3\Delta = 0.3 \times 30 = 9m$$

۳- محاسبهٔ d:

$$m = (\frac{H_1}{tg\alpha_1} - \frac{H}{tg\alpha_1}) = 10m$$

$$d = 0.3\Delta + m + L_1 + \frac{H_1}{tg\alpha_2} = 9 + 10 + 15 + \frac{40}{tg45} = 74m$$

۴- محاسبهٔ L:

$$L = \frac{d}{\cos\alpha_2} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2\alpha_2} - \frac{H^2}{\sin^2\alpha_2}} = \frac{74}{\cos 45} - \sqrt{\left(\frac{74}{\cos 45}\right)^2 - \left(\frac{30}{\sin 45}\right)^2} = 8.98m$$

۵- محاسبهٔ q:

$$q = kL.tg\alpha_2.\sin\alpha_2 = 4.2 \times 10^{-4} \times 8.98 \times tg45 \times \sin 45 = 2.66 \times 10^{-3}\ m^3/min/m$$

نکته: در رابطهٔ تعیین L، مقدار H نمایشگر اختلاف هد بالادست و پائین‌دست است، لذا اگر آب در پائین‌دست در جایی بالاتر از کف سد قرار گرفت باید در تعیین H آنرا منظور نمود.

www.PnuEB.com

www*.PnuEB*.com

فصل ۵

مفهوم تنش مؤثر

www.PnuEB.com

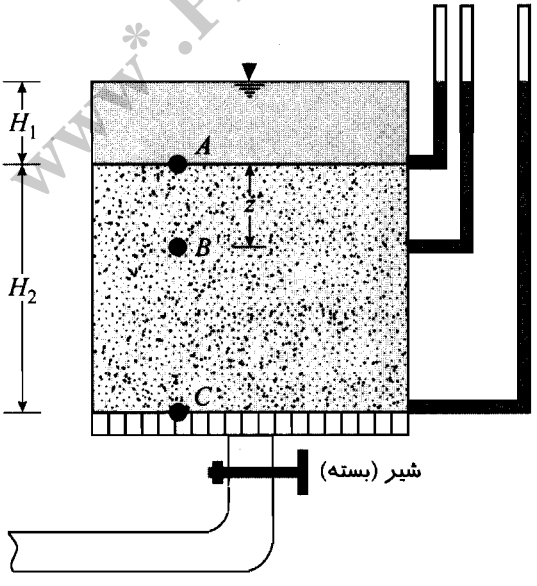
همان‌طور که در فصل دوم بیان شد، خاک در شرایط طبیعی متشکل از یک سیستم سه‌فازه (قسمت جامد، آب و هوا) می‌باشد، لذا قسمتی از نیرویی که بر یک تودهٔ خاک وارد می‌شود (این نیرو لزوماً یک نیروی خارجی نیست، بلکه وزن تودهٔ بالای خاک هر نقطه از خاک را نیز شامل می‌شود) توسط آب بین دانه‌ها تحمل می‌شود (صرفنظر از اثر هوا) و قسمت دیگر توسط دانه‌های جامد خاک، که به این قسمت از تنش وارده، تنش مؤثر می‌گویند. پس برای تعیین تنش مؤثر در هر نقطه از خاک کافیست فشار آب حفره‌ای (فشار هیدرواستاتیک) در آن نقطه را از تنش کل وارده به آن نقطه‌کم کنیم یعنی:

(تنش مؤثر) σ' = (تنش کل) σ − (فشار آب حفره‌ای) u

البته ثابت می‌شود که مقدار بدست آمده از رابطهٔ فوق با ضرب وزن مخصوص غوطه‌وری خاک در عمقی که تنش مؤثر آن موردنظر است یکسان خواهد بود. یا به عبارتی:

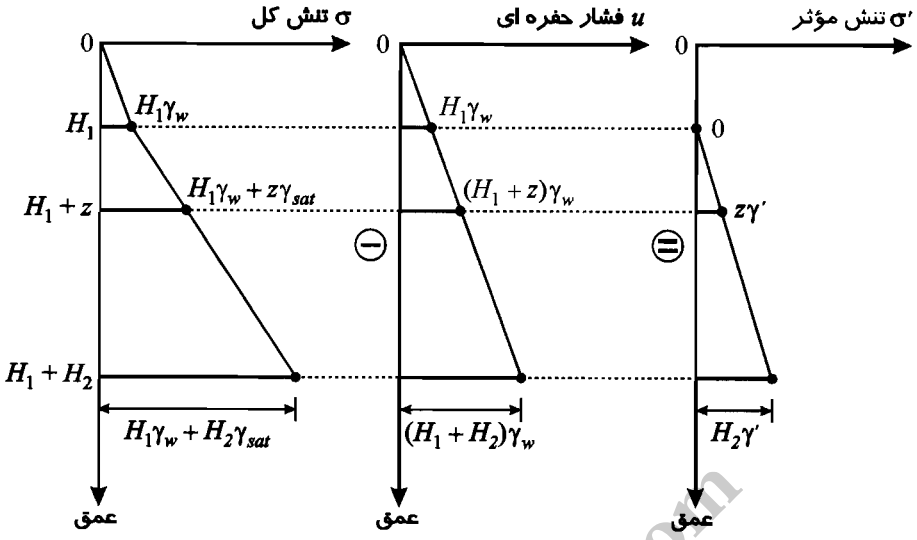
$$\sigma' = \gamma' \times z$$

توجه شود روابط فوق، زمانی برقرارند که آب در خاک جریان نداشته باشد یا به عبارت دیگر اگر پیزومترهایی در نقاط مختلف خاک قرار دهیم ارتفاع صعود آب در آنها یکسان باشد و افت بار آبی‌ای که منجر به جریان آب شود وجود نداشته باشد. (به شکل زیر توجه کنید)



در شکل زیر نمودار تغییرات تنش کل، فشار آب حفره‌ای و تنش مؤثر با عمق را برای تودهٔ خاک فوق مشاهده می‌کنید:

www.*PnuEB*.com



فشار تراوش

همانطور که قبلاً هم بیان شد اگر بین دو انتهای یک تودهٔ‌خاک (یا بین هر دو نقطهٔ مشخصی) اختلاف بار آبی وجود داشته باشد در آنصورت آب در خاک به جریان خواهد افتاد. در این حالت برحسب امتداد حرکت آب، تنش مؤثر ممکنست کم و یا زیاد شود، مقداری که در اثر جریان آب به تنش مؤثر اضافه و یا از آن کم می‌شود را فشار تراوش می‌گویند که از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$P = iz\gamma_w$$

که در این رابطه: P = فشار تراوش

i = گرادیان هیدرولیکی $(\frac{h}{L})$

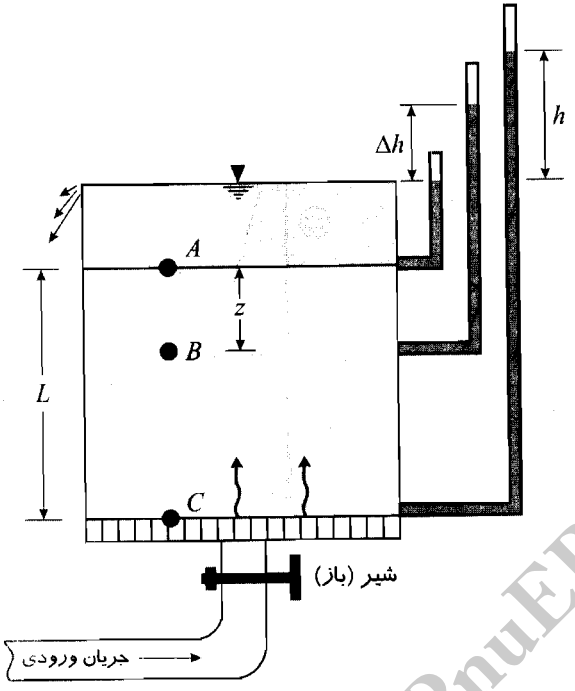
z = عمق نقطهٔ مورد نظر از سطح خاک

γ_w = وزن مخصوص آب

- توجه شود اگر فشار تراوش را در سطح مقطع خاک ضرب کنیم نیروی تراوش و یا نیروی زهاب بدست می‌آید.

الف) جریان آب رو به بالا می‌باشد: در این حالت فشار تراوش از تنش مؤثر در حالت سکون $(z\gamma')$ کم می‌شود (به شکل زیر توجه کنید)

www.*PnuEB.*com

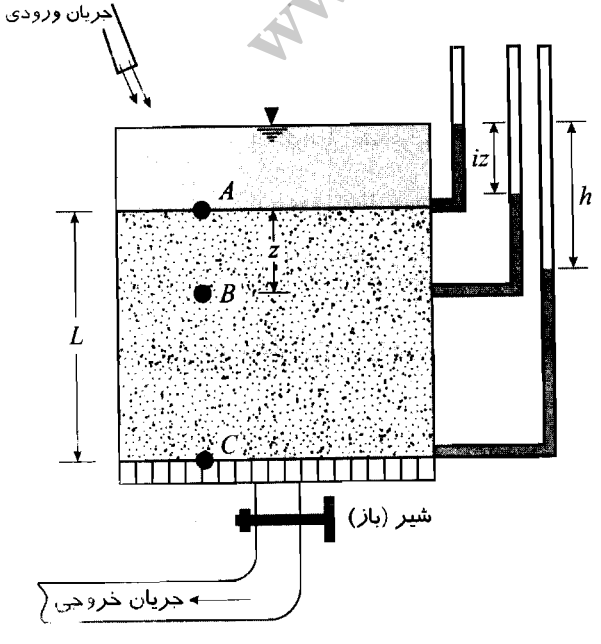


اختلاف ارتفاع پیزومترها	طول مسیری که آب طی‌کرده
h	L
Δh	z

$$\Rightarrow \Delta h = \frac{h.z}{L} = \frac{h}{L}.z = i.z$$

$$\Rightarrow \boxed{\sigma'_B = z.\gamma' - i.z.\gamma_w}$$

ب) جریان آب رو به پائین می‌باشد: در این حالـت فشار تراوش با مقدار $\gamma' z$ جمع می‌شود تا تنش مؤثر در عمق z بدست آید (به شکل زیر توجه کنید)



$$\boxed{\sigma'_B = z.\gamma' - i.z.\gamma_w}$$

www.PnuEB.com

جوشش یا رگاب

همان‌طور که در حالت الف قسمت پیش بیان شد، زمانیکه آب به سمت بالا جریان دارد از مقدار تنش مؤثر $(\gamma' z)$ کاسته می‌شود، حال اگر دبی جریان آب افزایش یابد (مثلاً شیر انتهایی شکل قبل را با فشار زیادی باز کنیم)، طبق رابطهٔ $q = kiA$ به علت ثابت‌بودن k و A با زیادشدن i ، q نیز افزایش می‌یابد که این منجر به بزرگ‌شدن فشار تراوش $(P = iz\gamma_w)$ می‌شود. حال اگر دبی آنقدر زیاد شود بطوریکه $iz\gamma_w$ با $z\gamma'$ برابر شود در آنصورت تنش مؤثر در عمق موردنظر(z) صفر خواهد گشت که منجر به ناپایداری تودهٔ خاک می‌گردد. به این پدیده، جوشش و یا وضعیت سریع و یا رگاب (piping) گفته می‌شود.

$$\sigma' = 0: \quad z\gamma' - iz\gamma_w = 0$$

$$\Rightarrow \quad i = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

به گرادیان هیدرولیکی بدست آمده در این شرایط، گرادیان هیدرولیکی بحرانی می‌گویند و با i_{cr} نشان می‌دهند:

$$\boxed{i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}} \qquad \xrightarrow{\text{ثابت می‌شود}} \qquad i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

برای اغلب خاک‌ها، مقدار i_{cr} بین 0.9 تا 1.1 با متوسطی حدود 1 تغییر می‌کند.

همانطور که بیان شد، پدیدهٔ جوشش منجر به ناپایداری خاک می‌گردد لذا برای اطمینان از وضعیت خاک در برابر این پدیده، ضریب اطمینانی برای سازه‌های درگیر با این مسئله (همانند پای سپرهای کوبیده شده در خاک و یا به هنگام گودبرداری در خاکی مرطوب) مطرح می‌شود.

ضریب اطمینان‌های مختلفی توسط افراد مختلف (در برابر پدیدهٔ بالازدگی یا جوشش) مطرح گردیده است. به عنوان نمونه، ترزاقی با انجام آزمایشات متعدد چنین نتیجه‌گیری کرد که بالازدگی به علت نشت در پائین دست سپرها، معمولاً در فاصلهٔ $\frac{D}{2}$ از سپر رخ می‌دهد (D عمق فرورفتهٔ سپر در لایهٔ نفوذپذیر است) لذا ضریب اطمینان در برابر جوشش را به فرم زیر ارائه داد:

$$F.S = \frac{\gamma'}{i_{ave} \cdot \gamma_w}$$

که در آن i_{ave} گرادیان هیدرولیکی متوسط در مستطیلی از تودهٔ خاک پائین دست به طول D و عرض $\frac{D}{2}$ می‌باشد. (در عمل برای ایمنی سپر بایستی $F.S \geq (4-5)$ باشد)

همچنین «هارزا» رابطهٔ زیر را برای تعیین ضریب اطمینان در مقابل جوشش ارائه داد:

$$F.S = \frac{i_{cr}}{i_{ex}} > (3-4)$$

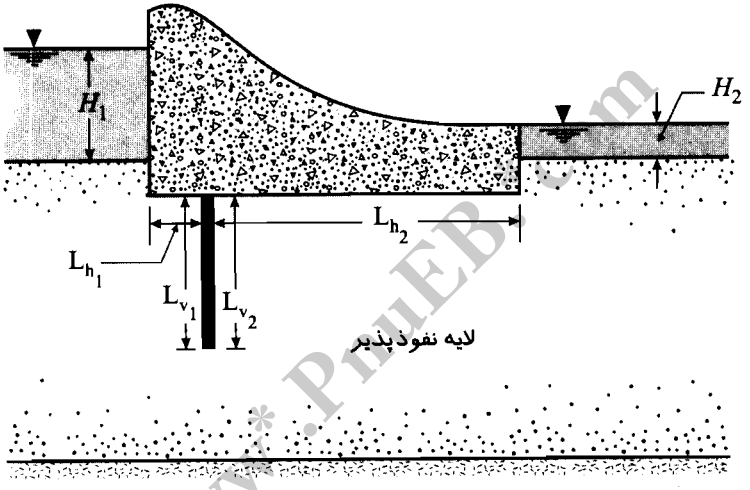
www.PnuEB.com

که در آن i_{cr} = شیب بحرانی $(\frac{\gamma'}{\gamma_w})$

i_{ex} = شیب هیدرولیکی خروجی، که «هار» در اطراف یک ردیف سپرکوبیده شده، رابطهٔزیر را برای آن پیشنهاد داد:

$$i_{ex} = \frac{1}{\pi} \times \frac{\text{حداکثر بار هیدرولیکی}}{\text{عمق نفوذ سپر}}$$

علاوه بر این دو روش، برای کنترل رگاب می‌توان از روش خزشی «لین» استفاده کرد:



$$\text{طول خزشی } L_w = \frac{1}{3}(\Sigma L_h) + \Sigma L_v$$

با داشتن طول خزشی، نسبت وزنی خزش را از رابطهٔ زیر بدست می‌آوریم:

$$\text{نسبت وزنی خزش} = \frac{L_w}{H}$$

$$(H = H_1 - H_2)$$

آنگاه برای ایمنی در مقابل رگاب، لین پیشنهاد می‌کند که نسبت وزنی خزش بایستی بزرگتر یا مساوی مقادیر پیشنهادی زیر (با توجه به مصالح خاک) باشد:

نوع مصالح	ضریب خزشی وزنی ایمن
ماسهٔ خیلی ریز یا لای	8.5
ماسهٔ ریز	7
ماسهٔ متوسط	6
ماسهٔ درشت	5
شن ریز	4
شن درشت	3
رس نرم یا متوسط	2 یا 3
رس سخت	1.8

www.PnuEB.com

موئینگی در خاک

همانطور که از فیزیک می‌دانیم اگر لولهٔ باریکی را در ظرف آبی قرار دهیم، آب از این لولهٔ باریک (موئین) بالا خواهد آمد و همتراز سطح آب درون ظرف نخواهد بود. وضعیت مشابهی از این پدیده در خاک وجود دارد بطوریکه، فضای حفرات پیوستهٔ موجود در خاک می‌توانند بصورت دسته‌ای از لوله‌های موئین با سطح مقطع متغیر عمل کنند. لذا آب در آنها صعود کرده و بالاتر از سطح آب زیرزمینی خواهد ایستاد.

«هازن» رابطه‌ای برای تعیین تقریبی ارتفاع صعود موئینگی به شکل زیر ارائه داده است:

$$h_1(mm) = \frac{C(mm^2)}{eD_{10}(mm)}$$

که در این رابطه: C = ثابتی بین 10 تا 50 میلیمترمربع

e = نسبت تخلخل

D_{10} = اندازهٔ مؤثر برحسب میلیمتر

همانطور که از فیزیک به خاطر دارید هر چقدر قطر لولهٔ موئین بزرگتر باشد ارتفاع صعود موئین در آن کمتر است با همین استدلال می‌توان نتیجه گرفت هر چقدر خاک درشت‌دانه‌تر باشد چون حفرات بزرگتری بین دانه‌ها وجود دارد پس ارتفاع صعود موئینه کمتر خواهد بود.

توجه: فشار آب حفره‌ای در ناحیهٔ صعود موئینگی، منفی خواهد بود و از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$u = -S_r.h.\gamma_w$$

که در آن S_r = درجهٔ اشباع خاک در محدودهٔ کاپیلاری (موئینگی)

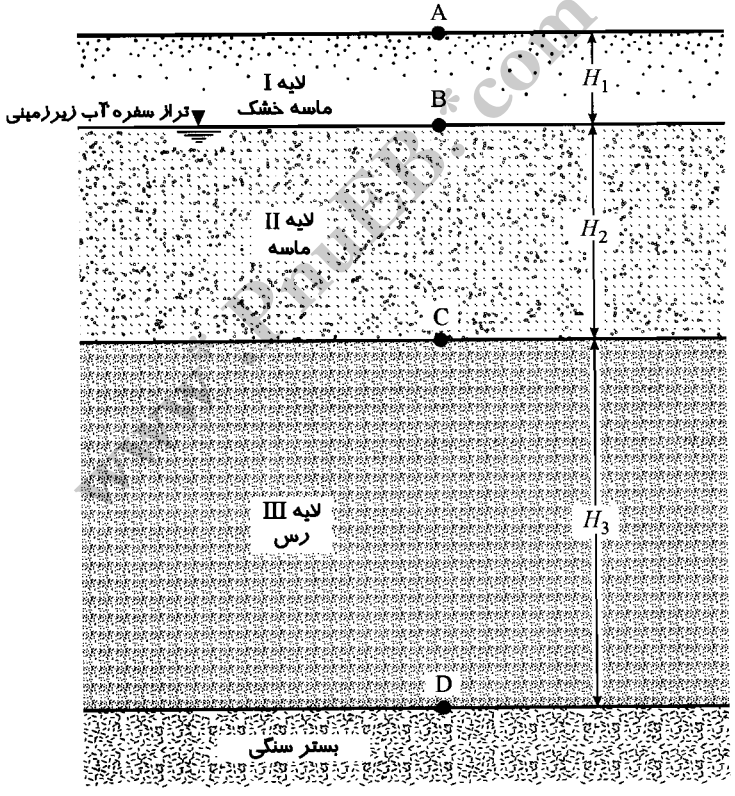
h = ارتفاع نقطهٔ موردنظر از سطح آب زیرزمینی می‌باشد. (به مسئلهٔ ۵-۱۳ دقت کنید)

www.PnuEB.com

۵-۱ در شکل، نیمرخ یک خاک لایه‌ای نشان داده شده است. ضخامت و وزن مخصوص لایه‌ها به‌شرح زیر است:

شمارهٔ لایه	ضخامت (m)	وزن مخصوص (kN/m^3)
I	$H_1 = 2.7$	$\gamma_{dry} = 16$
II	$H_2 = 6.3$	$\gamma_{sat} = 19.5$
III	$H_3 = 10.8$	$\lambda_{sat} = 20.5$

مطلوب است محاسبهٔ مقادیر تنش‌های کل σ، فشارهای حفره‌ای u و تنشهای مؤثر σ′ در نقاط A، B، C و D. نمودار تغییرات مقادیر فوق را در عمق رسم کنید.



نقطهٔ A:

$\sigma = 0$ تنش کل

$u = 0$ فشار آب حفره‌ای

$\sigma' = 0$ تنش مؤثر

نقطهٔ *B*:

$$\sigma = H_1 \times \gamma_{dry} = 2.7 \times 16 = 43.2 \, {}^{kN}/_{m^2}$$

$$u = 0$$

$$\sigma' = \sigma - u = 43.2 \, {}^{kN}/_{m^2}$$

نقطهٔ *C*:

$$\sigma = H_1 \times \gamma_{dry} + H_2 \times \gamma_{sat)_2} = 43.2 + 6.3 \times 19.5 = 166.05 \, {}^{kN}/_{m^2}$$

$$u = H_2 \times \gamma_w = 6.3 \times 9.81 = 61.8 \, {}^{kN}/_{m^2}$$

$$\sigma' = \sigma - u = 166.05 - 61.8 = 104.25 \, {}^{kN}/_{m^2}$$

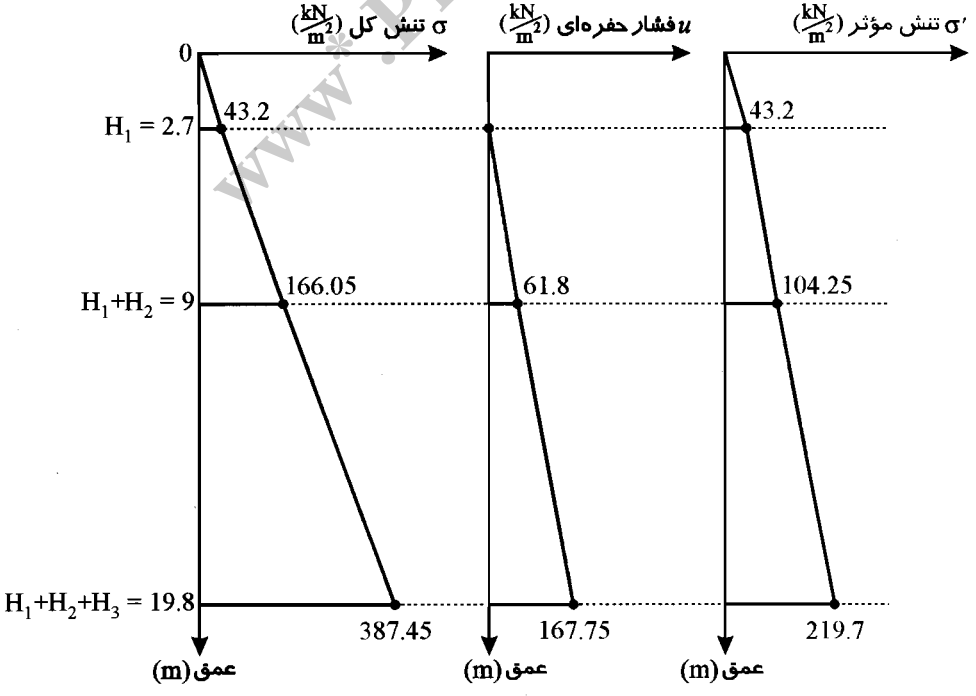
نقطهٔ *D*:

$$\sigma = H_1 \times \gamma_{dry} + H_2 \gamma_{sat)_2} + H_3 \gamma_{sat)_3} = 166.05 + 10.8 \times 20.5 = 387.45 \, {}^{kN}/_{m^2}$$

$$u = (H_2 + H_3) \times \gamma_w = (6.3 + 10.8) \times 9.81 = 167.75 \, {}^{kN}/_{m^2}$$

$$\sigma' = \sigma - u = 387.45 - 167.75 = 219.7 \, {}^{kN}/_{m^2}$$

حال می‌توان نمودار تغییرات σ و u و σ' را در عمق خاک رسم کنیم:



www.PnuEB.com

۵-۲ مسئلهٔ ۵-۱ را با داده‌های زیر تکرار کنید.

شمارهٔ لایه	ضخامت (m)	وزن مخصوص (kN/m^3)
I	$H_1 = 4$	$\gamma_{dry} = 16.2$
II	$H_2 = 1.5$	$\gamma_{sat} = 18.4$
III	$H_3 = 9$	$\gamma_{sat} = 19.81$

نقطهٔ A:

$$\sigma = u = \sigma' = 0$$

نقطهٔ B:

$$\sigma = 16.2 \times 4 = 64.8\ kN/m^2$$

$$u = 0$$

$$\sigma' = \sigma - u = 64.8\ kN/m^2$$

نقطهٔ C:

$$\sigma = 64.8 + 1.5 \times 18.4 = 92.4\ kN/m^2$$

$$u = 1.5 \times 9.81 = 14.72\ kN/m^2$$

$$\sigma' = 92.4 - 14.72 = 77.68\ kN/m^2$$

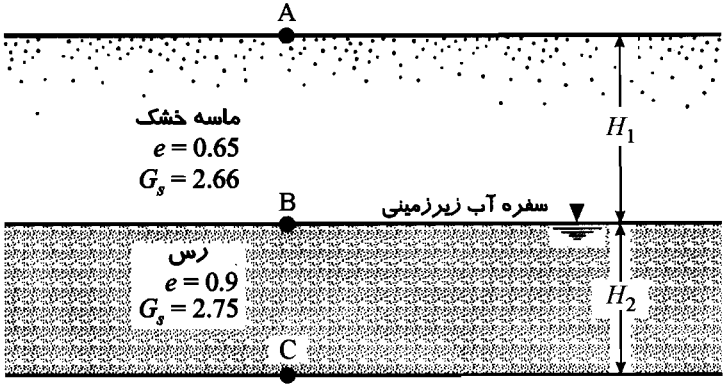
نقطهٔ D:

$$\sigma = 92.4 + 9 \times 19.81 = 270.69\ kN/m^2$$

$$u = (9 + 1.5) \times 9.81 = 103\ kN/m^2$$

$$\sigma' = \sigma - u = 270.69 - 103 = 167.69\ kN/m^2$$

۵-۳ مطلوب است رسم تغییرات تنش کل، فشار آب حفره‌ای و تنش مؤثر در عمق برای نیمرخ خاک لایه‌ای نشان داده شده در شکل. $H_1 = 6m$ و $H_2 = 4m$



ابتدا بایستی وزن مخصوص هریک از لایه‌ها را بدست آوریم، لایهٔ اول بالاتر از سفرهٔ آب زیرزمینی است لذا γ_d آنرا بدست می‌آوریم و لایهٔ دوم زیر سفرهٔ آب زیرزمینی است لذا γ_{sat} این لایه را بدست می‌آوریم.

وزن مخصوص خشک ماسه $\gamma_d = \dfrac{G_s \gamma_w}{1+e} = \dfrac{2.66 \times 9.81}{1+0.65} = 15.81\ kN/m^3$

www.PnuEB.com

وزن مخصوص اشباع $\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)}{1+e} \times \gamma_w = \frac{(2.75+0.9)}{1+0.9} \times 9.81 = 18.84\ ^{kN}/_{m^3}$

نقاط A ، B ، C را بترتیب در سطح زمین، مرز بین ماسه و رس، انتهای لایهٔ رس انتخاب می‌کنیم.

نقطهٔ A: $\sigma = u = \sigma' = 0$

نقطهٔ B: $\sigma = H_1 \times \gamma_d = 6 \times 15.81 = 94.86\ ^{kN}/_{m^2}$

$u = 0$

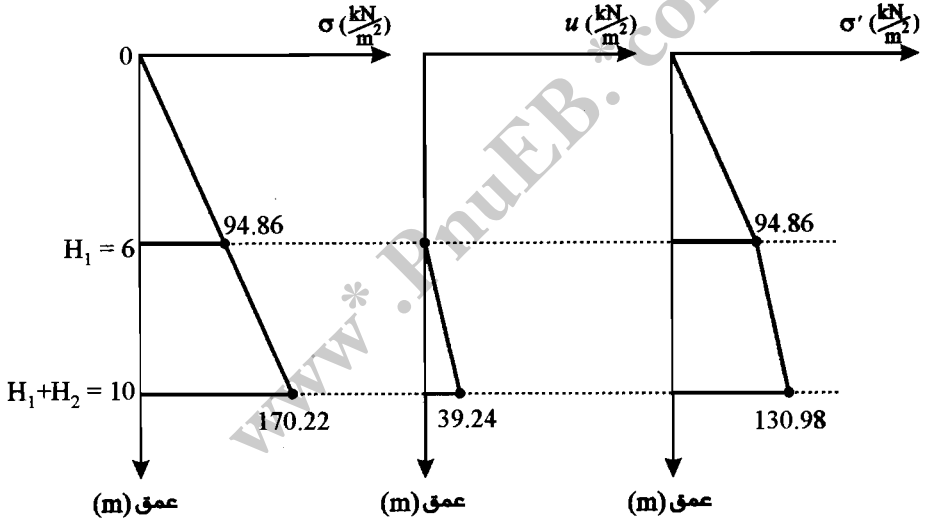
$\sigma' = \sigma - u = 94.86\ ^{kN}/_{m^2}$

نقطهٔ C: $\sigma = 94.86 + H_2 \times \gamma_{sat} = 94.86 + 4 \times 18.84 = 170.22\ ^{kN}/_{m^2}$

$u = H_2 \times \gamma_w = 4 \times 9.81 = 39.24\ ^{kN}/_{m^2}$

$\sigma' = 170.22 - 39.24 = 130.98\ ^{kN}/_{m^2}$

حال قادریم تغییرات این سه پارامتر با عمق را رسم کنیم:



www.PnuEB.com

۵-۴ مسئلهٔ ۵-۳ را با داده‌های زیر تکرار کنید:

نقطهٔ A: $\sigma = u = \sigma' = 0$

نقطهٔ B: $\sigma = 3 \times 15.81 = 47.43\ ^{kN}/_{m^2}$

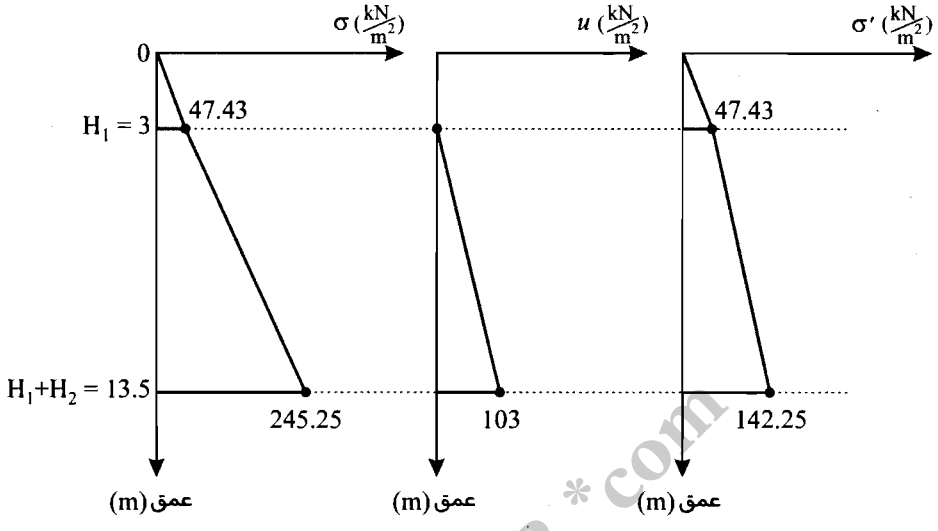
$u = 0$

$\sigma' = 47.43\ ^{kN}/_{m^2}$

نقطهٔ C: $\sigma = 47.43 + 10.5 \times 18.84 = 245.25\ ^{kN}/_{m^2}$

$u = 10.5 \times 9.81 = 103\ ^{kN}/_{m^2}$

$\sigma' = 245.25 - 103 = 142.25\ ^{kN}/_{m^2}$



۵-۵ اگر سطح آب زیرزمینی برای حالت تشریح شده در مسئلهٔ ۵-۳ به *3* متری زیر سطح زمین صعود نماید، تغییر در تنش مؤثر در زیر لایهٔ رسی چقدر خواهد بود؟

با توجه به شکل مسئلهٔ ۵-۳ مشخص است وقتی سطح آب زیرزمینی بالا بیاید قسمتی از لایهٔ ماسه اشباع خواهد گشت بنابر این:

وزن مخصوص اشباع ماسه $\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \times \gamma_w = \frac{(2.66+0.65)}{1+0.65} \times 9.81 = 19.68\ ^{kN}/_{m^3}$

زیرا لایهٔ رسی، همان نقطهٔ C می‌باشد:

تنش کل $\sigma = (6-3) \times 15.81 + 3 \times 19.68 + 4 \times 18.84 = 181.83\ ^{kN}/_{m^2}$

فشار آب حفره‌ای $u = (H_2 + 3) \times \gamma_w = (4+3) \times 9.81 = 68.67\ ^{kN}/_{m^2}$

تنش مؤثر $\sigma' = \sigma - u = 181.83 - 68.67 = 113.16\ ^{kN}/_{m^2}$

در مسئلهٔ ۵-۳ به دست آوردیم که $\sigma'_c = 130.98\ ^{kN}/_{m^2}$ لذا مشاهده می‌شود با بالا آمدن سطح آب زیرزمینی مقدار تنش مؤثر کاهش می‌یابد (این یک نتیجه‌گیری کلی و مهم می‌باشد) و این کاهش برابر خواهد بود با:

$\Delta\sigma' = 130.98 - 113.16 = 17.82\ ^{kN}/_{m^2}$

۶-۵ با مراجعه به شکل ۵-۳ الف که در آن یک نشت به سمت بالا در خاک وجود دارد. داده‌های زیر را در نظر بگیرید:

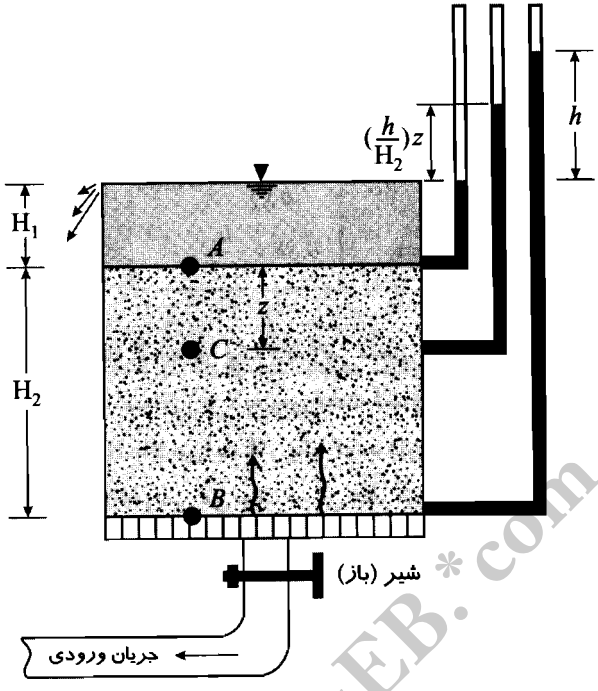
$\mathbf{H_1 = 0.45m}$ و $\mathbf{H_2 = 1.35m}$ و $\mathbf{h = 0.53m}$ و $\gamma_{sat} = 19.6\ ^{kN}/_{m^3}$

با توجه به داده‌های فوق، مطلوب است:

الف) محاسبهٔ تنش کل، فشار حفره‌ای و تنش مؤثر در C (توجه $z = 2m$)

ب) محاسبهٔ نیروی نشت رو به بالا بر واحد حجم خاک

www.PnEB.com



الف) نقطهٔ C : دقت کنید چون H_2 را 1.35 متر داده است لذا z را 0.2 متر فرض می‌کنیم

تنش کل $\sigma = H_1\gamma_w + z\gamma_{sat} = 0.45\times 9.81 + 0.2\times 19.6 = 8.33\,^{kN}/_{m^2}$

فشار آب حفره‌ای $u = (H_1 + z + \frac{h}{H_2}z)\times\gamma_w = (0.45 + 0.2 + \frac{0.53}{1.35}\times 0.2)\times 9.81 = 7.15\,^{kN}/_{m^2}$

تنش مؤثر $\sigma' = \sigma - u = 8.33 - 7.15 = 1.18\,^{kN}/_{m^2}$

ب)

نیروی تراوش $P = i\times\gamma_w$

$$i = \frac{h}{H_2} = \frac{0.53}{1.35} = 0.39$$

$$P = 0.39\times 9.81 = 3.82\,^{kN}/_{m^2}$$

۵-۷ در مسئلهٔ ۵-۶ دبی نشت رو به بالا را محاسبه نمائید. ضریب نفوذپذیری خاک $k = 0.1\,^{cm}/_{sec}$ و سطح مقطع مخزن و سطح مقطع مخزن $0.48m^2$ می‌باشد.

دبی نشت $q = k\times i\times A = (0.1\times 10^2\,^{m}/_{sec})\times(0.39)\times(0.48m^2) = 1.87\times 10^{-4}\,^{m^3}/_{sec}$

۵-۸ با مراجعه به شکل ۵- ۳- الف و با فرض:

$k = 0.1\,^{cm}/_{sec}$ و سطح مقطع مخزن و $= 0.5m^2$ و $\gamma_{sat} = 18.5\,^{kN}/_{m^3}$ و $H_2 = 1.2m$ و $H_1 = 0.7m$

مطلوب است تعیین مقدار h که باعث جوشش می‌شود.

همانطور که می‌دانید پدیدهٔ جوشش یا رگاب زمانی رخ می‌دهد که گرادیان هیدرولیکی به حالت بحرانی (i_{cr})

www.PiuEB.com

برسد و یا به عبارتی زمانیکه تنش مؤثر برابر با صفر شود.

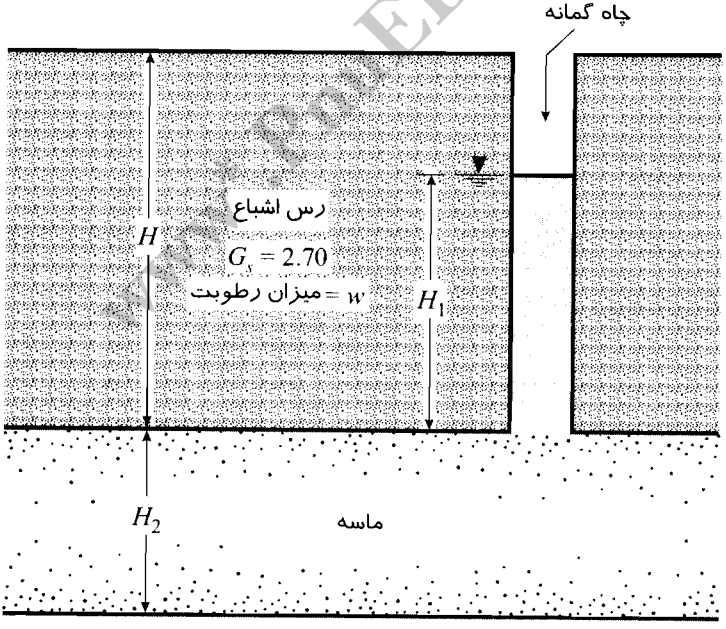
$$\sigma'_c = z\gamma' - i_{cr} z\gamma_w = 0 \quad \Rightarrow \quad i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w}$$

$$\Rightarrow \quad i_{cr} = \frac{18.5 - 9.81}{9.81} = 0.88$$

از طرفی داریم: $i = \frac{\text{افت بار}}{\text{طول}} = \frac{h}{H_2} \quad \Rightarrow \quad 0.88 = \frac{h}{1.2} \quad \Rightarrow \quad h = 1.056m$

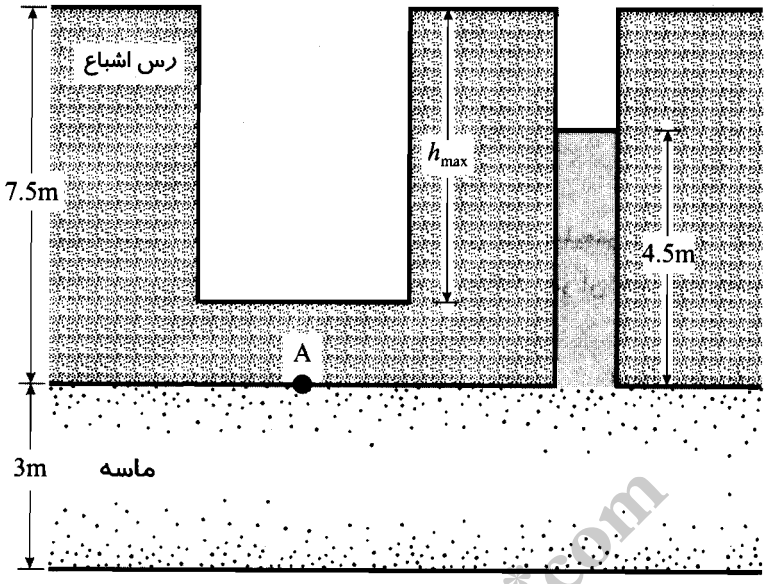
۹-۵ مطابق شکل، یک چاه گمانه در یک لایه رس سخت اشباع حفر شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که لایهٔ ماسه‌ای زیر لایهٔ رس تحت فشار آرتزین می‌باشد. تحت این فشار، ارتفاع آب در چاه گمانه به اندازهٔ H_1 بالا می‌آید. اگر یک گودبرداری روباز در لایهٔ رسی انجام شود، حداکثر ارتفاعی که بدون بالازدگی لایهٔ رسی می‌تواند در آن حفر شود، چقدر است؟

داریم: $\omega = 40\%$ و $H_2 = 3m$ و $H_1 = 4.5m$ و $H = 7.5m$



وزن مخصوص اشباع لایهٔ رسی $\gamma_{sat} = \frac{G_s(1+\omega)}{1+\omega G_s} \times \gamma_w = \frac{2.7(1+0.4)}{1+0.4\times 2.7} \times 9.81 = 17.83\ kN/m^3$

با عملیات گودبرداری، فشار روباز را در حقیقت کم می‌کنیم و با اینکار تنش کل (σ) و به تبع آن تنش مؤثر (σ') رو به کاهش می‌رود تا اینکه (σ') برابر با صفر می‌شود که این آغاز پدیدهٔ بالازدگی یا همان جوش می‌باشد، پس بایستی ارتفاع ماکزیمم حالت گودبرداری که به ازای آن تنش مؤثر صفر می‌شود را محاسبه نمائیم:



$$\sigma_A = (7.5 - h_{max}) \times 17.83$$

$$u_A = 4.5 \times 9.81 = 44.145\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$\sigma'_A = (7.5 - h_{max}) \times 17.83 - 44.145$$

$$\sigma'_A = 0 \Rightarrow 7.5 - h_{max} = 2.476 \Rightarrow h_{max} = 5.024m$$

۱۰-۵ مسئلهٔ ۵- ۹ را با داده‌های زیر مجدداً حل کنید:

$H = 6m$ و $H_1 = 3.1m$ و $H_2 = 6m$ و $\omega = 28\%$

رس $\gamma_{sat} = \dfrac{2.7(1+0.28)}{1+0.28\times 2.7} \times 9.81 = 19.31\ ^{kN}/_{m^3}$

$$\sigma_A = (H - h_{max}) \times \gamma_{sat} = (6 - h_{max}) \times 19.31$$

$$u_A = H_1 \times \gamma_w = 3.1 \times 9.81 = 30.41\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A = (6 - h_{max}) \times 19.31 - 30.41$$

$$\sigma'_A = 0 \Rightarrow 6 - h_{max} = 1.57$$

$$\Rightarrow h_{max} = 4.43m$$

۱۱-۵ مطلوب است محاسبهٔ گرادیان هیدرولیکی لازم برای ایجاد پدیدهٔ جوشش در لایهٔ ماسه‌ای.
برای لایهٔ ماسه‌ای $e = 0.65$ و $G_s = 2.65$ می‌باشد.

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \times \gamma_w = \frac{2.65 + 0.65}{1 + 0.65} \times 9.81 = 19.62\ ^{kN}/_{m^3}$$

www.PnuEB.com

زمانیکه پدیدهٔ جوشش رخ می‌دهد i به i_{cr} می‌رسد که i_{cr} ازرابطهٔ زیر بدست می‌آید:

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

وزن مخصوص غوطه‌وری $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 19.62 - 9.81 = 9.81\,kN/m^3$

$$\Rightarrow i_{cr} = \frac{9.81}{9.81} = 1$$

۱۲-۵ با استفاده از آزمایش دانه‌بندی، اندازهٔ مؤثر ماسه‌ای 0.1 میلیمتر به دست آمده است. با استفاده از رابطهٔ هازن، مطلوب است محاسبهٔ ارتفاع صعود موئینگی در آن ماسه برای نسبت تخلخل 0.55.

اندازهٔ مؤثر : $D_{10} = 0.1mm$

$$e = 0.55$$

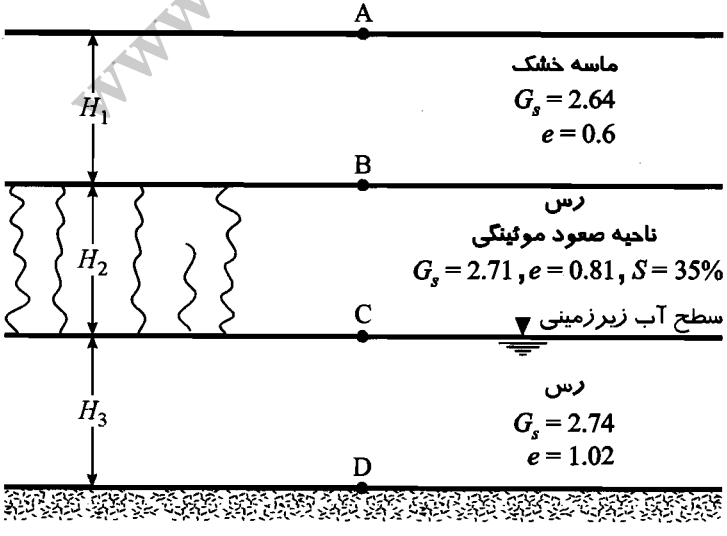
رابطهٔ هازن : $h_l(mm) = \frac{C(mm^2)}{eD_{10}(mm)} = \frac{30}{0.55 \times 0.1} = 545.45mm$

توجه: C مقدار ثابتی است که بین 10 تا 50 میلیمتر مربع تغییر می‌کند، که ما مقدار 30 را بطور متوسط برای آن اختیار نموده‌ایم.

۱۲-۵ در شکل، نیمرخ یک خاک نشان داده شده است. داریم:

$\mathbf{H_1 = 2m}$ و $\mathbf{H_2 = 1.8m}$ و $\mathbf{H_3 = 3.2m}$

مطلوب است رسم نمودارهای تغییرات σ ، u و σ' در عمق.



لایهٔ ماسه‌ای $\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} = \frac{2.64 \times 9.81}{1+0.6} = 16.2\,kN/m^3$

لایهٔ وسطی (رس در معرض موئینگی) $\gamma = \frac{G_s + eS_r}{1+e} \times \gamma_w = \frac{2.71 + 0.81 \times 0.35}{1+0.81} \times 9.81 = 16.22\,kN/m^3$

www.*PnuEB.*com

لایهٔ انتهایی (رس اشباع) $\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \times \gamma_w = \frac{2.74 + 1.02}{1 + 1.02} \times 9.81 = 18.26\ ^{kN}/_{m^3}$

تعیین تنشها در نقاط A ، B ، C و D :

سطح زمین (نقطهٔ A) :

$$\sigma = 0$$
$$u = 0$$
$$\sigma' = 0$$

عمق H_1 (نقطهٔ B) :

$$\sigma = 16.2 \times 2 = 32.4\ ^{kN}/_{m^2}$$

$u = 0$ (بلافاصله بالای نقطه)

$u = -S_r \times H_2 \times \gamma_w = -0.35 \times 1.8 \times 9.81 = -6.18\ ^{kN}/_{m^2}$ (بلافاصله پائین نقطه)

$\sigma' = 32.4 - 0 = 32.4\ ^{kN}/_{m^2}$ (بلافاصله بالای نقطه)

$\sigma' = 32.4 - (-6.18) = 38.58\ ^{kN}/_{m^2}$ (بلافاصله پایین نقطه)

عمق $H_1 + H_2$ (نقطهٔ C) :

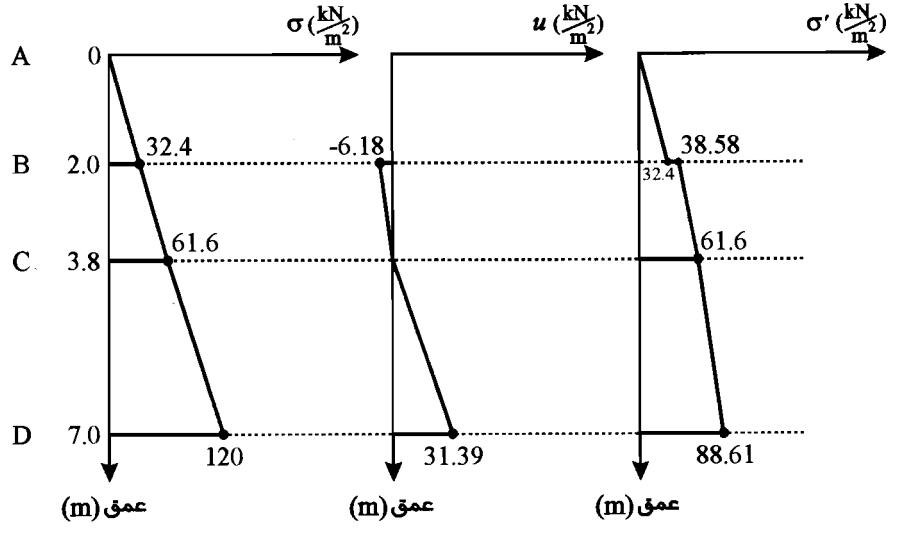
$$\sigma = 32.4 + (16.22) \times (1.8) = 61.6\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$u = 0$$
$$\sigma' = 61.6 - 0 = 61.6\ ^{kN}/_{m^2}$$

عمق $H_1 + H_2 + H_3$ (نقطهٔ D) :

$$\sigma = 61.6 + (18.26)(3.2) = 120\ ^{kN}/_{m^2}$$
$$u = H_3 \times \gamma_w = 3.2 \times 9.81 = 31.39\ ^{kN}/_{m^2}$$
$$\sigma' = 120 - 31.39 = 88.61\ ^{kN}/_{m^2}$$

در اشکال زیر نمودار تغییرات σ ، u و σ' با عمق را مشاهده می‌نمائید.



www.PnuEB*.com

۵-۱۴ مسئلهٔ ۵- ۱۳ را برای داده‌های زیر تکرار کنید:

$H_1 = 1.5m$ و $H_2 = 2.4m$ و $H_3 = 7.65m$

سطح زمین (نقطهٔ A) :

$\sigma = 0$

$u = 0$

$\sigma' = 0$

عمق H_1 (نقطهٔ B) :

$\sigma = 16.2 \times 1.5 = 24.3\ kN/m^2$

$v = 0$ (بلافاصله بالای نقطه)

$v = -0.35 \times 2.4 \times 9.81 = -8.24\ kN/m^2$ (بلافاصله پایین نقطه)

$\sigma' = 24.3\ kN/m^2$ (بلافاصله بالای نقطه)

$\sigma' = 24.3 - (-8.24) = 32.54\ kN/m^2$ (بلافاصله پایین نقطه)

عمق $H_1 + H_2$ (نقطهٔ C) :

$\sigma = 24.3 + 2.4 \times 16.22 = 63.23\ kN/m^2$

$u = 0$

$\sigma' = 63.23\ kN/m^2$

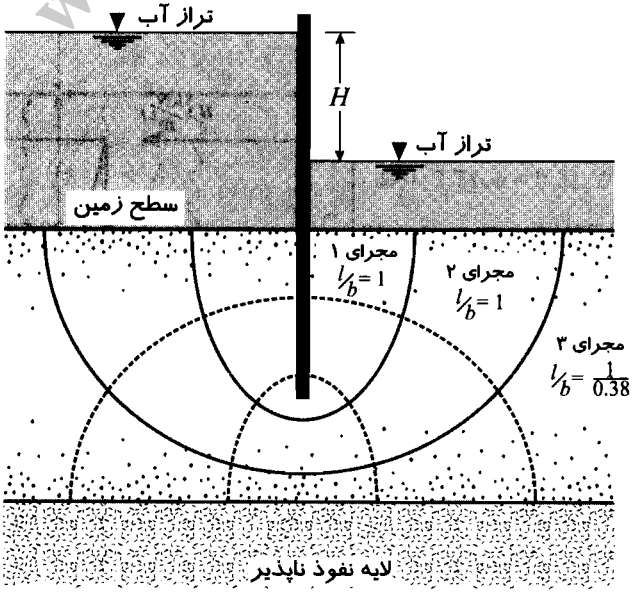
عمق $H_1 + H_2 + H_3$ (نقطهٔ D) :

$\sigma = 63.23 + 7.65(18.26) = 202.92\ kN/m^2$

$u = 7.65 \times 9.81 = 75.05\ kN/m^2$

$\sigma' = 202.92 - 75.05 = 127.87\ kN/m^2$

۵-۱۵ مطلوب است محاسبهٔ ضریب اطمینان در مقابل بالازدگی در پایین دست یک ردیف سپر نشان داده شده در شکل (۴- ۲۴). عمق نفوذ سپر لایهٔ نفوذپذیر مساوی 4.5 متر و $\gamma_{sat} = 19.5\ kN/m^3$ می‌باشد.



www.PnuEB.com

عمق نفوذ سپر $D = 4.5m$ $\gamma_{sat} = 19.6\ ^{kN}/_{m^3}$

فرض: اختلاف سطح آب موجود در بالادست و پائین دست $H = 5.5m$

حل به روش هارزا (1935):

$$F.S = \frac{i_{cr}}{i_{ex}}$$

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{19.6 - 9.81}{9.81} \simeq 1$$

$$i_{ex} = \frac{1}{\pi} \times \frac{\text{حداکثر بار هیدرولیکی}}{\text{عمق نفوذ سپر}} = \frac{1}{\pi} \times \frac{5.5}{4.5} = 0.389 \quad \text{(طبق رابطهٔ «هار»)}$$

$$F.S = \frac{1}{0.389} = 2.57 < (4 \text{ تا } 3)$$

⇐ طبق این روش (با فرض $H = 5.5m$) این ضریب اطمینان جوابگوی ایمنی سپرکوبی انجام شده نمی‌باشد.

روش دوم: با استفاده از روش خزشی لین (Lane):

$$L_w = \frac{1}{3}(\Sigma L_h)\Sigma L_v = \frac{1}{3}(0) + 2 \times 4.5 = 9m$$

$$\text{نسبت وزنی خزش} = \frac{L_w}{H} = \frac{9}{5.5} = 1.64$$

با توجه به جدول مربوط به این روش (به توضیحات ابتدایی فصل مراجعه شود)، مشاهده می‌شود سپر کوبیده شده در هیچ یک از خاک‌ها ایمن نیست.

روش سوم: با استفاده از روش ترزاقی؛ برای تعیین ضریب اطمینان در مقابل بالازدگی با این روش بایستی شکل (۴- ۲۴) با مقیاس کشیده شده و پایداری ناحیه‌ای به عرض $\frac{D}{2}$ و ارتفاع D مورد ارزیابی قرار گیرد و نهایتاً ضریب اطمینان را از رابطهٔ $F.S = \frac{\gamma'}{i_{av}\gamma_w}$ بدست آورد (به عنوان تمرین، یکبار ضریب اطمینان با این روش را هم بدست آورید).

www.PnuEB.com

www*.PnuEB*.com

فصل ۷

PnuEB.*com

نشست خاک‌ها در حالت کلی به دو گروه زیر قابل تقسیم است:

۱- نشست تحکیم ناشی از تغییر حجم خاک اشباع به علت رانده شدن آبهای موجود در حفرات آن است، که خود به دو دستهٔ تحکیم اولیه و تحکیم ثانویه تقسیم می‌شود.

۲- نشست آنی یا الاستیک که ناشی از تغییر شکل الاستیک خاک، بدون هرگونه تغییری در میزان آب آن می‌باشد.

$$\text{نشست کل } S = \underbrace{S_e}_{\text{نشست آنی}} + \underbrace{S_c}_{\text{نشست تحکیم اولیه}} + \underbrace{S_s}_{\text{نشست تحکیم ثانویه}}$$

نمودار نسبت تخلخل – فشار

برای ترسیم نمودار نسبت تخلخل در برابر فشار مطابق روش گام به گام زیر عمل می‌کنیم:

گام۱- ارتفاع قسمت جامد نمونه (H_s) را محاسبه می‌کنیم

$$\text{داشتیم (از فصل دوم) : } G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{\frac{W_s}{V_s}}{\gamma_w} = \frac{\frac{W_s}{A \times H_s}}{\gamma_w}$$

$$\Rightarrow H_s = \frac{W_s}{A \times G_s \times \gamma_w}$$

گام۲- ارتفاع اولیهٔ حفرات (H_v) را تعیین می‌کنیم

$$H_v = \underbrace{H}_{\text{ارتفاع اولیه نمونه}} - H_s$$

گام۳- نسبت تخلخل اولیهٔ نمونه (e_0) را تعیین می نمائیم.

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v.A}{H_s.A} = \frac{H_v}{H_s}$$

گام۴- برای اولین دفعهٔ بارگذاری (P_1) در آزمایش تحکیم یک بعدی ادئومتر، که باعث تغییر شکل ΔH_1 می‌شود، تغییرات نسبت تخلخل (Δe_1) را محاسبه می‌نمائیم.

$$\Delta e_1 = \frac{\Delta H_1}{H_s}$$

که ΔH_1 از اختلاف اولین و آخرین قرائت مربوط به آن بارگذاری بدست می‌آید.

گام۵- بعد از تحکیم به علت افزایش فشار P_1، نسبت تخلخل جدید (e_1) را تعیین می‌نمائیم.

$$e_1 = e_0 - \Delta e_1$$

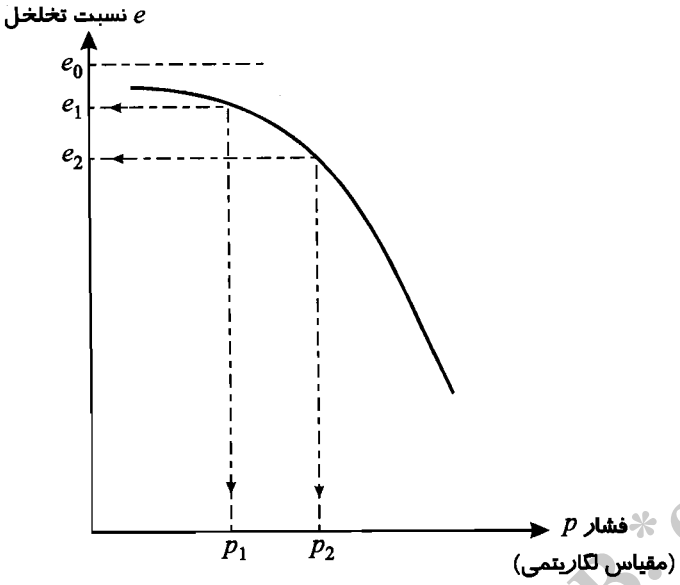
برای بارگذاری بعدی (P_2) (توجه کنید P_2 برابر بار تجمعی بر واحد سطح نمونه است) که باعث تغییر شکل اضافی ΔH_2 می‌شود، نسبت تخلخل e_2 در انتهای تحکیم را به صورت زیر بدست می‌آوریم:

$$e_2 = e_1 - \frac{\Delta H_2}{H_s}$$

به طریق مشابه، نسبت تخلخل در انتهای تحکیم هر مرحلهٔ بارگذاری قابل تعیین می‌باشد.

www.PnuEB.com

اگر در روی یک کاغذ نیمه لگاریتمی، فشار کل (P) و نسبت تخلخل نظیر (e) در انتهای تحکیم را رسم کنیم نموداری مانند شکل روبرو حاصل می‌شود.



رسهای عادی تحکیم یافته (NC) و پیش تحکیم یافته (OC)

رسهای عادی تحکیم یافته، رسهایی هستند که فشار سربار موجود بر آنها، حداکثر فشار سربار مؤثری است که نمونه درگذشته تحت تأثیر آن بوده است و امّا در مورد رسهای پیش تحکیم یافته، فشار سربار موجود بر روی آنها، کمتر از فشار سربار حداکثری است که در گذشته نمونه آنرا تجربه کرده است. به حداکثر فشار سربار مؤثر در گذشته، فشار پیش تحکیمی می‌گویند.

نسبت پیش تحکیمی (OCR) برای یک خاک به این صورت تعریف می‌شود:

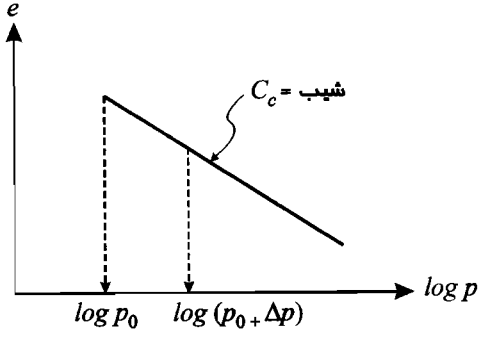
$$OCR = \frac{P_c}{P_0}$$

P_c = فشار پیش تحکیم بر روی نمونه P_0 = فشار سربار موجود بر روی نمونه

طبق تعاریف فوق: $OCR \simeq 1$ عادی تحکیم یافته و $OCR > 1$ پیش تحکیم یافته

محاسبهٔ نشست به علت تحکیم اولیه

منحنی تحکیم (نمودار e در مقابل $\log P$) برای رسهای عادی تحکیم یافته بصورت خطی با شیب C_c می‌باشد.

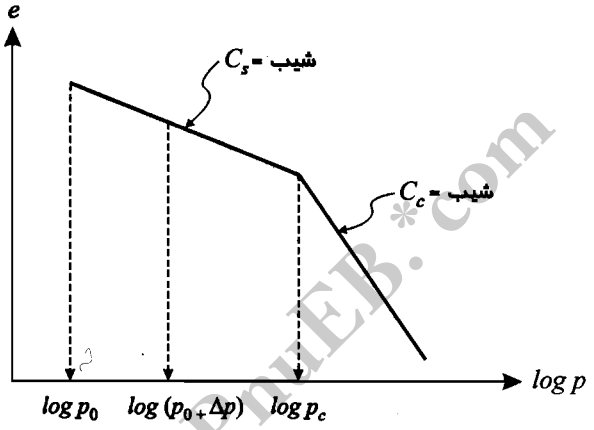


www.PnuEB.com

$$\Rightarrow S = \frac{C_c H_0}{1+e_0} log\left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0}\right)$$

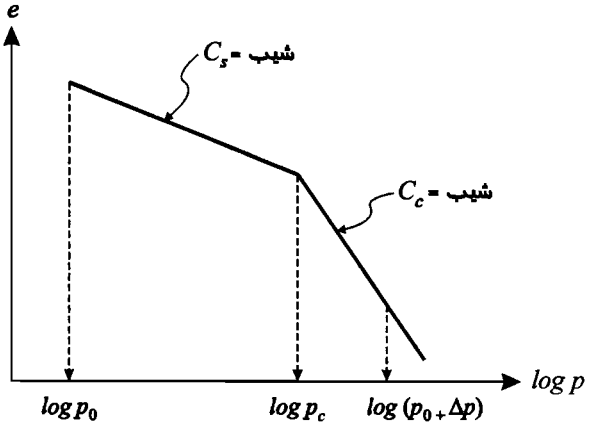
و همچنین منحنی تحکیم برای رسهای پیش تحکیم یافته، متشکل از دو قسمت خطی با شیبهای C_s و C_c می‌باشد که C_c را نشانهٔ فشردگی و C_s را نشانهٔ تورم می‌گویند. برای رسهای OC با توجه به وضعیت $P_0 + \Delta P$ نسبت به P_c دو حالت زیر ممکنست وجود داشته باشد:

الف) اگر $log\, P_c > log(P_0 + \Delta P)$



$$S = \frac{C_s H_0}{1+e_0} log(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0})$$

ب) اگر $log\, P_c < log(P_0 + \Delta P)$



$$S = \frac{C_s H_0}{1+e_0} log(\frac{P_c}{P_0}) + \frac{C_c H_0}{1+e_0} log(\frac{P_0 + \Delta P}{P_c})$$

www.*PnuEB*.com

در تمامی روابط H_0 و e_0 به ترتیب ضخامت اولیه و نسبت تخلخل اولیهٔ نمونه می‌باشند.

نکته: برای محاسبهٔ نشست تحکیمی زیر یک شالوده از رابطهٔ متوسط وزنی زیر استفاده می‌کنیم:

$$\Delta P_{ave} = \frac{\Delta P_t + 4\Delta P_m + \Delta P_b}{6}$$

که در آن ΔP_t و ΔP_m و ΔP_b بترتیب افزایش فشار در بالا، وسط و پایین لایه موردنظر خاک می‌باشند که مطابق توضیحات فصل ۶ قابل تعیین می‌باشند.

برای رسهای دست نخورده: $C_c = 0.009(LL-10)$

برای رسهای به هم خورده: $C_c = 0.007(LL-10)$

در روابط فوق LL حدمایع یا حدروانی برحسب درصد می‌باشد.

نشانهٔتورم (C_s) هم بطور قابل ملاحظه‌ای از نشانهٔ فشردگی (C_c) کوچکتر است بطوریکه می‌توان گفت:

$$C_s \simeq (\frac{1}{5} \text{ تا } \frac{1}{10})C_c$$

نشست به علت تحکیم ثانویه

در انتهای تحکیم اولیه (یعنی بعد از زایل شدن کامل فشار آب حفره‌ای اضافی و تبدیل آن به تنش مؤثر)، به علت تغییر شکل پلاستیک اسکلت خاک، مقداری نشست تحت عنوان تحکیم ثانویه رخ می‌دهد.

نشانهٔ تحکیم ثانویه $C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log(\frac{t_2}{t_1})}$

که در آن: Δe = تغییرات نسبت تخلخل

t_1 و t_2 = زمان

نشست ناشی از تحکیم ثانویه $S_s = C'_\alpha H \log(\frac{t_2}{t_1})$

که در آن $C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{1+e_p}$ و e_p نسبت تخلخل در انتهای تحکیم یافته اولیه (شروع تحکیم ثانویه) می‌باشد.

نشست الاستیک یا آنی

همانطور که قبلاً هم بیان شد بلافاصله بعد از اعمال بار، بدون آنکه تغییری در میزان رطوبت خاک بوجود آید، نشست آنی رخ می‌دهد که به لحاظ اندازه، خیلی کمتر از نشست تحکیمی می‌باشد. در خاک‌های درشت‌دانه، به علت ضریب نفوذپذیری بالای خاک نشست آنی و تحکیمی همزمان رخ می‌دهد به همین دلیل است که نشست تحکیمی در مورد چنین خاک‌هایی بحث نمی‌شود.

$$S_i = P.B.\frac{1-\mu^2}{E} I_p$$

www.PnuFB.com

که در آن: S_i (یا ρ_i)= نشست الاستیک یا آنی

P =فشار خالص مؤثر

B = عرض شالوده (یا قطر شالودهٔ دایره‌ای)

μ = ضریب پواسون

E = ضریب الاستیسیتهٔ خاک

I_p = ضریب تأثیر بدون بُعد

I_p با توجه به شکل و نوع شالوده و همچنین ضریب $m_1 = \frac{\text{طول شالوده}}{\text{عرض شالوده}}$ از جدول ۷-۵ قابل تعیین می‌باشد.

جدول ۷-۵ ضریب تأثیر برای شالوده‌ها (رابطهٔ ۷-۵۹)

		I_p		
		انعطاف‌پذیر		سخت
شکل	m_1	مرکز	گوشه	
دایره	-	1.00	0.64	0.88
مستطیل				
	1	1.12	0.56	0.88
	1.5	1.36	0.68	1.07
	2	1.53	0.77	1.21
	3	1.78	0.89	1.42
	5	2.10	1.05	1.70
	10	2.54	1.27	2.10
	20	2.99	1.49	2.46
	50	3.57	1.8	3.0
	100	4.01	2.0	3.43

www.*Pnubook.com

سرعت تحکیم

یکی از پارامترهای مهمی که در مبحث سرعت تحکیم بیان می‌شود، عامل زمان (T_v) می‌باشد که بدون بُعد بوده و مطابق رابطهٔ زیر تعریف می‌شود:

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H_{dr}^2}$$

که در این رابطه: C_v = ضریب تحکیم (m^2/sec)

t = زمان (sec)

H_{dr} = حداکثر طول مسیر زهکشی (m)

اگر لایهٔ خاک مورد بررسی هم از بالا و هم از پائین قابلیت زهکشی داشته باشد، H_{dr} مساوی نصف ضخامت

لایه می‌باشد و اگر تنها از یک طرف (بالا یا پائین) قابلیت زهکشی داشته باشد، H_{dr} مساوی کل ضخامت لایهٔ خاک موردنظر می‌باشد.

در جدول ۷-۳ تغییرات درجهٔ تحکیم (به درصد) برحسب عامل زمان، آورده شده است.

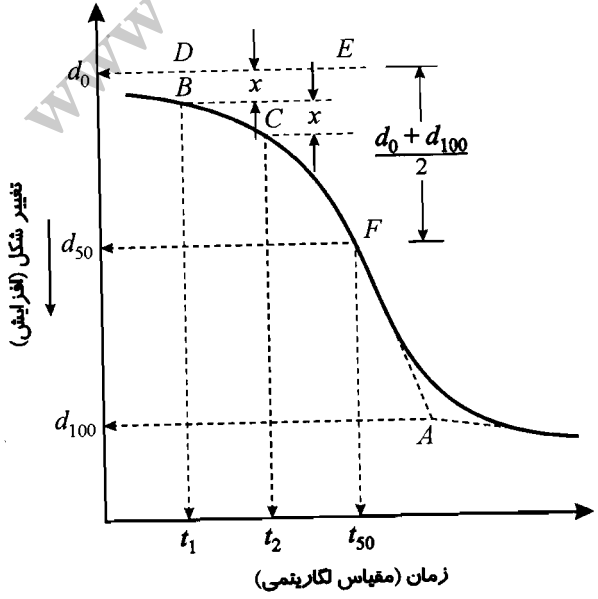
جدول ۷-۳ تغییرات درجهٔ تحکیم برحسب عامل زمان

درجهٔ تحکیم $U\%$	عامل زمان T_v
0	0
10	0.008
20	0.031
30	0.071
40	0.126
50	0.197
60	0.287
70	0.403
80	0.567
90	0.848
100	∞

برای تعیین C_v در آزمایش تحکیم یک بعدی، دو روش مرسوم وجود دارد که در ادامه به توضیح آنها می‌پردازیم:

روش لگاریتم زمان

همانطور که می‌دانید، نمودار تغییر شکل در مقابل لگاریتم زمان در آزمایش تحکیم یک بعدی به شکل زیر می‌باشد.



روش لگاریتم زمان برای تعیین ضریب تحکیم

www.PnuEB.com

۱- ابتدا قسمتهای تقریباً مستقیم تحکیم اولیه و تحکیم ثانویه را امتداد می‌دهیم تا همدیگر را در نقطهٔ A قطع کنند. عرض نقطهٔ A مربوط به مقدار تغییر شکل در انتهای 100% درصد تحکیم اولیه می‌باشد و با d_{100} نشان می‌دهیم.

۲- در قسمت منحنی ابتدایی نمودار فوق‌الذکر، زمانهای t_1 و t_2 را طوری انتخاب می‌کنیم که $t_2 = 4t_1$ باشد. اختلاف تغییر شکل مربوط به زمان‌های t_1 و t_2 را x می‌نامیم.

۳- خط افقی DE را طوری ترسیم می‌کنیم که فاصلهٔ قائم BD نیز مساوی x گردد. تغییر شکل نظیر خط DE بیانگر تغییر شکل در تحکیم صفر درصد می باشد لذا آنرا با d_0 نشان می‌دهیم.

۴- با داشتن d_0 و d_{100} قادریم وسط آن یعنی d_{50} را بدست آوردیم. از d_{50} خطی افقی رسم می‌کنیم تا نمودار را در نقطهٔ F قطع کند، طول نقطهٔ F همان t_{50} (زمان لازم برای 50 درصد تحکیم) می‌باشد.

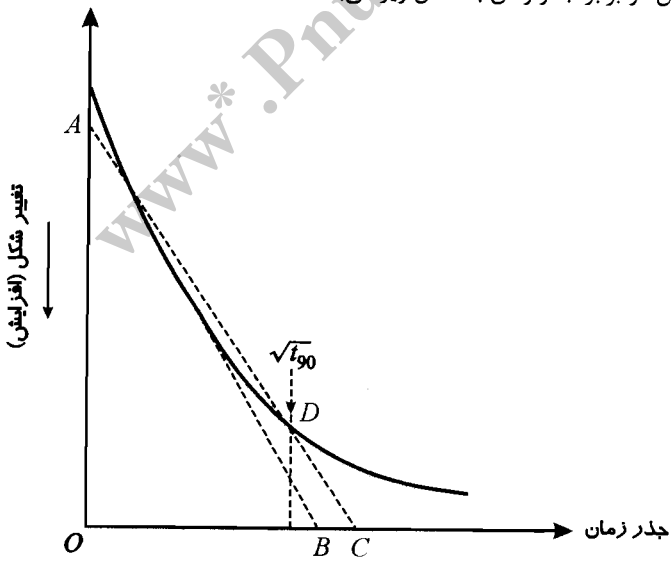
۵- مطابق جدول ۷-۳ برای 50 درصد تحکیم داریم: $T_v = 0.197$

می‌توان نوشت: $$T_{50} = \frac{C_v t_{50}}{H_{dr}^2}$$

در نتیجه $$C_v = \frac{0.197 H_{dr}^2}{t_{50}}$$

روش جذر زمان

نمودار تغییر شکل در برابر جذر زمان به شکل زیر می‌باشد:



۱- خط AB را از میان قسمت ابتدایی منحنی رسم می‌کنیم.

۲- خط AC را طوری رسم می‌کنیم که $\overline{OC} = 1.15\overline{OB}$ باشد. طول نقطهٔ D که محل تقاطع AC با منحنی تحکیم می‌باشد بیانگر جذر زمان برای 90% تحکیم می‌باشد $(\sqrt{t_{90}})$.

۳- مطابق جدول ۷-۳ برای 90% تحکیم داریم: $T_v = 0.848$

در نتیجه: $$C_v = \frac{0.848 H_{dr}^2}{t_{90}}$$

www.PnuEB.com

۷-۱ نتایج یک آزمایش تحکیم بر روی یک نمونهٔ رسی به شرح زیر می‌باشد:

فشار P (kPa)	نسبت تخلخل e
23.94	1.112
47.88	1.105
95.76	1.080
191.52	0.985
383.04	0.850
766.09	0.731

الف: نمودار e در مقابل logP را رسم کنید.

ب: فشار پیش تحکیم P_c را بدست آورید.

پ: نشانهٔ فشردگی C_c را بدست آورید.

این مسئله عیناً درمثال ۷-۲ کتاب آورده شده است که در اینجا از بازنویسی آن پرهیز می‌کنیم.

۷-۲ در شکل، مقطع خاکی نشان داده شده است. اگر بار یکنواختی با شدت ΔP در سطح زمین اعمال شود، نشست لایهٔ رسی به علت تحکیم اولیه چقدر می‌باشد؟ ماسهٔ موجود در بالای تراز آب زیرزمینی را کاملاً خشک فرض کنید. داده‌های مسئله به شرح زیر است:

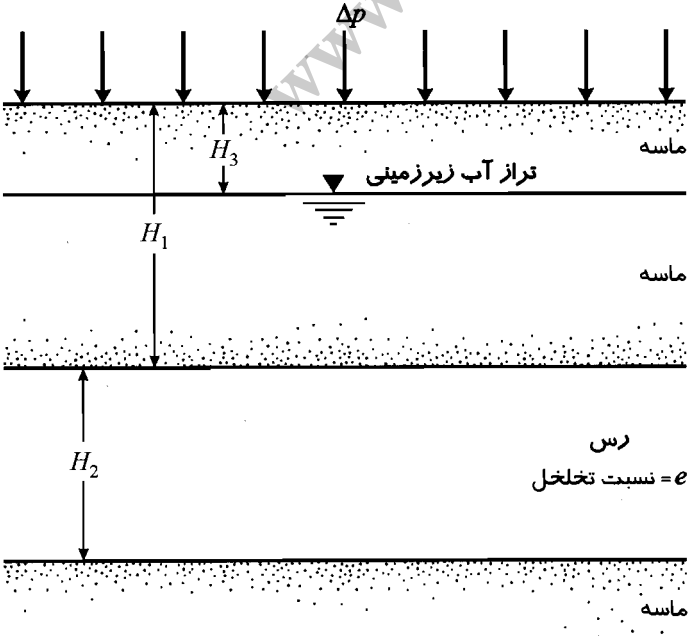
$\Delta P = 48\ kN/m^2$ و $H_1 = 7m$ و $H_2 = 5.10m$ و $H_3 = 2.4m$

ماسه: $\gamma_{dry} = 17.3\ kN/m^3$ و $\gamma_{sat} = 18.1\ kN/m^3$

رس: $\gamma_{sat} = 18.9\ kN/m^3$ و $LL = 50$ و $e = 0.9$

فرض کنید که رس عادی تحکیم یافته است.

توجه کنید برای تعیین P_0 (فشار سربار موجود) کافیست تنش مؤثر وارده در تراز **وسط** لایهٔ رسی مورد نظر را بدست آوریم.



www.*PnuEB*.com

$$P_0 = H_3 \times \gamma_{dry(sand)} + (H_1 - H_3)\overbrace{[\gamma_{sat(sand)} - \gamma_w]}^{\gamma'(sand)} + \frac{H_2}{2} \times \overbrace{[\gamma_{sat(clay)} - \gamma_w]}^{\gamma'(clay)}$$

$$P_0 = 2.4 \times 17.3 + (7 - 2.4) \times [18.1 - 9.81] + \frac{5.1}{2} \times [18.9 - 9.81] = 102.83 \, kN/m^2$$

با استفاده از رابطهٔ تجربی ترزاقی وپک : $C_c = 0.009(LL - 10) = 0.009(50 - 10) = 0.36$

$e_0 = 0.9$ و $\Delta P = 48 \, kN/m^2$

$$S = H \times \frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{C_c \times H}{1 + e_0} \times log(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0})$$

H در رابطهٔ فوق؛ ضخامت کل لایهٔ رسی است (H_2)

$$S = \frac{0.36 \times 5.1}{1 + 0.9} \times log(\frac{102.83 + 48}{102.83}) = 0.161m = 161mm$$

۳-۷ مسئلهٔ ۷-۲ را با داده‌های زیر مجدداً حل کنید.

$\Delta P = 87.14 \, kN/m^2$ و $H_1 = 4m$ و $H_2 = 3.2m$ و $H_3 = 1m$

ماسه : **$\gamma_{dry} = 14.6 \, kN/m^3$ و $\gamma_{sat} = 17.3 \, kN/m^3$**

رس : **$\gamma_{sat} = 19.3 \, kN/m^3$ و $LL = 38$ و $e = 0.75$**

$$P_0 = 1 \times 14.6 + (4 - 1) \times [17.3 - 9.81] + \frac{3.2}{2} \times [19.3 - 9.81] = 52.254 \, kN/m^2$$

$$C_c = 0.009(LL - 10) = 0.009(38 - 10) = 0.252$$

$$e_0 = 0.75$$

$$\Delta P = 87.14 \, kN/m^2$$

$$S = \frac{C_c \times H_2}{1 + e_0} \times log(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0})$$

$$S = \frac{0.252 \times 3.2}{1 + 0.75} \times log(\frac{52.254 + 87.14}{52.254}) = 0.196m = 196mm$$

۴-۷ اگر لایهٔ رس مسئلهٔ ۷-۲ پیش تحکیم یافته (اضافه تحکیم یافته) باشد و فشار پیش تحکیمی متوسط ۱۲۵ کیلونیوتن بر مترمربع باشد، تحت تأثیر سربار ۴۸ کیلونیوتن بر مترمربع، نشست تحکیم اولیه چقدر خواهد بود؟ فرض کنید که $C_s = \frac{1}{6} C_c$ است.

$P_c = 125 \, kN/m^2$

طبق مسئلهٔ ۷-۲ : $C_c = 0.36$ و $P_0 = 102.83 \, kN/m^2$

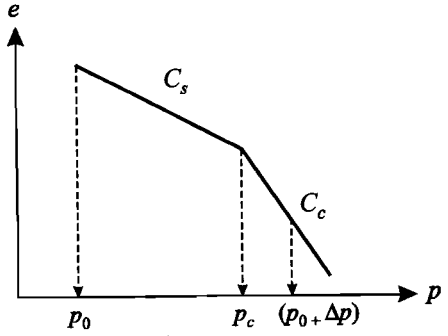
$\Delta P = 48 \, kN/m^2$ و $e_0 = 0.9$

طبق فرض مسأله $C_s = \frac{1}{6} \times 0.36 = 0.06$

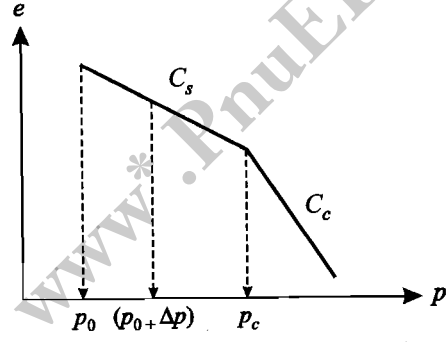
www.PnuEB.com

نکته: توجه کنید هرگاه $P_c < P_0 + \Delta P$ در نتیجه منحنی تحکیم از فُرمی مانند (شکل روبرو) پیروی می‌کند که در رابطهٔ نشست هر دوی مقادیر C_c و C_s دخالت دارند و مقدار S از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$S = \frac{C_s H}{1+e_0} log(\frac{P_c}{P_0}) + \frac{C_c \times H}{1+e_0} log(\frac{P_0 + \Delta P}{P_c})$$



اما اگر P_c بزرگتر از $P_0 + \Delta P$ باشد در نتیجه منحنی تحکیم به‌شکل روبرو می‌باشد و لذا در رابطهٔ نشست تنها شیب C_s دخیل خواهد بود در نتیجه مقدار S از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:



www.PnuEB.com

$$S = \frac{C_s H}{1+e_0} \times log(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0})$$

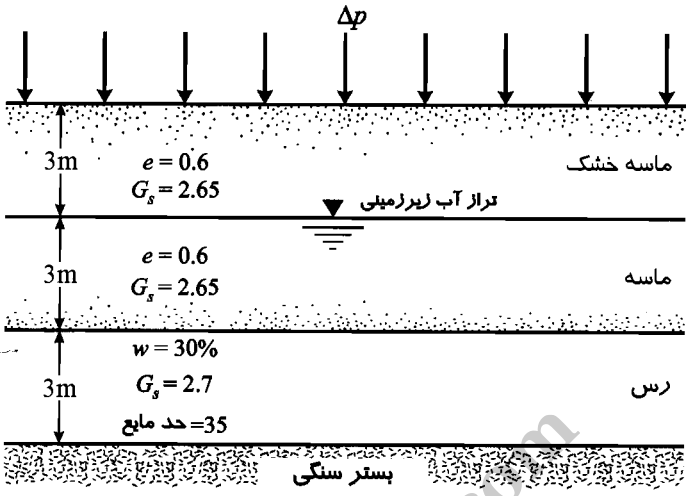
$$P_0 + \Delta P = 102.83 + 48 = 150.83 \, {}^{kN}/_{m^2} > P_c = 125 \, {}^{kN}/_{m^2}$$

$$\Rightarrow \quad S = \frac{C_s H}{1+e_0} log \frac{P_c}{P_0} + \frac{C_c H}{1+e_0} log(\frac{P_0 + \Delta P}{P_c})$$

$$S = \frac{0.06 \times 5.1}{1+0.9} log \frac{125}{102.83} + \frac{0.36 \times 5.1}{1+0.9} log \frac{150.83}{125} = 0.092m = 92mm$$

۵-۷ در شکل مقطع خاکی نشان داده شده است. فشار پیش تحکیمی مساوی 163 کیلونیوتن بر مترمربع می‌باشد. مطلوب است تخمین نشست تحکیم اولیه به علت سربار $\Delta P = 72 \, {}^{kN}/_{m^2}$.

فرض نمائید: $C_s = \frac{1}{5} C_c$



ماسه خشک : $\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} = \frac{2.65\times 9.81}{1+0.6} = 16.25\,^{kN}/_{m^3}$

ماسه اشباع: $\gamma_{sat} = \frac{G_s+e}{1+e}\times\gamma_w = \frac{2.65+0.6}{1+0.6}\times 9.81 = 19.93\,^{kN}/_{m^3}$

رس اشباع : $\gamma_{sat} = \frac{G_s+e}{1+e}\times\gamma_w = \frac{G_s+\omega G_s}{1+\omega G_s}\times\gamma_w = \frac{2.7+0.3\times 2.7}{1+0.3\times 2.7}\times 9.81 = 19.02\,^{kN}/_{m^3}$

تنش مؤثر موجود در وسط لایهٔ رس $P_0 = 3\times 16.25 + 3\times(19.93-9.81) + 1.5\times(19.02-9.81) = 92.925$

$$e_0 = \omega G_s = 0.3\times 2.7 = 0.81$$

$$C_c = 0.009(LL-10) = 0.009(35-10) = 0.225$$

$$C_s = \frac{1}{5}C_c = \frac{1}{5}\times 0.225 = 0.045$$

$$P_0 + \Delta P = 92.925 + 72 = 164.925\,^{kN}/_{m^2} > P_c = 163\,^{kN}/_{m^2}$$

$$S = \frac{C_s\times H}{1+e_0}\times log\frac{P_c}{P_0} + \frac{C_c\times H}{1+e_0}\times log\frac{P_0+\Delta P}{P_c}$$

$$S = \frac{0.045\times 3}{1+0.81}\times log\frac{163}{92.925} + \frac{0.225\times 3}{1+0.81}\times log\frac{164.925}{163} = 0.02m = 20mm$$

۶-۷ اگر ضریب تحکیم برای لایهٔ رس مسئلهٔ ۷ - ۲ مساوی $0.0018\,^{cm^2}/_{sec}$ باشد، چه مدت طول می‌کشد تا 60 درصد تحکیم اولیه رخ دهد، (فرض کنید که در هنگام اعمال بار، افزایش فشار آب حفره‌ای در لایهٔ رسی یکنواخت است.) مقدار کل نشست تحکیم در آن زمان چقدر می‌باشد؟

$C_v = 0.0018\,^{cm^2}/_{sec}$

$t_{60} = ?$

$U = 60\%$ $\xrightarrow{\text{جدول ۷-۳}}$ $T_{60} = 0.287$

$$T_v = \frac{C_v\times t}{H_{dr}^2}$$

www.PnuEB.com

درجه تحکیم	عامل زمان
0	0
10	0.008
20	0.031
30	0.071
40	0.126
50	0.197
60	0.287
70	0.403
80	0.567
90	0.848
100	∞

نکته: اگر لایهٔ رسی مورد نظر از هر دو طرف (بالا و پائین) بتواند زهکشی شود آنگاه H_{dr} برابر با نصف ضخامت لایهٔ رس است، اما اگر این لایه تنها از یک طرف (یا بالا و یا پائین) قابلیت زهکشی داشته باشد آنگاه H_{dr} برابر کل ضخامت آن لایهٔ رسی می‌باشد.

در این مسأله با توجه به شکل مسأله ۷-۲ بالا و پائین لایه‌رس، ماسه وجود دارد لذا از هر دوطرف زهکشی می‌شود

$$\Rightarrow H_{dr} = \frac{H_2}{2} = \frac{5.1}{2} = 2.55m = 255cm$$

$$0.287 = \frac{0.0018 \times t_{60}}{(255)^2} \quad \Rightarrow \quad t_{60} = 10367875\,sec \simeq 120 \text{ روز}$$

$$U = 60\%$$

$$U = \frac{S_t}{S_\infty}$$

S_∞ منظور نشست ناشی از 100% تحکیم اولیه می‌باشد که از مسألهٔ ۷-۲ مقدارآن را $161mm$ بدست آوردیم.

$$0.6 = \frac{S_t}{161} \quad \Rightarrow \quad \text{نشست برای } 60\% \text{ تحکیم } S_t = 161 \times 0.6 = 96.6mm$$

۷-۷ مختصات دونقطهٔ ورودی یک منحنی فشردگی (تحکیم) بکر به شرح زیر است:

$\mathbf{e_1 = 1.78}$ $\mathbf{e_2 = 1.48}$ $\mathbf{P_1 = 191.52\,kN/m^2}$ $\mathbf{P_2 = 383.04\,kN/m^2}$

مطلوب است:

الف: تعیین ضریب قابلیت فشردگی حجمی برای دامنهٔ فشار ذکر شده.

ضریب قابلیت فشردگی حجمی را با m_v نشان می‌دهند و از رابطهٔ زیر بدست می‌آید

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_0} \qquad (e_0 = \text{تخلخل اولیه})$$

که در این رابطه a_v ضریب قابلیت فشردگی (شیب خطی) می‌باشد و از آنجائیکه تخلخل اولیهٔ خاک را نداریم در رابطهٔ فوق بجای e_0 از e_{ave} استفاده می‌کنیم.

$$a_v = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1} = \frac{1.78 - 1.48}{383.04 - 191.52} = 1.566 \times 10^{-3}\ m^2/kN \qquad \text{و} \qquad e_{ave} = \frac{e_1 + e_2}{2} = 1.63$$

$$m_v = \frac{1.566 \times 10^{-3}}{1 + 1.63} = 5.95 \times 10^{-4}\ m^2/kN$$

www.PnuEB.com

ب: اگر ضریب تحکیم برای دامنهٔ فشار ذکر شده مساوی $0.0023^{cm^2/sec}$ باشد، ضریب نفوذپذیری ($^{cm}/_{sec}$) رس را برای نسبت تخلخل نظیر بدست آورید.

$$C_v = 0.0023^{cm^2/sec}$$
$$k = ?$$
$$C_v = \frac{k}{\gamma_w \times m_v}$$
$$\Rightarrow k = 0.0023(^{cm^2}/_{sec}) \times (9.81\times10^{-6}\ ^{kN}/_{cm^3}) \times (5.95\times10^{-4}\times10^{4}\ ^{cm^2}/_{kN}) = 1.34\times10^{-7}\ ^{cm}/_{sec}$$

۸-۷ برای منحنی تحکیم مسئلهٔ ۷-۷، نسبت تخلخل مربوط به فشار $651.17^{kN}/_{m^2}$ چقدر خواهد بود؟

نشانهٔ فشردگی $C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log P_2 - \log P_1} = \frac{e_1 - e_2}{\log(\frac{P_2}{P_1})} = \frac{1.78 - 1.48}{\log(\frac{383.04}{191.52})} = 0.996$

$$0.996 = \frac{e_2 - e_3}{\log(\frac{P_3}{P_2})} = \frac{1.48 - e_3}{\log(\frac{651.17}{383.04})} \Rightarrow e_3 = 1.25$$

۹-۷ آزمایش تحکیم در روی یک نمونهٔ رسی به ضخامت 25mm که از بالا و پائین زهکشی می‌شود، نشان می‌دهد که 50% تحکیم در 11دقیقه رخ می‌دهد.

الف: زمان لازم برای 50% تحکیم یک لایهٔ رسی از همان نمونه به ضخامت 4m که فقط از بالا زهکشی می‌شود، چقدر است؟

نکتهٔ مهم: اگر خاک یکسان باشد (C_v ثابت) و نمونه‌هایی با ضخامت‌های متفاوت از این خاک تحت n% تحکیم قرار گیرند، رابطهٔ زیر برای تعیین زمان لازم برای n% تحکیم بین دو نمونهٔ موجود برقرار است.

$$\frac{t_1}{t_2} = (\frac{H_{dr_1}}{H_{dr_2}})^2$$

$$t_2 = 11\,min \quad و \quad H_{dr_2} = \frac{25}{2} = 12.5mm \quad و \quad H_{dr_1} = 4000mm \quad و \quad t_1 = ?$$

$$\frac{t_1}{11} = (\frac{4000}{12.5})^2 \Rightarrow t_1 = 1126400\,min = 782.2 \text{ روز}$$

ب: زمان لازم برای 70% تحکیم در حالت الف چقدر است؟

$$T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}^2} \qquad U = 50\% \xrightarrow{\text{جدول ۷-۳}} T_v = 0.197$$

$$0.197 = \frac{11C_v}{12.5^2} \rightarrow C_v = 2.798\ ^{mm^2}/_{min}$$

$$U = 70\% \xrightarrow{\text{جدول ۷-۳}} T_v = 0.403$$

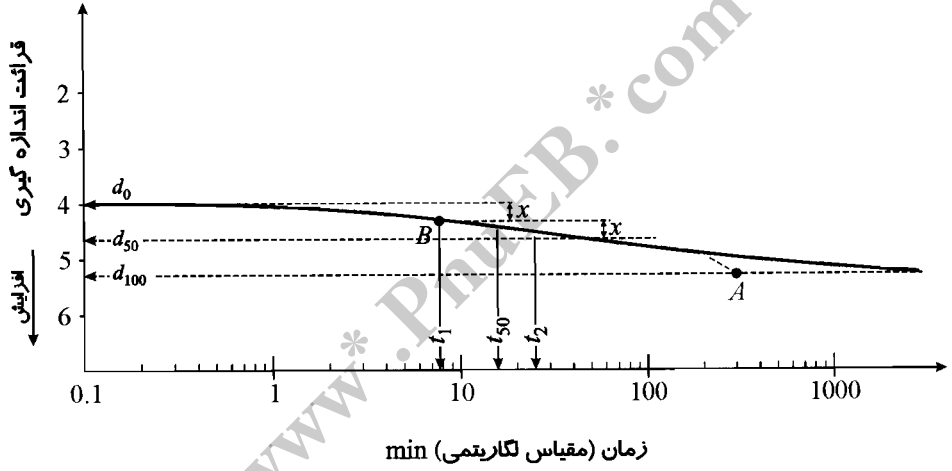
$$0.403 = \frac{2.798t}{(4000)^2} \Rightarrow t = 2304503.2 \text{ دقیقه} \simeq 1600 \text{ روز}$$

www.PnuEB.com

۷-۱۰ در حین یک آزمایش تحکیم، در افـــزایش فشار از $50^{kN}/_{m^2}$ به $100^{kN}/_{m^2}$، قرائت زمان و اندازه‌گیر عقربه‌ای به شرح زیر است:

زمان (دقیقه)	قرائت اندازه‌گیر (میلیمتر)	زمان (دقیقه)	قرائت اندازه‌گیر (میلیمتر)
0	3.975	16	4.572
0.1	4.082	30	4.737
0.25	4.102	60	4.923
0.5	4.128	120	5.080
1	4.166	240	5.207
2	4.224	480	5.283
4	4.298	960	5.334
8	4.420	1440	5.364

الف: با استفاده از روش لگاریتم زمان، زمـان لازم بـرای 50درصـــد تحـــکیم اولیه (t_{50}) را به دست آورید.



www.*PnEB.*com

برای استفاده از روش لگاریتم زمان گامهای زیر را به ترتیب انجام می‌دهیم:

گام ۱- منحنی تغییر شکل- زمان را با توجه به جدول داده شده در صورت مسأله رسم می‌کنیم (یادمان نمی‌رود که محور افقی، زمان در مقیاس لگاریتمی است و محور قائم تغییر شکل می‌باشد که جهت افزایش آن از بالا به پائین است)

گام ۲- تعیین d_{100} : کافیست نقطهٔ A را که از محل برخورد مماس بر منحنی در قسمتهای تحکیم اولیه و ثانویه بدست می‌آید تعیین نمائیم. عرض نقطهٔ A مربوط به d_{100} یا همان 100% تحکیم اولیه می‌باشد.

$d_{100} \simeq 5.2mm$

گام ۳- در قسمتهای منحنی نمودار، مقادیر t_1 و t_2 را طوری انتخاب می‌کنیم که $t_2 = 4t_1$ باشد بطور مثال:

$t_1 = 7.2\,min$ و $t_2 = 30\,min$

اختلاف تغییر شکل نمونه (محور قائم) در فاصلهٔ زمانی t_1 و t_2 را x می‌نامیم.

$x = 4.737 - 4.417 = 0.32mm$

گام۴- به همان اندازهٔ x از نقطهٔ B (نقطه‌ای به طول t_1) بالا می‌رویم و خطی افقی رسم می‌کنیم تا محور قائم را قطع کند. به محل بدست آمده d_0 می‌گویند.

$d_0 \simeq 4mm$

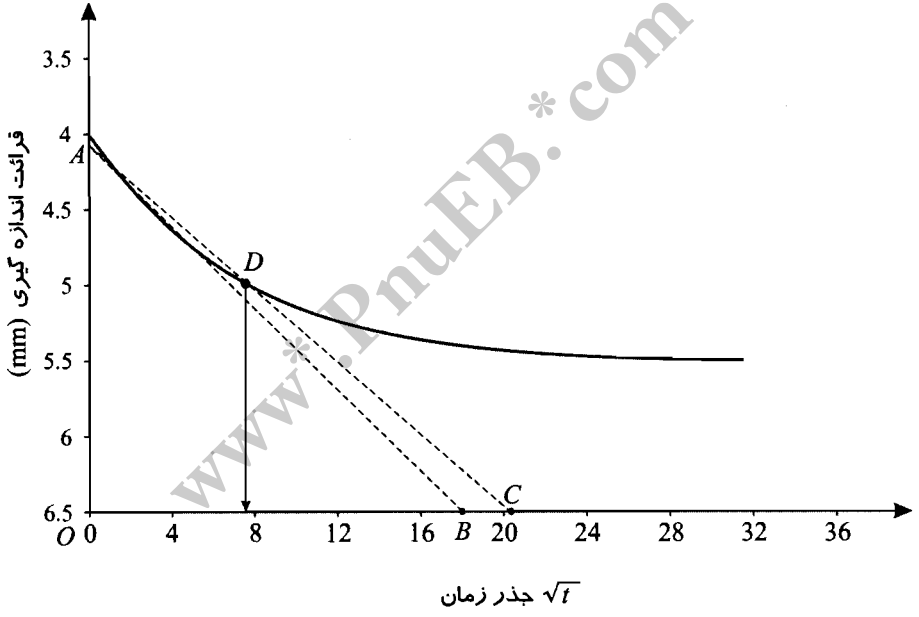
گام ۵- d_{50} را که وسط d_0 و d_{100} قرار دارد تعیین کنید.

$$d_{50} = \frac{d_0 + d_{100}}{2} = 4.6mm$$

گام ۶- از محل d_{50} خطی افقی ترسیم کنید تا منحنی را در نقطه‌ای قطع کند طول این نقطه نمایشگر t_{50} می‌باشد.

$t_{50} = 17\ min$

ب: با استفاده از روش جذر زمان، زمان لازم برای 90% تحکیم اولیه را بدست آورید.



www.PnuEB.com

برای استفاده از روش جذر زمان (روش تیلور) گامهای زیر را بترتیب انجام می‌دهیم.

گام ۱- منحنی تحکیم را در دستگاهی که محور قائم آن تغییر شکل و محور افقی آن جذر زمان می‌باشد ترسیم می‌کنیم.

گام ۲- خط AB را بر قسمت میانی منحنی مماس می‌کنیم.

گام ۳- خط AC را طوری رسم می‌کنیم که $\overline{OC} = 1.15\overline{OB}$ باشد.

گام ۴- طول نقطهٔ D (محل برخورد خط AC با منحنی تحکیم) نمایشگر $\sqrt{t_{90}}$ می‌باشد.

$\sqrt{t_{90}} \simeq 7.8 \quad \Rightarrow \quad t_{90} = 60.48\ min$

پ: اگر ارتفاع متوسط نمونه در حین تحکیم به علت افزایش فشار مفروض مساوی 22.35mm باشد. و نمونه از بالا و پائین زهکشی شود با استفاده از (t_{50}) و (t_{90}) محاسبه شده در قسمتهای الف و ب، ضریب تحکیم نمونه را محاسبه نمائید.

الف) با استفاده از t_{50}

$$U = 50\% \xrightarrow{\text{جدول ۷-۳}} T_{50} = 0.197 \quad \text{و} \quad H_{dr} = \frac{22.35}{2} = 11.175mm$$

$$T_v = \frac{C_v \times t}{H_{dr}^2} \quad \Rightarrow \quad C_v = \frac{0.197 \times 11.175^2}{17} = 1.45\ {}^{mm^2}/_{min}$$

ب) با استفاده از t_{90}

$$U = 90\% \xrightarrow{\text{جدول ۷-۳}} T_{90} = 0.848$$

$$\Rightarrow \quad C_v = \frac{0.848 \times 11.175^2}{60.48} = 1.75\ {}^{mm^2}/_{min}$$

ت) در روی علل ممکن برای وجود اختلاف در مقادیر C_v به دست آمده در قسمت پ بحث کنید.

این اختلاف می‌تواند ناشی از این باشد که اولاً روشهای جذر زمان و لگاریتم زمـــان هر دو روشهای تقریبی تعیین C_v می‌باشند و از طرف دیگر خطاهایی ممکنست از ترسیم نمودارها و وارد کردن ناصحیح نقاط داده شده در دستگاهها بوجود آمده باشند.

۱۱-۷ زمان لازم برای 50درصد تحکیم آزمایشگاهی یک نمونه‌رسی به ضخامت 25میلیمتر که از بالا و پائین زهکشی می‌شود، 2 دقیقه و 20 ثانیه است. چند روز طول می‌کشد تا یک لایهٔ رسی به ضخامت 3متر از همان نمونه تحت همان افزایش فشار به 50درصد تحکیم اولیه برسد. یک بستر سنگی در زیر لایهٔ رسی وجود دارد.

توضیح: می‌توان از شرایط نمونهٔ اولی با رابطهٔ $T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}^2}$ ، C_v را بدست آورد آنگاه برای نمونهٔ دومی دوباره از همین رابطه استفاده کرد و t را بدست آورد. ولی راه سریعتر و آسانتر مطابق با توضیحات مربوط به مسألهٔ ۷-۹- الف بصورت زیر است:

$$\frac{t_2}{t_1} = (\frac{H_{dr_2}}{H_{dr_1}})^2$$

$$t_1 = 2 \times 60 + 20 = 140\,sec \quad \text{ä} \qquad H_{dr_1} = \frac{25}{2} = 12.5mm$$

اما زیر لایهٔ رسی نمونهٔ دوم بستر سنگی قرار دارد لذا نمونهٔ دوم از یک طرف زهکشی می‌شود ⇐

$$H_{dr_2} = 3000mm$$

$$\frac{t_2}{140} = (\frac{3000}{12.5})^2 \quad \Rightarrow \quad t_2 = 8064000\,sec = 93.3 \text{ روز}$$

۱۲-۷ با مراجعه به مسألهٔ ۷- ۱۱، چند روز طول می‌کشد تا لایهٔ رسی به 30 درصد تحکیم اولیه برسد (از رابطهٔ ۷-۵۰ استفاده کنید)

www.PnuEB.com

$U = 30\% \xrightarrow{\text{جدول ۷-۵۰}} T_v = \frac{\pi}{4}(\frac{U(\%)}{100})^2 = \frac{\pi}{4} \times (\frac{300}{100})^2 = 0.071$

اگر از مسألهٔ ۷-۱۱؛ C_v را بدست آوریم خواهیم داشت:

$U = 50\% \rightarrow T_v = 0.197$

$0.197 = \frac{140\, C_v}{12.5^2} \Rightarrow C_v = 0.22\ mm^2/sec$

$\Rightarrow 0.071 = \frac{0.22t}{(3000)^2} \Rightarrow t = 33.6$ روز

۷-۱۳ برای یک لایهٔ رس عادی تحکیم یافته داریم:

$\mathbf{P_0 = 200\ kN/m^2}$ $\mathbf{e = e_0 = 1.22}$

$\mathbf{P_0 + \Delta P = 400\ kN/m^2}$ $\mathbf{e = 0.98}$

ضریب نفوذپذیری k لایهٔ رسی برای دامنهٔ فشار مذکور، مساوی 6.1×10^{-5} متر در روز می‌باشد.

الف: زمان لازم برای 50درصد تحکیم یک لایهٔ رسی از نمونهٔ فوق به ضخامت 3 متر با زهکشی دوطرفه برحسب روز چقدر است؟ ب: میزان نشست در 50درصد تحکیم چقدر است؟

الف)

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w \times m_v}$$

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0}$$

$$a_v = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1} = \frac{1.22 - 0.98}{400 - 200} = 1.2 \times 10^{-3}\ m^2/kN$$

$$\Rightarrow m_v = \frac{1.2 \times 10^{-3}}{1 + 1.22} = 5.4 \times 10^{-4}\ m^2/kN$$

$$\Rightarrow C_v = \frac{6.1 \times 10^{-5}}{9.81 \times 5.4 \times 10^{-4}} = 0.0115\ m^2/day$$

زهکشی دو طرفه $\Rightarrow H_{dr} = \frac{3}{2} = 1.5m$

$U = 50\% \Rightarrow T_v = 0.197$

$$T_v = \frac{C_v \times t}{H_{dr}^2} \Rightarrow t = \frac{0.197 \times (1.5)^2}{0.0115} = 38.5$$ روز

ب)

نشست کل $S_\infty = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \times H = \frac{1.22 - 0.98}{1 + 1.22} \times 3 = 0.324m$

$$U = \frac{S_t}{S_\infty} = \frac{\text{نشست در لحظهٔ } t}{\text{نشست کل}}$$

$$0.5 = \frac{S_t}{0.324} \Rightarrow S_t = 0.162m = 162mm$$

www.PnuEB.com

۱۴-۷ در یک آزمایش تحکیم در روی یک نمونهٔ رسی با زهکشی دو طرفه، نتایج زیر بدست آمده است:

$P_1 = 50\,^{kN}/_{m^2}$ $\quad e_1 = 0.92$ $\quad$ ضخامت لایهٔ رسی $= 25mm$

$P_2 = 100\,^{kN}/_{m^2}$ $\quad e_2 = 0.8$

$(t_{50}) = 2.2min$ زمان لازم برای 50درصد تحکیم

مطلوب است تعیین ضریب نفوذپذیری رس در محدودهٔ بارگذاری.

$$a_v = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1} = \frac{0.92 - 0.8}{100 - 50} = 2.4 \times 10^{-3}\ {}^{m^2}/_{kN}$$

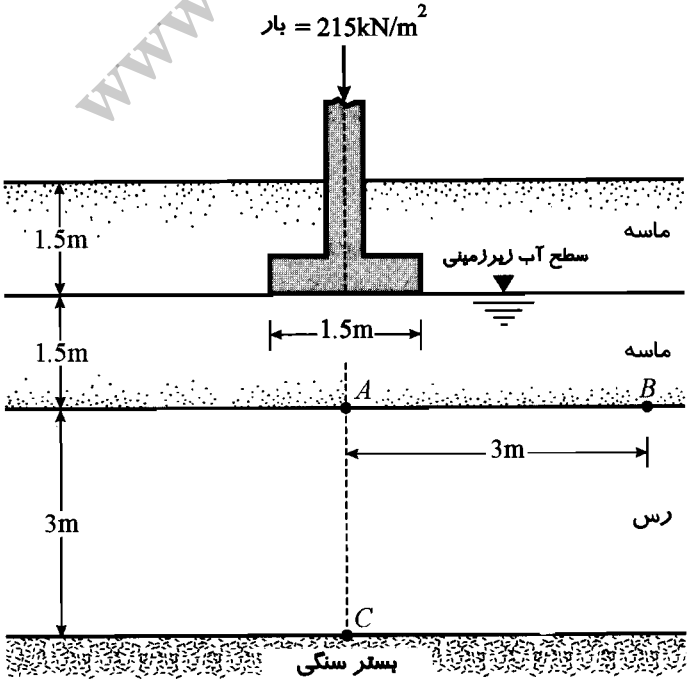
$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_{ave}} = \frac{2.4 \times 10^{-3}}{1 + 0.86} = 1.29 \times 10^{-3}\ {}^{m^2}/_{kN}$$

$$C_v = \frac{T_v \times (H_{dr})^2}{t} = \frac{0.197 \times (\frac{0.025}{2})^2}{2.2} = 1.4 \times 10^{-5}\ {}^{m^2}/_{min}$$

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w \times m_v} \Rightarrow k = C_v \times \gamma_w \times m_v = 1.4 \times 10^{-5} \times 9.81 \times 1.29 \times 10^{-3} = 1.78 \times 10^{-7}\ {}^{m}/_{min}$$

۱۵-۷ برای شالودهٔ نواری نشان داده شده در شکل با استفاده از نمودار تأثیر نیومارک (فصل ۶) مطلوب است تعیین تنشها در نقاط A ، B و C به علت بار وارد بر شالوده.

برای اینکه دقت کار بالا باشد در اینجا از روابط موجود در بار نواری برای تعیین اضافه تنش نقاط مذکور استفاده می‌کنیم.



www.PnuEB.com

نقطهٔ A : $\frac{2x}{B}=0$ و $\frac{2z}{B}=\frac{2(1.5)}{1.5}=2 \xrightarrow{\text{جدول ۶-۲}} \frac{\Delta P}{q}=0.5508$

$$\Rightarrow \Delta P = 118.42\ ^{kN}/_{m^2}$$

نقطهٔ B : $x=2B$ و $z=B \xrightarrow{\text{شکل ۶-۱۲}} \frac{\Delta P}{q}=0.04 \Rightarrow \Delta P = 8.6\ ^{kN}/_{m^2}$

نقطهٔ C : $x=0$ و $z=4.5m=3B \xrightarrow{\text{شکل ۶-۱۲}} \frac{\Delta P}{q}=0.21 \Rightarrow \Delta P = 45.15\ ^{kN}/_{m^2}$

۱۶-۷ مطلوب است محاسبهٔ نشست شالودهٔ مسئلهٔ ۷- ۱۵ به علت تحکیم لایهٔ رسی، داریم:

30% = درجهٔ اشباع ماسه در بالای سفرهٔ آب زیرزمینی و $G_s = 2.65$ و $e=0.6$: ماسه

$LL=45$ و $G_s = 2.75$ و $e=0.85$: رس

رس عادی تحکیم یافته است.

ماسهٔ فوقانی : $\gamma_t = \frac{G_s + eS_r}{1+e}\times\gamma_w = \frac{2.65+0.6\times0.3}{1+0.6}\times 9.81 = 17.35\ ^{kN}/_{m^3}$

ماسهٔ اشباع (تحتانی) : $\gamma_{set} = \frac{G_s + e}{1+e}\times\gamma_w = \frac{2.65+0.6}{1+0.6}\times 9.81 = 19.93\ ^{kN}/_{m^3}$

رس اشباع : $\gamma_{set} = \frac{G_s + e}{1+e}\times\gamma_w = \frac{2.75+0.85}{1+0.85}\times 9.81 = 19.09\ ^{kN}/_{m^3}$

نشست $S = \frac{H C_c}{1+e_0} log(\frac{P_0+\Delta P}{P_0})$

لذا باید P_0 (فشار موجود در تراز وسط لایهٔ رسی) و C_c و ΔP (که متوسط وزنی افزایش فشار به علت شالودهٔ $215\ ^{kN}/_{m^2}$ می‌باشد و از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود) باید بدست آیند.

$$\Delta P_{ave} = \frac{\Delta P_t + 4\Delta P_m + \Delta P_b}{6}$$

که در این رابطه ΔP_t افزایش تنش در تراز بالای لایهٔ رس (نقطهٔ A)؛ ΔP_m افزایش تنش در وسط لایهٔ رسی و ΔP_b افزایش تنش در تراز زیرین لایهٔ رسی در زیر مرکز شالوده (نقطهٔC) می‌باشد.

$\Delta P_t = \Delta P_A = 118.42\ ^{kN}/_{m^2}$

$\Delta P_b = \Delta P_c = 45.15\ ^{kN}/_{m^2}$

در تراز وسط : $\frac{2x}{B}=0$ و $\frac{2z}{B}=4 \xrightarrow{\text{جدول ۶-۲}} \frac{\Delta P}{q}=0.305 \Rightarrow$

$$\Delta P_m = 65.575\ ^{kN}/_{m^2} \Rightarrow \Delta P_{ave} = \frac{118.42+4(65.575)+45.15}{6} \simeq 71\ ^{kN}/_{m^2}$$

تعیین P_0:

$$P_0 = 1.5\times 17.35 + 1.5\times(19.93-9.81) + \frac{3}{2}\times(19.09-9.81) = 55.125\ ^{kN}/_{m^2}$$

www.PnuBB.com

تعیین C_c:

$$C_c = 0.009(LL-10) = 0.009(45-10) = 0.315$$

$$S = \frac{3\times 0.315}{1+0.85} \times log\left(\frac{55.125+71}{55.125}\right) = 0.184m = 184mm$$

۱۷-۷ مطلوب است تخمین نشست آنی یک شالودهٔ دایره به قطر 1.2m که در روی یک لایهٔ رسی غیر اشباع قرار دارد.

$\mu = 0.2$ و $E = 7000\ kN/m^2$ رس و بارکل $= 170$ kN

شالوده را صلب فرض کنید.

$$\rho_i = P.B.\frac{1-\mu^2}{E}.I_P$$

قطر شالودهٔ دایره‌ای $B = 1.2m$ $\qquad P = \frac{\text{بار}}{\text{سطح شالوده}} = \frac{170}{\pi(0.6)^2} = 150.31\ kN/m^2$

جدول ۷-۵ $\longrightarrow$ $I_p = 0.79$

$$P_i = 150.31\times 1.2\times\frac{1-(0.2)^2}{7000}\times 0.79 = 0.0195m = 19.5mm$$

۱۸-۷ مطلوب است تخمین نشست آنی یک شالودهٔ سخت مربع به ابعاد 3 × 3 متر که در روی یک لایهٔ ماسه‌ای شل احداث شده است. داریم:

بار شالوده $= 711$ kN

$\mu = 0.32$

ماسه $E = 16200\ kN/m^2$

$$m_1 = \frac{\text{طول شالوده}}{\text{عرض شالوده}} = \frac{3}{3} = 1$$

جدول ۷-۵ $\longrightarrow$ $I_p = 0.88$

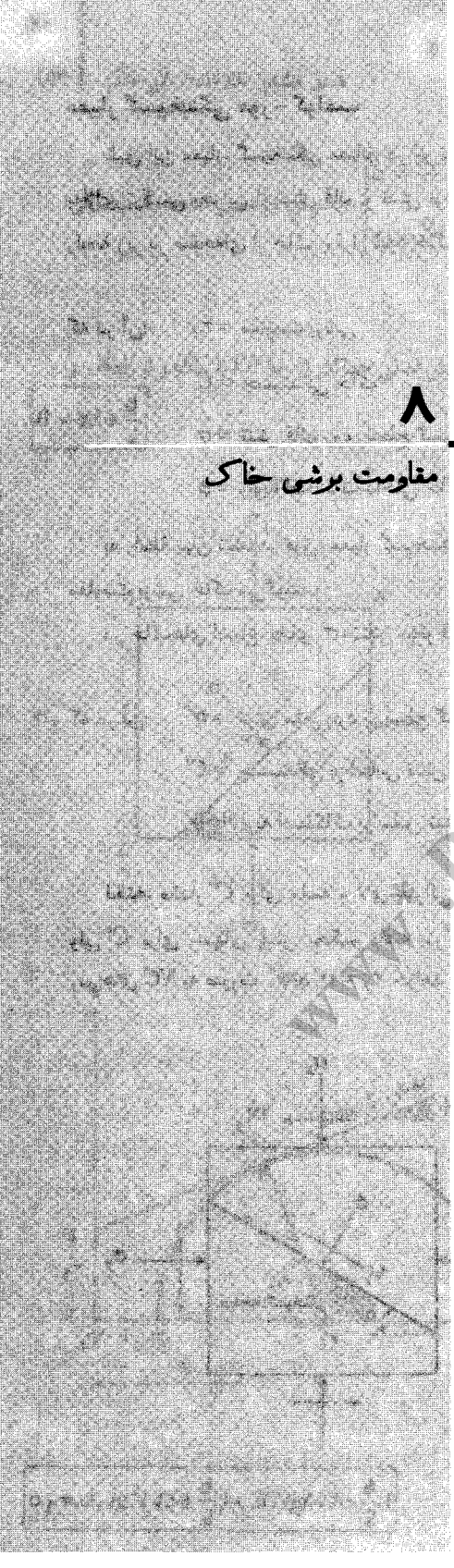
$$P = \frac{711}{3\times 3} = 79\ kN/m^2$$

$$\rho_i = P\times B\times\frac{1-\mu^2}{E}\times I_p$$

$$\rho_i = 79\times 3\times\frac{1-(0.32)^2}{16200}\times 0.88 = 0.0115m = 11.5mm$$

www.*PnuEB.*com

www*.PnuEB*.com



فصل ۸

مقاومت برشی خاک

www.PnuEB.com

معیار گسیختگی مور- کولمب

طبق این معیار، گسیختگی مصالح در اثر تنش قائم حداکثر و یا تنش برشی حداکثر وارده رخ نمی‌دهد بلکه به‌ازای ترکیبی بحرانی از تنش قائم و تنش برشی اتفاق می‌افتد. خاک نیز از این قاعده مستثنی نبوده و هرگاه رابطهٔ زیر در صفحه‌ای از خاک برقرار شود خاک در آن صفحه گسیخته خواهد شد:

$$\tau_f = C + \sigma\, tg\phi$$

که در آن: τ_f = مقاومت برشی

C = چسبندگی خاک

σ = تنش قائم روی سطح گسیختگی

ϕ = زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک

به رابطهٔ بیان شده در فوق، معیار گسیختگی یا شکست مور-کولمب گویند که در آن، C و ϕ را پارامترهای مقاومت برشی خاک می‌گویند.

در خاک‌های اشباع، بجای σ، تنش مؤثر قائم (σ') بکار می‌رود و رابطهٔ فوق‌الذکر به شکل زیر در می‌آید:

$$\tau_f = C' + \sigma' tg\phi'$$

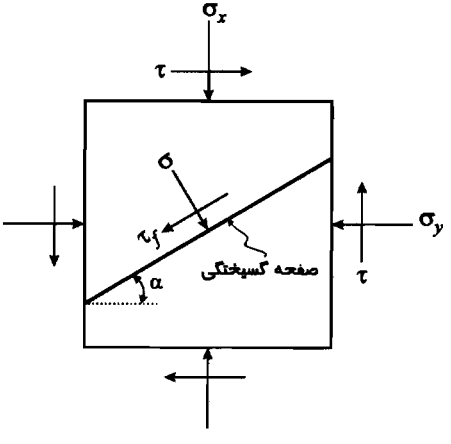
که در آن: σ' = تنش مؤثر وارد بر سطح گسیختگی

C' = چسبندگی بر اساس تنش مؤثر (چسبندگی زهکشی شده)

ϕ' = زاویه اصطکاک براساس تنش مؤثر (زاویه اصطکاک زهکشی شده)

نکته: مقدار C' برای ماسه و لای غیرآلی صفر است و برای رسهای عادی تحکیم یافته تقریباً صفر است. ولی C' برای رسهای پیش تحکیم یافته بزرگتر از صفر است. لذا رابطهٔ فوق برای ماسه‌ها و لای غیرآلی و رس‌های NC به صورت $\tau_f = \sigma' tg\phi'$ خواهد بود.

اگر وضعیت تنش در صفحه‌ای از این توده خاک توسط نقطهٔ A بیان شود، گسیختگی برشی در امتداد این صفحه رخ نمی‌دهد ولی اگر وضعیت تنش صفحه‌ای با نقطهٔ B قابل بیان باشد در امتداد آن صفحه گسیختگی برشی رخ می‌دهد و وضعیت تنش مربوط به نقطهٔ C که بالاتر از پوش گسیختگی مور-کولمب است وجود خارجی ندارد زیرا قبل از وقوع چنین حالت تنشی، خاک گسیخته شده است.



www.PtuEB.com

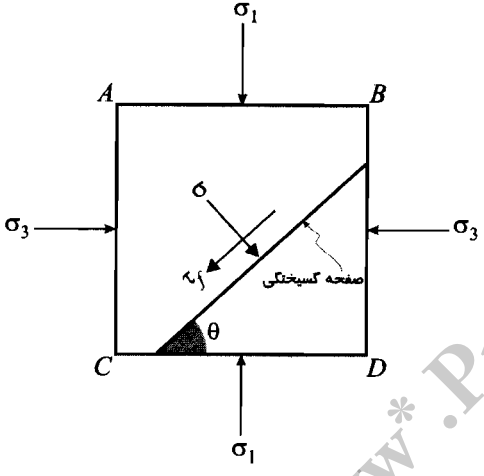
تنشهای وارده بر صفحهٔ گسیختگی $\begin{cases} \sigma = \frac{\sigma_1+\sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}\cos 2\theta \\ \tau_f = \frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}\sin 2\theta \end{cases}$

که در این روابط: σ_1 = تنش اصلی حداکثر

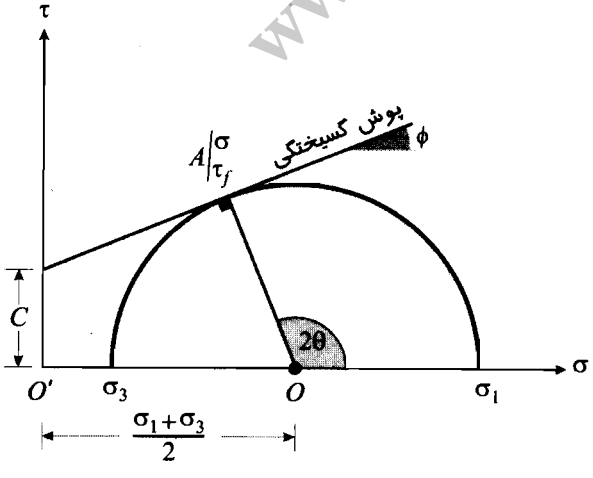
σ_3 = تنش اصلی حداقل

θ = زاویهٔ صفحهٔ گسیختگی با صفحهٔ تنش اصلی حداکثر (زاویهٔ EF با BC) و از رابطهٔ زیر قابل تعیین است:

$$\theta = 45 + \frac{\phi}{2}$$



(همانطور که قبلاً هم گفته شد و در شکل ملاحظه می‌کنید در صفحات تنش اصلی حداکثر و حداقل، تنش برشی صفر می‌باشد)



ثابت می‌شود:

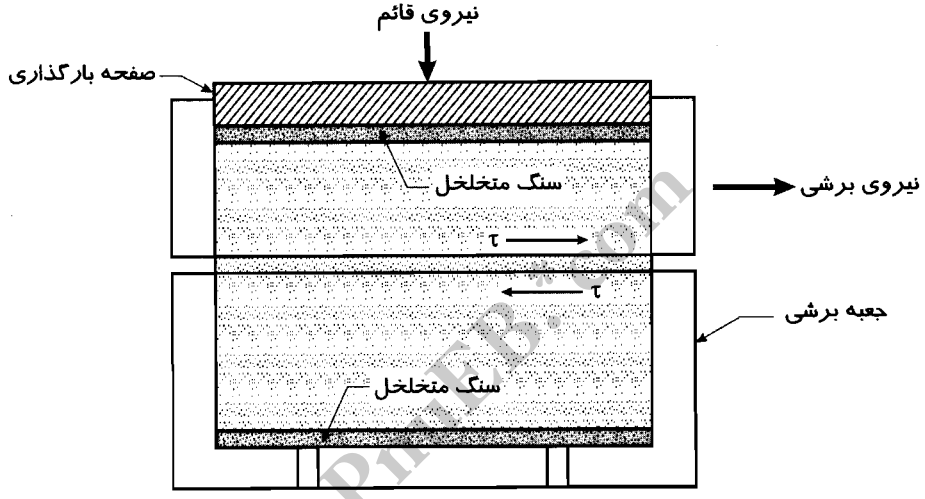
$$\sigma_1 = \sigma_3\, tg^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2C\, tg(45 + \frac{\phi}{2})$$

www.PnuEB.com

تعیین پارامترهای مقاومت برشی در آزمایشگاه

آزمایش برش مستقیم

این آزمایش قدیمیترین و در عین حال ساده‌ترین آزمایش برشی می‌باشد (البته دارای معایبی است که از ذکر آنها در اینجا خودداری می‌کنیم). شکل زیر بصورت شماتیک، دستگاه آزمایش برش مستقیم را نشان می‌دهد.



شکل شماتیک دستگاه آزمایش برش مستقیم

نحوهٔ انجام آزمایش بدین ترتیب است که بعد از قرار دادن نمونهٔ مکعبی یا استوانه‌ای خاک (شکل نمونه وابسته به نوع دستگاه می‌باشد) در داخل دستگاه که متشکل از دو جعبهٔ برشی از هم جدا می‌باشد بار قائم P را که در طول آزمایش مقدار ثابتی دارد از بالا به نمونه وارد کرده، سپس جعبهٔ برشی متحرک دستگاه توسط نیروی برشی T تدریجاً کشیده می‌شود (این در حالیست که بار P در حال اعمال است) اینکار تا جایی انجام می‌شود تا در نمونه گسیختگی ایجاد شود (این گسیختگی در صفحهٔ افقی در امتداد شکاف بین دو جعبهٔ برشی فوقانی و تحتانی رخ می‌دهد). در لحظهٔ گسیختگی، می‌توان این تنشهای قائم و برشی وارده بر صفحهٔ گسیختگی را از روابط زیر بدست آورد:

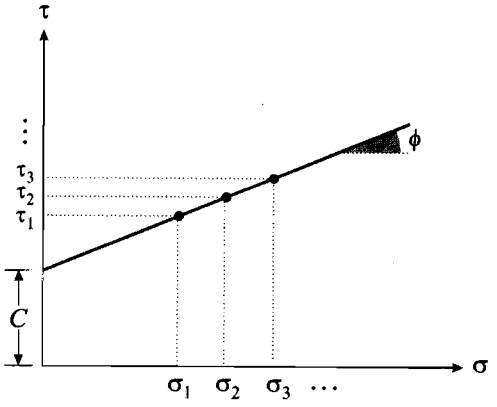
$$\text{تنش قائم } \sigma = \frac{\text{نیروی قائم}}{\text{سطح مقطع افقی نمونه}} = \frac{P}{A}$$

$$\text{تنش برشی } \tau = \frac{\text{نیروی برشی}}{\text{سطح مقطع افقی نمونه}} = \frac{T}{A}$$

مراحل آزمایش فوق بر روی چندین نمونهٔ دیگر از همان خاک با بارگذاری‌های قائم مختلف تکرار می‌شود و برای هر کدام از آزمایش‌ها مقادیر σ و τ در لحظهٔ گسیختگی نمونه‌ها را ثبت می‌کنیم و در دستگاه مختصات زیر

www.PnuEB.com

علامتگذاری می‌کنیم. نقاط بدست آمده را به هم وصل می‌کنیم. شیب این خط ϕ خاک و عرض از مبدأ آن C خاک می‌باشد.



آزمایش برشی سه محوری

آزمایش برش سه محوری، قابل اعتمادترین روش برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک می‌باشد که برحسب شرایط آزمایش و کاربرد خاک مورد آزمایش، آزمایش سه محوری را به سه نوع مختلف دسته‌بندی می‌کنند:

۱- آزمایش تحکیم یافتهٔ زهکشی شده یا آزمایش زهکشی شده (آزمایش *CD*)

۲- آزمایش تحکیم یافتهٔ زهکشی نشده (آزمایش *CU*)

۳- آزمایش تحکیم نیافتهٔ زهکشی نشده یا آزمایش زهکشی نشده یا آزمایش سریع (آزمایش *UU*)

در زیر به خلاصه‌ای از این آزمایشها اشاره می‌کنیم که توصیه می‌شود برای درک بهتر هر یک از آزمایش‌های فوق (که بسیار مهم می‌باشد) به کتب مرجع مراجعه کنید.

هر سه آزمایش فوق، شامل سه مرحله ۱- اشباع *saturation* ۲- تحکیم *consolidation* ۳- برش یا گسیختگی *failure* می‌شوند. مرحلهٔ اشباع‌سازی در سه آزمایش یکسان است و طی آن فرصت داده می‌شود تا نمونهٔ خاک مورد آزمایش اشباع شود (ملاک اشباع نمونه پارامتر فشار آب حفره‌ای B می باشد که اگر بزرگتر از *0.95* شود بیانگر رسیدن خاک به حالت اشباع است)

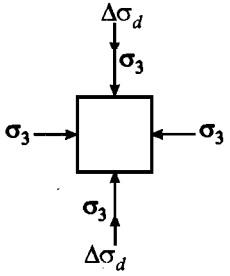
پارامتر فشار آب حفره‌ای اسکمپتون $B = \frac{u_c}{\sigma_3} \leq 1$

لازم به ذکر است ممکنست آزمایشات سه محوری بر روی نمونه‌های غیراشباع انجام شود که در آنصورت این مرحله از آزمایش حذف می‌شود. در مرحلهٔ تحکیم به نمونه فشار محفظه یا فشار محدودکننده (*Confining Pressure* یا σ_3) اعمال می‌شود و در طی این مرحله شیرهای زهکشی در آزمایشهای *CD* و *CU* باز و در آزمایش *UU* بسته می‌باشد.

در مرحلهٔ برش در حالیکه σ_3 به نمونه وارد و ثابت نگه داشته شده از طریق میلهٔ بارگذاری قائم از بالا به نمونه فشار محوری یا تنش انحرافی (*deviatoric stress*) یا ($\Delta\sigma_d$) اعمال می‌شود تا جائیکه در نمونه

www.PaeDP.com

گسیختگی رخ دهد. در طی این مرحله شیرهای زهکشی در آزمایش CD باز و در آزمایشهای CU و UU بسته می‌باشد.



$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d$$

طبق توضیحات فوق می‌توان نتیجه گرفت فشار آب حفره‌ای در سراسر انجام آزمایش CD صفر می‌باشد لذا تنش‌های کل و مؤثر یکی خواهند بود $(\sigma' = \sigma - u)$. همچنین نتیجه می‌شود که در مرحلهٔ تحکیم فشار آب حفره‌ای در آزمایش CU صفر است $(u_c = 0)$ اما در مرحلهٔ برش، فشار آب حفره‌ای صفر نیست $(\Delta u_d \neq 0)$.

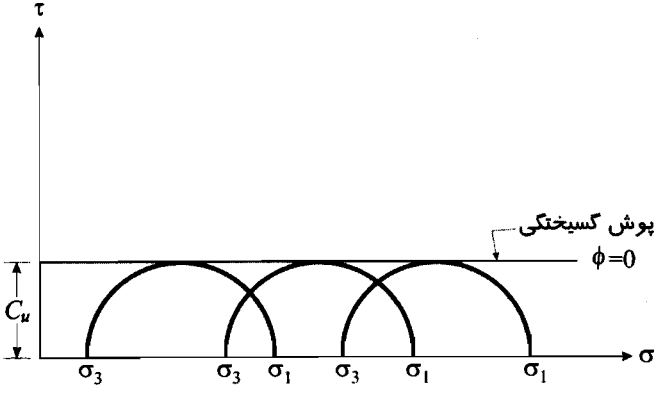
پارامتر فشار حفره‌ای اسکمپتون $A = \dfrac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d}$

از آنجائیکه آزمایشهای تحکیم یافتهٔ زهکشی شده بر روی خاکهای رسی، بسیار وقت‌گیر هستند در نتیجه به منظور تعیین پارامترهای زهکشی شدهٔ این خاکها، از آزمایشهای تحکیم یافتهٔزهکشی نشده با اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای استفاده می‌شود (به مسئلهٔ ۸-۱۲ مراجعه کنید)

نکته: در آزمایش UU فشار آب حفره‌ای در هیچ‌کدام از مراحل صفر نمی‌باشد و از رابطهٔ زیر تعیین می‌گردد:

$$u = u_c + \Delta u_d = B\sigma_3 + A\Delta\sigma_d = B\sigma_3 + A(\sigma_1 - \sigma_3)$$

این آزمایش به علت اینکه سریع انجام می‌شود به آزمایش سریع نیز مشهور بوده و معمولاً بر روی نمونه‌های رسی انجام می‌شود. در این آزمایش، برای فشارهای محدودکنندهٔ محفظه‌ای مختلف، تنش محوری انحرافی در لحظهٔ گسیختگی $(\Delta\sigma_d)_f$ یکسان می‌باشد و این باعث می‌شود دوایر تنش مور در آزمایش UU دارای یک شعاع ثابت باشند و پوش گسیختگی بصورت یک خط افقی در می‌آید.



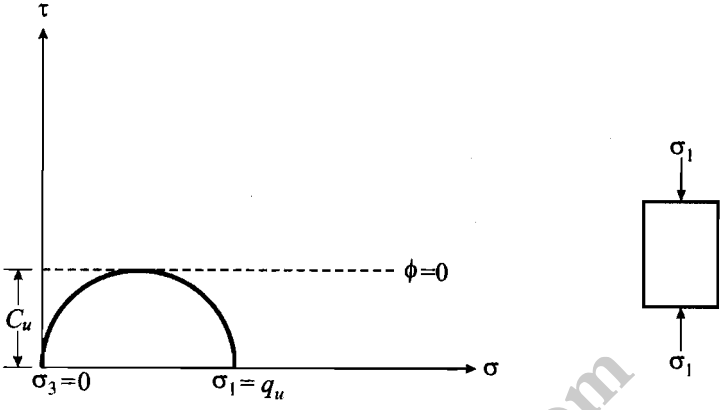
آزمایش فشاری محدود نشده برای رس اشباع

آزمایش فشاری محدود نشده یک نوع خاص آزمایش UU می‌باشد که معمولاً برای نمونه‌های رسی بکار می‌رود و در آن، فشار محدود کنندهٔ σ_3 مساوی صفر است.

www.PnuFB.com

$$\tau_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = C_u$$

به q_u در رابطهٔ فوق، مقاومت فشاری محدود نشده می‌گویند.



حساسیت و تیکسوتروپی رس

برای خیلی از نهشته‌های طبیعی خاک رس دیده شده است که مقاومت فشاری محدود نشده در بعد از بهم‌خوردگی (دست‌خوردگی) نمونه، بدون هرگونه تغییری در میزان رطوبت، به مقدار زیادی کاهش می‌یابد به این خاصیت خاکهای رس، حساسیت می‌گویند. درجهٔ حساسیت را می‌توان با رابطهٔ زیر بیان داشت:

$$S_t = \frac{q_u(\text{دست نخورده})}{q_u(\text{دست خورده})}$$

اگر بعد از بهم‌زدن، نمونهٔ رسی بدون هیچ تغییری در میزان رطوبتش، به حال خود گذاشته شود، با گذشت زمان مقاومت از دست رفته مجدداً کسب می‌شود،این پدیده را تیکسوتروپی می‌گویند.

چسبندگی زهکشی نشدهٔ نهشته‌های رسی عادی تحکیم یافته و پیش تحکیم یافته

در نهشته‌های رسی عادی تحکیم یافته، مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ C_u، با افزایش فشار سربار مؤثر (P)، افزایش می‌یابد.

$$\frac{C_u}{P} = 0.11 + 0.0037(PI)$$

در این رابطه PI نشانهٔ خمیری و برحسب درصد می‌باشد.

و برای رسهای پیش تحکیم یافته داریم:

$$\frac{\frac{C_u}{P}\ \text{پیش تحکیم یافته}}{\frac{C_u}{P}\ \text{عادی تحکیم یافته}} = (OCR)^{0.8}$$

توجه کنید در این رابطه OCR نسبت پیش تحکیمی می‌باشد و همانطور که در فصل۷ گفته شد از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$OCR = \frac{P_c}{P_0}$$

www.PnuBB.com

۸-۱ یک آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌ای از ماسهٔ خشک با تنش قائم 191.5 کیلونیوتن بر مترمربع انجام شده‌است. گسیختگی در تنش برشی 119.7 کیلونیوتن بر مترمربع رخ داده است. ابعاد نمونه 50.8×50.8 میلیمتر مربع و به ارتفاع 25.4 میلیمتر می‌باشد. مطلوب است تعیین زاویهٔ اصطکاک ϕ.

همچنین برای تنش قائم 144 کیلونیوتن بر متر مربع، نیروی برشی لازم برای ایجاد گسیختگی در نمونه چقدر است؟

الف) $\sigma = 191.5\,^{kN}/_{m^2} \qquad \tau_f = 119.7\,^{kN}/_{m^2} \qquad \phi = ?$

توجه کنید در سراسر این فصل، زیر نویس f برای تنشها، مخفف failure (گسیختگی) بوده و منظور، مقادیر تنشها در لحظهٔ گسیختگی می‌باشد.

$$\tau_f = \sigma\, tg\phi \qquad \Rightarrow \qquad \phi = tg^{-1}(\frac{\tau_f}{\sigma}) = tg^{-1}(\frac{119.7}{191.5}) = 32^\circ$$

ب) اگر $\sigma = 144\,^{kN}/_{m^2}$ ، آنگاه $\tau_f = ?$ ، T

$$\tau_f = \sigma\, tg\phi = 144tg(32) = 90\,^{kN}/_{m^2}$$

$$\Rightarrow \text{نیروی برشی } T = \tau_f \times A = 90 \times (50.8 \times 50.8 \times 10^{-6}) = 0.23kN$$

۸-۲ زاویهٔ اصطکاک داخلی یک ماسهٔ خشک متراکم شده، 41 درجه است. در آزمایش برش مستقیم بر روی این ماسه، تنش قائم 105 کیلونیوتن بر متر مربع بوده است. ابعاد نمونه 50.8×50.8 میلی‌متر مربع و به‌ارتفاع 30.5 میلیمتر می‌باشد، چه نیروی برشی باعث گسیختگی نمونه می‌شود؟

$$\tau_f = \sigma\, tg\phi = 105 \times tg(41) = 91.275\,^{kN}/_{m^2}$$

سطح مقطع نمونه $50.8 \times 50.8 = 2580.64mm^2 = 2.58 \times 10^{-3}\,m^2$

$$\text{تنش برشی} = \frac{\text{نیروی برشی}}{\text{سطح مقطع برشی}}$$

$$\Rightarrow \text{نیروی برشی } T = \tau_f \times A = 91.275 \times 2.58 \times 10^{-3} = 0.235kN = 235N$$

۸-۳ نتایج یک آزمایش برش مستقیم زهکشی شده بر روی یک نمونه رس عادی تحکیم یافته به‌شرح زیر است:

ابعاد نمونه:

قطر نمونه = 50mm ارتفاع نمونه = 15mm

شماره آزمایش	نیروی قائم (N)	نیروی برشی در گسیختگی (N)
1	271	120.6
2	406.25	170.64
3	474	204.1
4	541.65	244.3

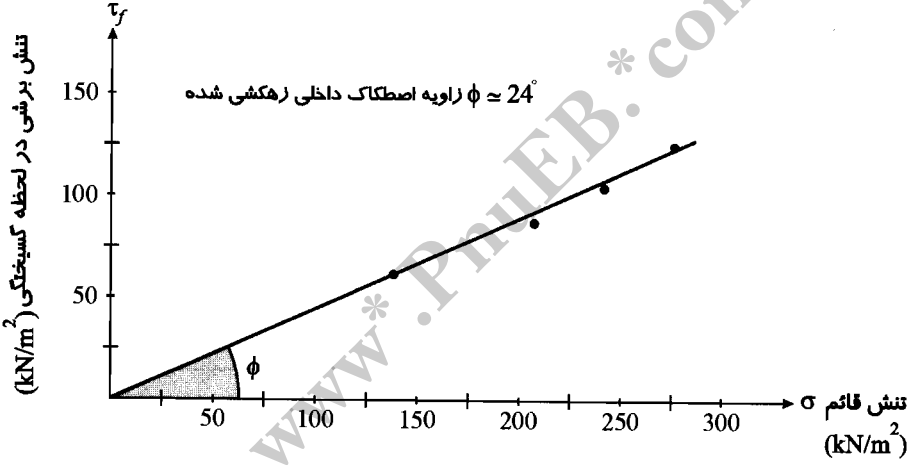
www.PnuFB.com

مطلوب است رسم تنش برشی در لحظهٔ گسیختگی در مقابل تنش قائم و تعیین زاویه اصطکاک داخلی زهکشی شده از روی این نمودار.

برای تعیین تنش برشی در لحظهٔ گسیختگی و تنش قائم کافیست نیروهای موجود را بر سطح مقطع افقی نمونه *(A)* تقسیم کنیم.

$$A = \pi \times \frac{(0.05)^2}{4} = 1.96 \times 10^{-3}\, m^2$$

شماره آزمایش	نیروی قائم (kN/m^2)	تنش برشی در گسیختگی (kN/m^2)
1	138.26	61.53
2	207.27	87.06
3	241.84	104.13
4	276.35	124.64



۸-۴ رابطهٔ پوش گسیختگی تنش مؤثر برای یک خاک ماسه‌ای شل که از یک آزمایش برش مستقیم بدست آمده، بصورت $\tau_f = \sigma' \tan 30^\circ$ می‌باشد. اگر یک آزمایش سه محوری زهکشی شده بر روی همان خاک با فشار محفظهٔ 70 کیلونیوتن بر متر مربع انجام شود، تنش انحرافی در لحظهٔ گسیختگی چقدر می‌باشد؟

از روی رابطهٔ داده شده در صورت مسئله واضح است $\phi = 30^\circ$ و همچنین چون خاک ماسه‌ای است $C = 0$ می‌باشد.

فشار محفظه $\sigma_3 = 70\, kN/m^2$

$$\sigma_1 = \sigma_3 tg^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2C tg(45 + \frac{\phi}{2})$$

$$\sigma_1 = 70 tg^2(45 + \frac{30}{2}) = 210\, kN/m^2$$

از طرفی داریم: $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d$

$\Rightarrow$ تنش انحرافی $\Delta\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 = 210 - 70 = 140\, kN/m^2$

www.*PnuEB.*com

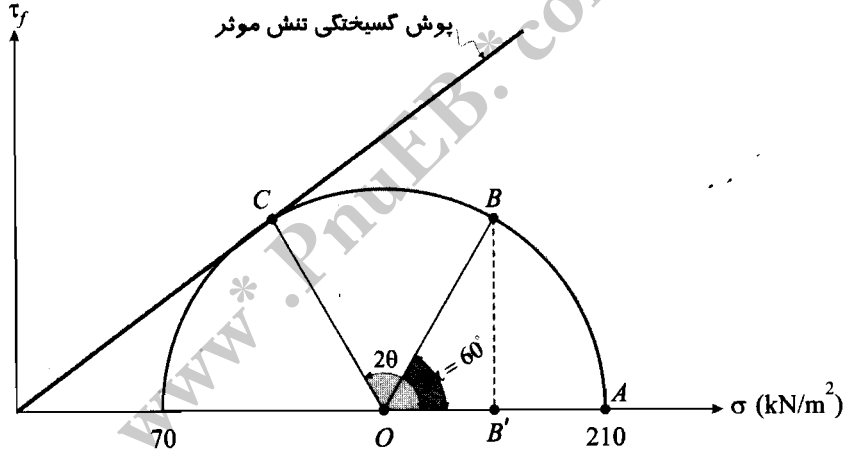
۸-۵ برای آزمایش سه محوری شرح داده شده در مسئلهٔ ۸- ۴ مطلوب است:

الف) تعیین زاویه‌ای که صفحهٔ گسیختگی با صفحهٔ اصلی حداکثر می‌سازد.

ب) تعیین تنش قائم و تنش برشی در لحظهٔ گسیختگی در روی صفحه‌ای که زاویهٔ 30 درجه با صفحهٔ اصلی حداکثر می‌سازد. همچنین توضیح دهید که چرا نمونه در امتداد این صفحه گسیخته نمی‌شود.

الف) $\theta = 45 + \frac{\phi}{2} = 45 + \frac{30}{2} = 60^\circ$

ب) برای حل این قسمت می‌توانیم از روابط موجود [(۶- ۸) و (۶- ۹)] استفاده کنیم ولی برای اینکه با دایرهٔ مور بیشتر آشنا شوید از دایرهٔ مور استفاده می‌کنیم. قبلاً گفته شد که اگر صفحه‌ای با صفحهٔ اصلی زاویهٔ α بسازد در دایرهٔ مور زاویهٔ این صفحه (مثل OB) با صفحهٔ اصلی (OA) 2α خواهد بود:



مختصات نقطهٔ B تنش قائم و تنش برشی را نتیجه می‌دهد.

شعاع دایرهٔ مور $\overline{OB} = \overline{OA} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{210 - 70}{2} = 70\ kN/m^2$

$\overline{OB'} = \overline{OB} \times cos(60) = 35\ kN/m^2$

$\Rightarrow \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \overline{OB'} = \frac{210 + 70}{2} + 35 = 175\ kN/m^2$ تنش قائم در صفحهٔ مذکور

$\overline{BB'} = \overline{OB} \times sin(60) = 60.62\ kN/m^2$

$\Rightarrow \tau = 60.62\ kN/m^2$ تنش برشی در صفحهٔ مذکور

تنش برشی‌ای که می‌تواند باعث گسیختگی در صفحه‌ای با $\alpha = 30^\circ$ شود، برابر است با:

$\tau_f = \sigma tg\phi = 175tg(30) = 101.04\ kN/m^2$

حال آنکه تنش برشی موجود در صفحهٔ مذکور برابر است با: $\tau = 60.62$ که کمتر از $\tau_f = 101.04$ می‌باشد لذا گسیختگی در امتداد این صفحه رخ نخواهد داد.

www.PnuEB.com

۶-۸ برای یک خاک رس عادی تحکیم یافته، نتایج آزماش سه محوری زهکشی شده به شرح زیر است:

فشار محفظه‌ای = 140 کیلونیوتن بر متر مربع

تنش انحرافی در لحظهٔ گسیختگی= 263.5 کیلونیوتن بر متر مربع

مطلوب است تعیین زاویهٔ اصطکاک داخلی ϕ.

$\sigma_3 = 140\,^{kN}/_{m^2} \qquad \Delta\sigma_d = 263.5 \qquad N.C$ رس $\Rightarrow C = 0$

$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d = 403.5\,^{kN}/_{m^2}$

$\sigma_1 = \sigma_3 tg^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2C\,tg(45 + \frac{\phi}{2})$

$403.5 = 140tg^2(45 + \frac{\phi}{2})$

$\Rightarrow tg(45 + \frac{\phi}{2}) = 1.7 \qquad \Rightarrow \qquad 45 + \frac{\phi}{2} = 59.5^\circ \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{\phi = 29^\circ}$

۷-۸ نتایج دو آزمایش سه محوری زهکشی شده بر روی یک خاک رس اشباع به شرح زیر است:

نمونهٔ ۱ ------- فشار محفظه‌ای $= 69\,^{kN}/_{m^2}$

فشار انحرافی در لحظهٔ گسیختگی $= 213\,^{kN}/_{m^2}$

نمونهٔ ۲ ------- فشار محفظه‌ای $= 120\,^{kN}/_{m^2}$

فشار انحرافی در لحظهٔ گسیختگی $= 258.7\,^{kN}/_{m^2}$

مطلوب است محاسبهٔ پارامترهای مقاومت برشی خاک.

نمونهٔ ۱ : $\sigma_3 = 69\,^{kN}/_{m^2}$ و $\Delta\sigma_d = 213\,^{kN}/_{m^2} \Rightarrow \sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d = 282\,^{kN}/_{m^2}$

نمونهٔ ۲ : $\sigma_3 = 120\,^{kN}/_{m^2}$ و $\Delta\sigma_d = 258.7\,^{kN}/_{m^2} \Rightarrow \sigma_1 = 378.7\,^{kN}/_{m^2}$

$\sigma_1 = \sigma_3 tg^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2Ctg(45 + \frac{\phi}{2})$

$$\begin{cases} (1)\ 282 = 69tg^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2Ctg(45 + \frac{\phi}{2}) \\ (2)\ 378.7 = 120tg^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2Ctg(45 + \frac{\phi}{2}) \end{cases}$$

منهای معادلهٔ (۱) معادلهٔ (۲) : $96.7 = 51tg^2(45 + \frac{\phi}{2})$

$\Rightarrow \phi = 18^\circ$

جایگذاری در معادلهٔ (۱) : $282 = 69\,tg^2(45 + \frac{18}{2}) + 2\,C\,tg(45 + \frac{18}{2})$

$\Rightarrow \quad C = 54.96\,^{kN}/_{m^2}$

www.*PnuEB*.com

۸-۸ اگر نمونهٔ رس شرح داده شده در مسئلهٔ ۸- ۷ در یک دستگاه سه محوری با فشار محفظه‌ای 200 کیلونیوتن بر متر مربع مورد آزمایش قرار گیرد، تنش اصلی حداکثر در لحظهٔ گسیختگی چقدر خواهد بود؟ در حین آزمایش شرایط زهکشی کامل وجود دارد.

$$\sigma_1 = \sigma_3 tg^2(45+\frac{\phi}{2}) + 2C\,tg(45+\frac{\phi}{2})$$

$$\sigma_1 = 200tg^2(45+\frac{18}{2}) + 2\times 54.96 \times tg(45+\frac{18}{2}) = 530.18\ {}^{kN}/_{m^2}$$

۸-۹ یک خاک ماسه‌ای دارای زاویهٔ اصطکاک زهکشی شدهٔ 35 درجه است. اگر در یک آزمایش سه محوری زهکشی شده روی این خاک، تنش انحرافی در هنگام گسیختگی 263 کیلونیوتن بر متر مربع باشد، فشار محفظه‌ای چقدر خواهد بود؟

خاک ماسه‌ای : $C=0 \quad \Rightarrow \quad \sigma_1 = \sigma_3 tg^2(45+\frac{\phi}{2})$

از طرفی : $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d$

$$\sigma_3 + 263 = \sigma_3 tg^2(45+\frac{35}{2})$$

$$\Rightarrow 2.69\sigma_3 = 263 \quad \Rightarrow \quad \sigma_3 = 97.76\ {}^{kN}/_{m^2}$$

۸-۱۰ یک آزمایش سه محوری زهکشی شده بر روی یک خاک رس عادی تحکیم یافته نشان داد که صفحهٔ گسیختگی زاویهٔ 35 درجه با افق می‌سازد. اگر نمونه تحت فشار محفظه‌ای103.5کیلونیوتن بر متر مربع مورد آزمایش قرار گرفته باشد، تنش اصلی حداکثر در لحظهٔ گسیختگی چقدر خواهد بود؟

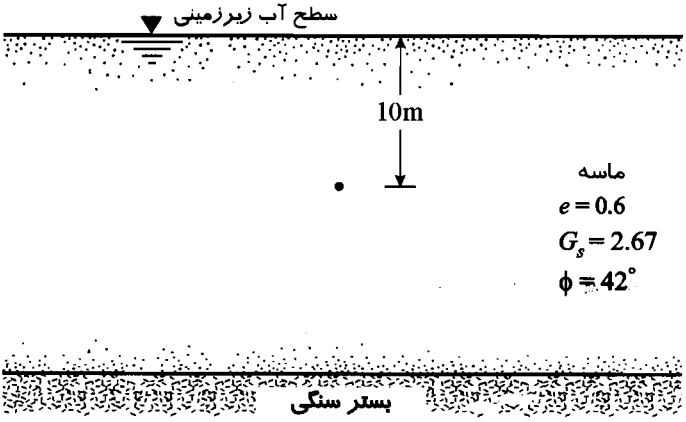
$\theta = 35^\circ$

$\sigma_3 = 103.5$

رس عادی تحکیم یافته $\Rightarrow C=0$

$$\sigma_1 = \sigma_3 tg^2(\theta) + 2\cancel{C}tg\theta = 103.5tg^2(35) = 50.74\ {}^{kN}/_{m^2}$$

۸-۱۱ در شکل، یک نهشتهٔ ماسه‌ای نشان داده شده است. مطلوب است تعیین مقاومت برشی در صفحهٔ افقی که در عمق 10متری زیر سطح زمین قرار دارد.



www.PnuEB.com

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \times \gamma_w = \frac{2.67+0.6}{1+0.6} \times 9.81 = 20.05\ ^{kN}/_{m^3}$$

تنش مؤثر در عمق 10 متری از سطح زمین $\sigma' = h \times (\gamma_{sat} - \gamma_w) = 10 \times (20.05 - 9.81) = 102.4\ ^{kN}/_{m^2}$

خاک ماسه‌ای : $C = 0$

$$\Rightarrow \tau_f = \sigma' tg\phi = 102.4 \times tg(42) = 92.2\ ^{kN}/_{m^2}$$

۱۲-۸ از یک آزمایش تحکیم یافتهٔ زهکشی نشده بر روی یک خاک رس عادی تحکیم یافته، نتایج زیر بدست آمده است:

$\sigma_3 = 84\ ^{kN}/_{m^2}$

تنش انحرافی در لحظهٔ گسیختگی $= (\Delta\sigma_d)_f = 64\ ^{kN}/_{m^2}$

فشار حفره‌ای $= (\Delta u_d)_f = 48\ ^{kN}/_{m^2}$

مطلوب است محاسبهٔ زاویهٔ اصطکاک داخلی تحکیم یافتهٔ زهکشی نشده و زاویهٔ اصطکاک زهکشی شده.

$\phi_{cu} = ?$ و $\phi = ?$

زاویهٔ اصطکاک تحکیم یافتهٔ زهکشی نشده از نتایج تنش کل بدست می‌آید و زاویهٔ اصطکاک زهکشی شده از نتایج تنش مؤثر بدست می‌آید. به عبارتی اگر از تنش مؤثر در آزمایش CU استفاده کنیم گویا از آزمایش CD (تحکیم یافتهٔ زهکشی شده) استفاده کرده‌ایم.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d = 84 + 64 = 148\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - \Delta u_d = 148 - 48 = 100\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - \Delta u_d = 84 - 48 = 36\ ^{kN}/_{m^2}$$

خاک رس عادی تحکیم یافته (NC) : $C = 0$

$$\sigma_1 = \sigma_3 tg^2(45 + \frac{\phi_{cu}}{2})$$

$$148 = 84\, tg^2(45 + \frac{\phi_{cu}}{2}) \quad \Rightarrow \quad \phi_{cu} = 16^\circ$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 tg^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

$$100 = 36 tg^2(45 + \frac{\phi}{2}) \quad \Rightarrow \quad \phi = 28.1^\circ$$

توجه کنید ممکنست بجای ϕ از ϕ_d استفاده شود.

نکته: در عمل هم، هرگاه به زاویهٔ اصطکاک زهکشی شده نیاز باشد، بجای استفاده از آزمایش CD که آزمایش آرامی می‌باشد و ممکنست چند روز به طول بیانجامد، از آزمایش CU استفاده می‌کنند و با ثبت مقادیر Δu از مقادیر تنش مؤثر استفاده می‌کنند (همانند مسئلهٔ فوق).

۱۳-۸ مقاومت برشی یک رس عادی تحکیم یافته طبق رابطهٔ $\tau_f = \sigma' tg31^\circ$ تعریف می‌شود. یک آزمایش تحکیم یافتهٔ زهکشی نشده بر روی این خاک رسی انجام شد که نتایج آن به شرح زیر است:

www.PnuEP.com

فشار محفظه‌ای $= 112\ ^{kN}/_{m^2}$

تنش انحرافی در لحظهٔ گسیختگی $= 100.14\ ^{kN}/_{m^2}$

مطلوب است تعیین:

الف: زاویهٔ اصطکاک تحکیم یافتهٔ زهکشی نشده (ϕ_{cu})

$$\sigma_3 = 112\ ^{kN}/_{m^2} \qquad \Delta\sigma_d = 100.14\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d = 112 + 100.14 = 212.14\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 tg^2(45 + \frac{\phi_{cu}}{2})$$

$$212.14 = 112tg^2(45 + \frac{\phi_{cu}}{2}) \qquad \Rightarrow \qquad \phi_{cu} = 18^\circ$$

ب: فشار آب حفره‌ای در نمونه در لحظهٔ گسیختگی

با توجه به رابطهٔ داده شده در صورت مسئله متوجه می‌شویم $\phi = 31^\circ$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 tg^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

$$\sigma_1 - \Delta u_d = (\sigma_3 - \Delta u_d)tg^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

$$212.14 - \Delta u_d = (112 - \Delta u_d)tg^2(45 + \frac{31}{2})$$

$$\Rightarrow \quad \Delta u_d = 64.98\ ^{kN}/_{m^2}$$

۸-۱۴ برای نمونهٔ رسی تشریح شده در مسئلهٔ ۸- ۱۳، مقدار تنش انحرافی در لحظهٔ گسیختگی با فشار محفظه‌ای $\sigma_3 = 112\ ^{kN}/_{m^2}$ **(همان فشار محفظه‌ای مسئلهٔ قبل) در صورتی که آزمایش بصورت زهکشی شده انجام شود، چقدر است؟**

$$\sigma_3 = 112\ ^{kN}/_{m^2} \qquad \phi = 31^\circ \qquad \Delta\sigma_d = ?$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 tg^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

$$\sigma_3 + \Delta\sigma_d = \sigma_3 tg^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

$$112 + \Delta\sigma_d = 112tg^2(45 + \frac{31}{2})$$

$$\Rightarrow \qquad \Delta\sigma_d = 237.89\ ^{kN}/_{m^2}$$

۸-۱۵ زاویهٔ اصطکاک تحکیم یافتهٔ زهکشی نشدهٔ یک ماسه لای دار، 22 درجه و زاویهٔ اصطکاک زهکشی شدهٔ آن 32 درجه $(c = 0)$ **می‌باشد. اگر یک آزمایش تحکیم یافتهٔ زهکشی نشده بر روی چنین خاکی با فشار محفظهٔ 90کیلونیوتن بر متر مربع انجام شود، تنش اصلی حداکثر کل در لحظهٔ گسیختگی چقدر خواهد شد؟ همچنین فشار حفره‌ای تولید شده در لحظهٔ گسیختگی را محاسبه نمایید.**

www.PnuEB.com

$\phi_{cu} = 22^\circ \quad \phi = 32^\circ \quad \sigma_3 = 90\,^{kN}/_{m^2} \quad \sigma_1 = ? \quad \Delta u_d = ?$

$$\sigma_1 = \sigma_3 tg^2(45 + \frac{\phi_{cu}}{2}) = 90 tg^2(45 + \frac{22}{2}) = 197.82\,^{kN}/_{m^2}$$

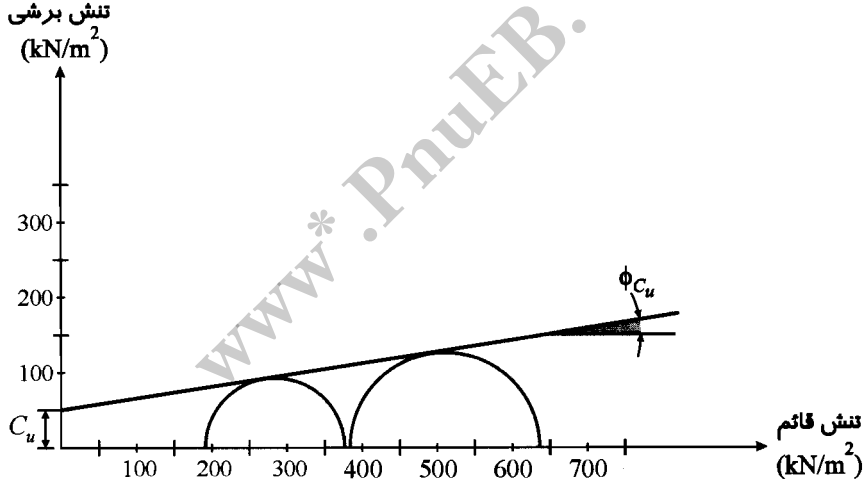
$$\sigma_1' = \sigma_3' tg^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

$$197.82 - \Delta u_d = (90 - \Delta u_d) \times tg^2(45 + \frac{32}{2}) \Rightarrow \Delta u_d = 42.26\,^{kN}/_{m^2}$$

۱۶-۸ نتایج زیر مربوط به آزمایش سه محوری تحکیم یافتهٔ زهکشی نشده بر روی رس می‌باشند.

شمارهٔ نمونه	σ_3 (kN/m^2)	σ_1 در لحظهٔ گسیختگی (kN/m^2)
1	191.67	375.67
2	383.34	636.33

مطلوب است رسم دایرهٔ مور تنش کل و تعیین پارامترهای مقاومت برشی برای شرایط تحکیم یافتهٔ زهکشی نشده.



با توجه به شکل فوق: $C_u = 50\,^{kN}/_{m^2}$ و $\phi_{cu} = 7^\circ$

۱۷-۸ نتایج یک آزمایش تحکیم نیافتهٔ زهکشی نشده بر روی یک نمونه خاک رس اشباع به قرار زیر است:

$\sigma_3 = 97.74\,^{kN}/_{m^2}$

$\sigma_1 = 190.59\,^{kN}/_{m^2}$ در لحظهٔ گسیختگی

تنش محوری در لحظهٔ گسیختگی در صورتی که نمونه‌ای مشابه تحت آزمایش فشار محدود نشده قرار گیرد، چقدر خواهد بود؟

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d$$

$$\Rightarrow \Delta\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 = 190.59 - 97.74 = 92.85\,^{kN}/_{m^2}$$

www.PnuEB.com

۱۸-۸ زاویهٔ اصطکاک ϕ یک نمونهٔ رس عادی تحکیم یافته که از آزمایش سه محوری زهکشی شده بدست آمده، مساوی 15 درجه است. مقاومت فشاری محدود نشدهٔ q_u برای آن خاک 100 کیلونیوتن بر متر مربع است. مطلوبست تعیین فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی برای آزمایش فشاری محدود نشده.

$C = 0$: رس عادی تحکیم یافته *(NC)*

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 tg^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

$$\sigma_1 - u = (\sigma_3 - u) tg^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

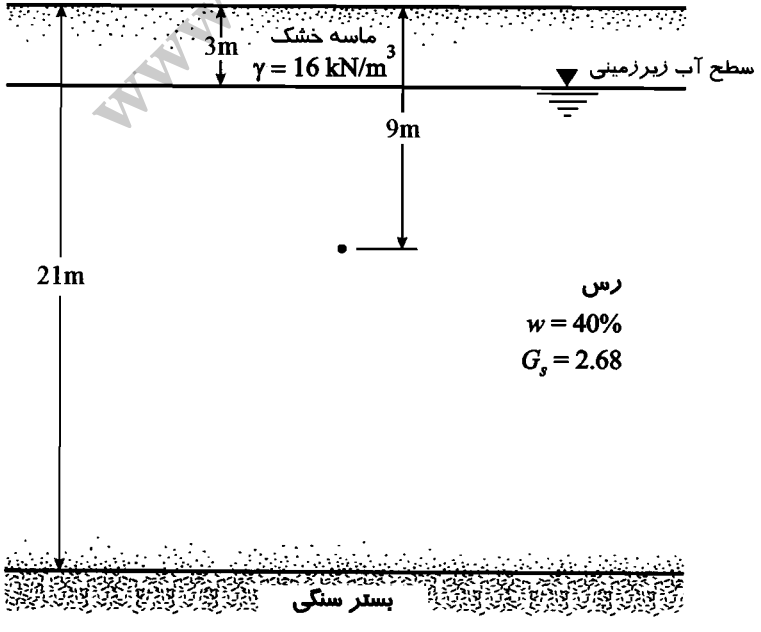
دقت کنید در آزمایش فشاری محدود نشده داریم که $\sigma_3 = 0$ و $\sigma_1 = q_u$

$\phi = 15^\circ$ و $\sigma_3 = 0$ و $\sigma_1 = 100\,kN/m^2$

$$100 - u = (0 - u) tg^2(45 + \frac{15}{2})$$

$$\Rightarrow u = -143.2\,kN/m^2$$

۱۹-۸ در شکل مقطع یک خاک نشان داده شده است. لایهٔ رسی عادی تحکیم یافته با حد مایع 68 درصد و حد خمیری 27 درصد می‌باشد. مطلوب است تخمین مقاومت فشاری محدود نشدهٔ رس در عمق 9 متری از سطح زمین.



رس $\gamma_{sat} = \frac{G_s(1+\omega)}{1+\omega G_s} \times \gamma_w = \frac{2.68(1+0.4)}{1+0.4\times 2.68} \times 9.81 = 17.76\,kN/m^2$

www.PnuEB.com

فشار سربار مؤثر روی تراز 9 متر از سطح زمین $P = 3\times 16 + (9-3)\times(17.76-9.81)$

$$= 95.7\ ^{kN}/_{m^2}$$

شاخص خمیری $PI = LL - PL = 68 - 27 = 41$

$$\frac{C_u}{P} = 0.11 + 0.0037(PI)$$

$$\frac{C_u}{95.7} = 0.11 + 0.0037(41)$$

$$\Rightarrow C_u = 25.04\ ^{kN}/_{m^2}$$

توجه کنید در رابطهٔ فوق PI باید بر حسب درصد باشد یعنی مقدار 41 را وارد می‌کنیم نه 0.41

از طرفی داریم $q_u = 2C_u = 2(25.04) = 50.08\ ^{kN}/_{m^2}$

۲۰-۸ اگر لایهٔ رسی مسئلهٔ ۸- ۱۹ پیش تحکیم یافته و نسبت پیش تحکیمی مساوی 3.2 باشد، مطلوب است تخمین مقاومت فشاری محدود نشده. از نتایج مسئلهٔ ۸- ۱۹ استفاده نمایید.

نسبت پیش تحکیمی $OCR = 3.2$

$$\frac{\left(\frac{C_u}{P}\right)_{\text{پیش تحکیم یافته}}}{\left(\frac{C_u}{P}\right)_{\text{عادی تحکیم یافته}}} = (OCR)^{0.8}$$

$$\left(\frac{C_u}{P}\right)_{\text{عادی تحکیم یافته}} = \frac{25.04}{95.7} = 0.26$$

$$\frac{\left(\frac{C_u}{P}\right)_{\text{پیش تحکیم یافته}}}{0.26} = (3.2)^{0.8}$$

$$\left(\frac{C_u}{P}\right)_{\text{پیش تحکیم یافته}} = 0.66$$

$$\Rightarrow C_u = 0.66\times 95.7 = 63.16\ ^{kN}/_{m^2}$$

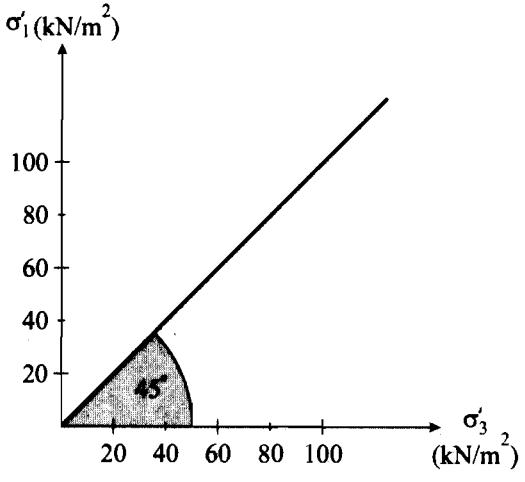
$\Rightarrow$ مقاومت فشاری محدود نشده $q_u = 2C_u = 126.32\ ^{kN}/_{m^2}$

۲۱-۸ مثال ۸- ۸ داخل فصل را با $\phi = 28^\circ$ و $C = 19.55\ ^{kN}/_{m^2}$ و $\sigma_3 = 84\ ^{kN}/_{m^2}$ تکرار نمایید.

توجه کنید این قسمت از فصل هشتم یعنی مسیر تنش *(stress path)* از بخشهای مهمی می‌باشد که در کتاب مکانیک خاک کمتر به آن پرداخته شده و اکثر اساتید نیز از تدریس آن در مقطع کارشناسی پرهیز می‌کنند و این بخش به شکل مفصل و جامعی در درس مکانیک خاک پیشرفته در دورهٔ کارشناسی ارشد مـــورد بحث قرار می‌گیرد لذا ما نیزبطور نمونه تنها این مسئله را حل می‌کنیم ولی از حل مسائل ۸- ۲۳ و ۸- ۲۴ خودداری می‌کنیم.

الف) ترسیم خط قطری

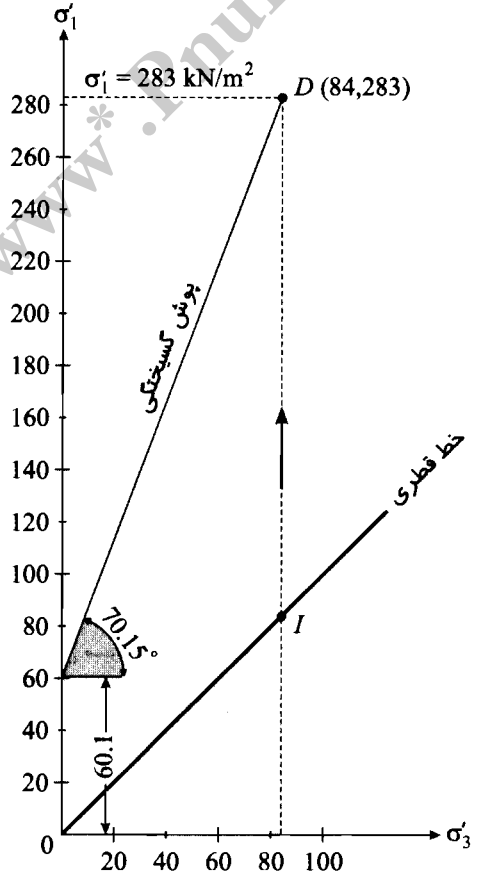
www.PnuEB.com



ب) ترسیم پوش گسیختگی

شیب خط پوش گسیختگی $tg\,b' = tg^2(45 + \frac{\phi}{2}) = tg^2(45 + \frac{28}{2}) = 2.77 \Rightarrow b' = tg^{-1}(2.77) = 70.15^\circ$

نقطهٔ تلاقی پوش گسیختگی با محور قائم $a' = 2C\sqrt{tg\,b'} = 2 \times 19.55 \times \sqrt{2.77} = 60.1\,kN/m^2$



www.PnuEB.com

پ) مسیر تنش آزمایش تحکیم یافتهٔ زهکشی شده که خطی قائم است *(ID)* را به راحتی ترسیم می‌کنیم نقطهٔ D از تلاقی خط قائم مربوط به $\sigma_3 = 84$ با پوش گسیختگی بدست می‌آید.

ت) نقطهٔ گسیختگی همان نقطهٔ D می‌باشد که مختصات آن نشان می‌دهد $\sigma_1' = 283\ ^{kN}/_{m^2}$

۸-۱۲ رابطهٔ ۸- ۷ داخل فصل را به دست آورید.

رابطهٔ ۸- ۷:

$$\sigma_1 = \sigma_3 tg^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2C tg(45 + \frac{\phi}{2})$$

$$\begin{cases} \sigma = \dfrac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \\ \tau_f = \dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \end{cases}$$

$\tau_f = C + \sigma\, tg\phi$ داشتیم

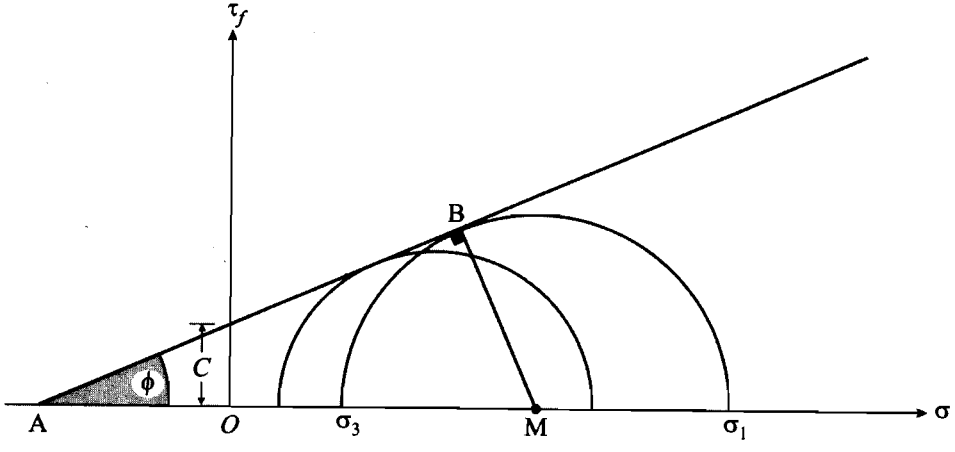
جایگذاری τ_f و σ در رابطهٔ فوق $\longrightarrow$ $\left(\dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)\sin 2\theta = C + \left[\left(\dfrac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right) + \left(\dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)\cos 2\theta\right] tg\phi$

با ساده کردن $\longrightarrow$ $\sigma_1 = \sigma_3 + \dfrac{\sigma_3 tg\phi + C}{\frac{1}{2}.\sin 2\theta - \cos^2\theta\, tg\phi}$

از طرفی داریم: $\theta = 45 + \dfrac{\phi}{2}$

با جایگذاری θ و ساده سازی و استفاده از رابطه مثلثاتی ثابت می‌شود: $\sigma_1 = \sigma_3 tg^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2C tg(45 + \frac{\phi}{2})$

روش دوم: با استفاده از دایرهٔ مور



www.* PnuEB*.com

$$\sin\phi = \frac{\text{ضلع مقابل}}{\text{وتر}} = \frac{BM}{AM} = \frac{BM}{AO+OM} = \frac{\frac{(\sigma_1-\sigma_3)}{2}}{C\cot g\phi + \frac{(\sigma_1+\sigma_3)}{2}}$$

$$\xrightarrow{\text{با ساده سازی}} \quad \sigma_1 = \sigma_3 \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} + 2C\frac{\cos\phi}{1-\sin\phi}$$

از طرفی طبق روابط مثلثاتی داریم : $\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} = tg^2(45+\frac{\phi}{2})$ و $\frac{\cos\phi}{1-\sin\phi} = tg(45+\frac{\phi}{2})$

$$\Rightarrow \sigma_1 = \sigma_3 tg^2(45+\frac{\phi}{2}) + 2C\,tg(45+\frac{\phi}{2})$$

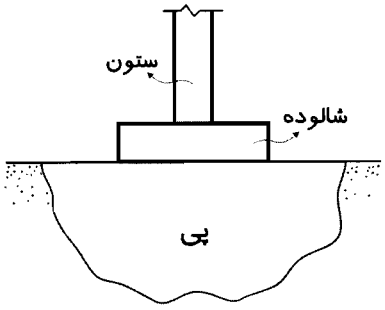
www.PnuEB.com

فصل ۱۰

ظرفیت باربری پی برای شالوده‌های سطحی

nuEB.*com

طبق تعریف، شالوده به قسمتی از سازه می‌گویند که وظیفهٔ توزیع نیرو بر روی خاک را دارد و به مجموعهٔ شالوده و خاک زیر آن پی گفته می‌شود (به شکل شماتیک زیر نگاه کنید)



به لحاظ کلی شالوده‌ها را به دو دستهٔ شالوده‌های سطحی و شالوده‌های عمیق تقسیم‌بندی می‌کنند. بطوریکه اگر نسبت عمق به عرض شالوده‌ای حدوداً کمتر از 4 باشد، شالودهٔ سطحی و اگر بزرگتر از 4 باشد، شالودهٔ عمیق می‌باشد. شمعها (*piles*) جزء رستهٔ شالوده‌های عمیق هستند که در درس مهندسی پی بررسی می‌شوند.

رابطهٔ ظرفیت باربری نهایی ترزاقی برای شالوده‌های سطحی

برای شالودهٔ نواری * :

$$q_u = q_c + q_q + q_\gamma = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma$$

* مقصود از شالودهٔ نواری، شالودهٔ مستطیلی طویلی با نسبت طول به عرض بزرگتر از 5 می‌باشد.

در این رابطه:

q_u = ظرفیت باربری نهایی (*ultimate*) شالوده

q_c = ظرفیت باربری‌ای که از چسبندگی حاصل می‌شود.

q_q = ظرفیت باربری‌ای که در اثر سربار بوجود می‌آید.

q_γ = ظرفیت باربری‌ای که در اثر وزن مخصوص ایجاد می‌شود.

c = چسبندگی خاک

q = سربار

γ = وزن مخصوص خاک

B = عرض شالوده

N_c و N_q و N_γ = ضرایب ظرفیت باربری

برای شالودهٔ مربع :

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma$$

ضلع مربع

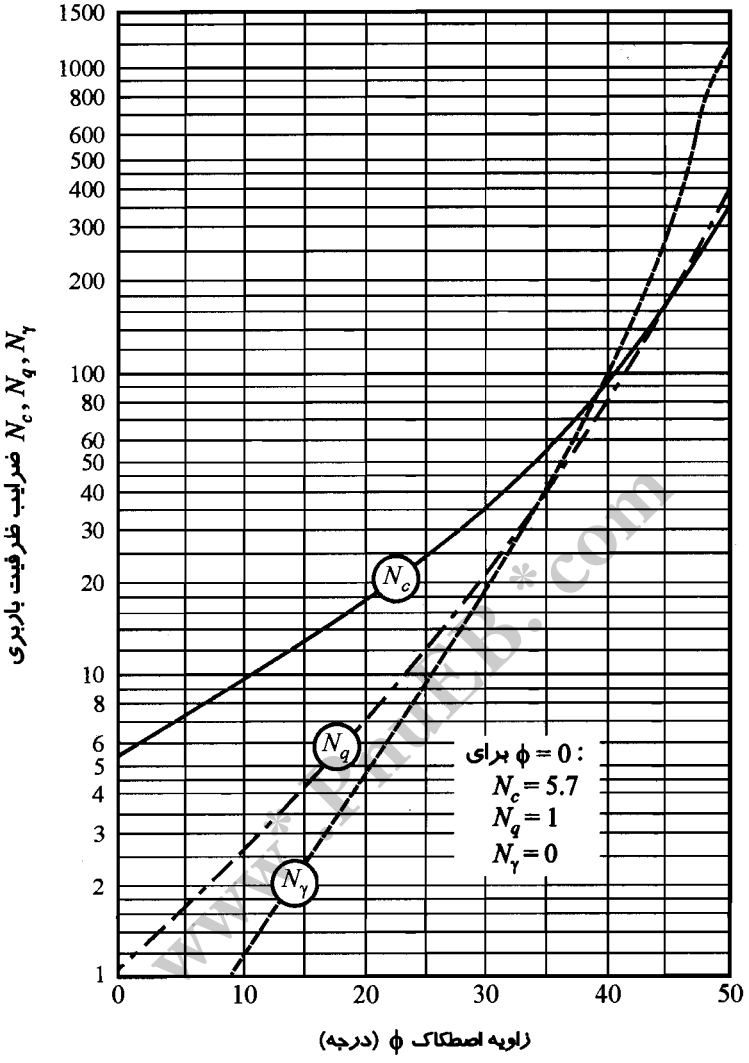
برای شالودهٔ دایره :

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.3\gamma BN_\gamma$$

قطر دایره

با توجه به زاویه اصطکاک (ϕ) و نمودار شکل ۱۰-۷ مقادیر ضرایب ظرفیت باربری قابل تعیین می‌باشند. امّا روابط مطرح شده در فوق برای حالتی هستند که در خاک گسیختگی برشی کلی رخ دهد.

www.PnuEB.com



ضرایب ظرفیت باربری ترزاقی برای گسیختگی برشی کلی

ولی در حالت گسیختگی برشی موضعی، می‌توان فرض کرد که:

$$c' = \frac{2}{3}c$$

$$tg\phi' = \frac{2}{3}tg\phi \qquad \Rightarrow \qquad \phi' = tg^{-1}(\frac{2}{3}tg\phi)$$

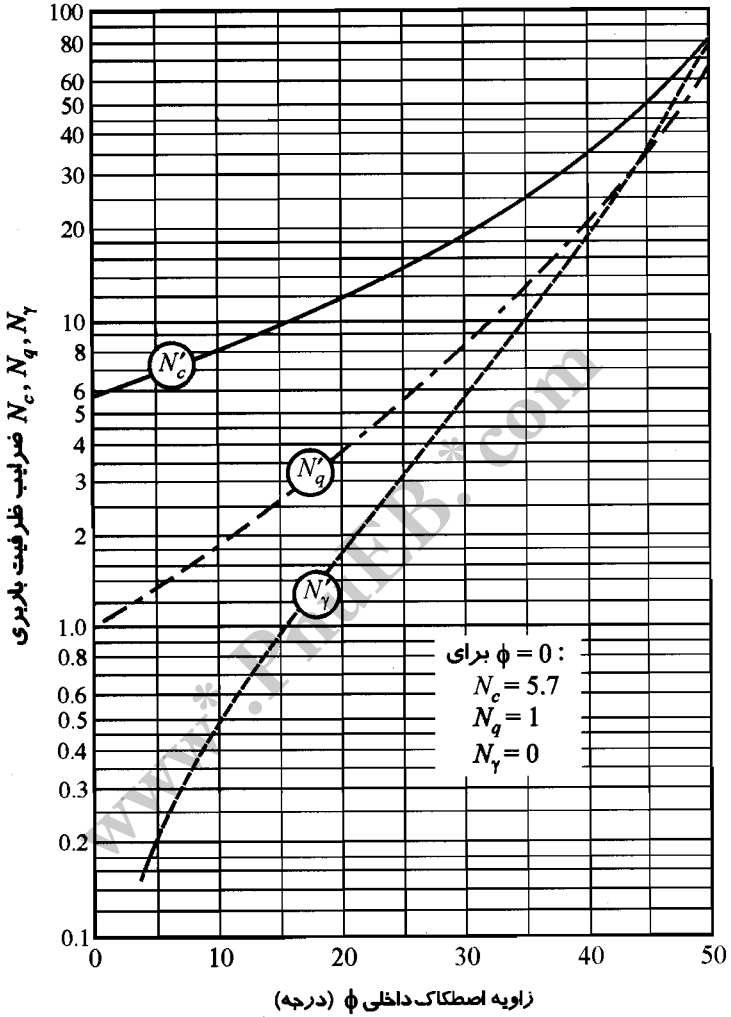
با فرضیات فوق، روابط ظرفیت باربری نهایی در گسیختگی برشی موضعی به شکل زیر در می‌آیند:

برای شالودهٔ نواری : $q'_u = c'N'_c + qN'_q + \frac{1}{2}\gamma BN'_\gamma$

برای شالودهٔ مربع : $q'_u = 1.3c'N'_c + qN'_q + 0.4\gamma BN'_\gamma$

برای شالودهٔ دایره : $q'_u = 1.3c'N'_c + qN'_q + 0.3\gamma BN'_\gamma$

ضرایب ظرفیت باربری N'_c و N'_q و N'_γ برمبنای زاویه اصطکاک داخلی از شکل ۱۰-۸ قابل تعیین می‌باشند.



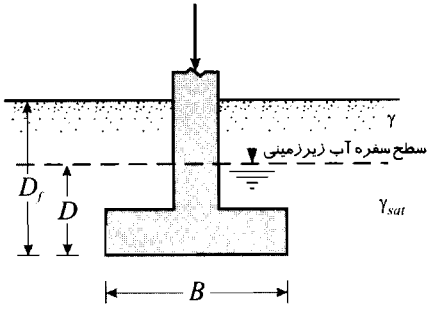
ضرایب ظرفیت باربری ترزاقی برای گسیختگی برشی موضعی

تأثیر سفرهٔ آب زیرزمینی روی مقادیر ظرفیت باربری نهایی

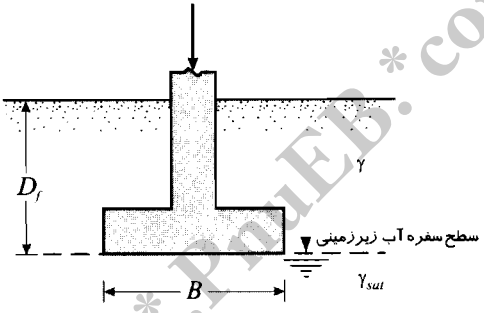
حالت۱: اگر تراز سطح سفرهٔ آب زیرزمینی در ارتفاع D از کف شالوده قرار داشته باشد، مقدار q در جملهٔ دوم ظرفیت باربری به شکل زیر درمی‌آید:

$$q = \gamma(D_f - D) + \gamma' D$$

که در آن γ' وزن مخصوص غوطه‌وری خاک $(\gamma_{sat} - \gamma_w)$ می‌باشد. همچنین، وزن مخصوص γ خاک در جملهٔ سوم رابطهٔ ظرفیت باربری باید با γ' تعویض شود.



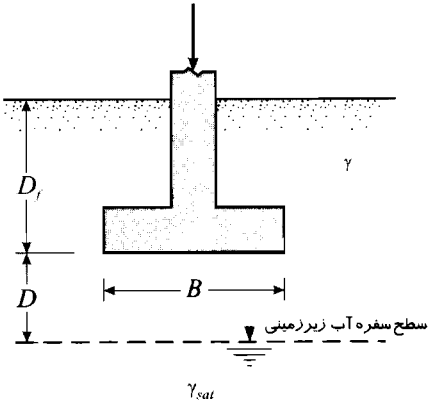
حالت۲: اگر تراز سفرهٔ آب زیرزمینی منطبق برکف شالوده باشد $(D = D_f)$ مقدار q در جملهٔ دوم برابر γD_f می‌باشد، ولیکن وزن مخصوص γ در جملهٔ سوم رابطه، باید با γ' عوض شود.



حالت۳: اگر سطح سفرهٔ آب زیرزمینی پائینتر از تراز کف پی باشد در اینصورت q در جملهٔ دوم برابر γD_f بوده ولیکن وزن مخصوص γ درجملهٔ سوم بایستی با γ_{ave} جایگزین شود که γ_{ave} از روابط زیر تعیین می‌شود:

$D \le B$ اگر : $\gamma_{ave} = \frac{1}{B}[\gamma D + \gamma'(B - D)]$

$D > B$ اگر : $\gamma_{ave} = \gamma$



www.PnuEB.com

ظرفیت باربری نهایی خالص: q_u ارائه شده در قبل، بیانگر کل‌باری است که می‌تواند بر شالوده وارد شود که این بار مشتمل بر وزن سازهٔ بالای شالوده به اضافه وزن قسمتی از خاکی است که شالوده در آن تا عمق D_f فرو رفته است یعنی $q = \gamma D_f$. حال اگر بخواهیم تنها بار سازهٔ فوقانی‌ای را که می‌توان روی شالوده اعمال نمود (بصورت خالص) بدست آوریم، ظرفیت باربری نهایی خالص مطرح می‌شود:

$$q_{u(net)} = q_u - q$$

ظرفیت باربری مجاز: برای حصول اطمینان از پایداری شالوده در برابر بارهای وارده باید ظرفیت باربری نهایی را بر ضریبی بزرگتر از ۱ تقسیم کنیم که به این ضریب، ضریب اطمینان $(F.S)$ می‌گویند و به مقدار حاصل شده از این تقسیم، ظرفیت باربری مجاز شالوده می‌گویند و با q_{all} نشان می‌دهند:

$$\boxed{q_{all} = \frac{q_u}{F.S}}$$

و به طریق مشابه:

$q_{all(net)} = \dfrac{q_{u(net)}}{F.S}$ ظرفیت باربری مجاز خالص

معمولاً ضریب اطمینان در حدود 3، برای پایداری شالوده‌ها، رضایت بخش می‌باشد.

رابطهٔ عمومی ظرفیت باربری

$$\boxed{q_u = c\lambda_{cs}\lambda_{cd}\lambda_{ci}N_c + q\lambda_{qs}\lambda_{qd}\lambda_{qi}N_q + \frac{1}{2}\lambda_{\gamma s}\lambda_{\gamma d}\lambda_{\gamma i}\gamma B N_\gamma}$$

که در آن:

ضرایب شکل = λ_{cs} , λ_{qs} , $\lambda_{\gamma s}$

ضرایب عمق = λ_{cd} , λ_{qd} , $\lambda_{\gamma d}$

ضرایب شیب بار = λ_{ci} , λ_{qi} , $\lambda_{\gamma i}$

ضرایب ظرفیت باربری (N_c, N_q, N_c) مطابق جدول ۱۰-۱ و ضرایب شکل و عمق و شیب بار مطابق جدول ۱۰-۲ قابل تعیین می‌باشند.

www.PnuEB.com

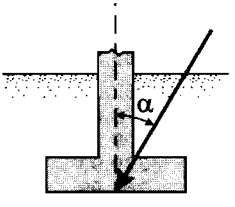
جدول ۱۰-۱ ضرایب ظرفیت باربری (روابط ۱۰-۳۲، ۱۰-۳۴ و ۱۰-۳۶)

ϕ (1)	N_q (2)	N_q (3)	N_c (4)	N_γ (5)	$\tan\phi$ (6)
0	5.14	1.00	0.00	0.20	0.00
1	5.38	1.09	0.07	0.20	0.02
2	5.63	1.20	0.15	0.21	0.03
3	5.90	1.31	0.24	0.22	0.05
4	6.19	1.43	0.34	0.23	0.07
5	6.49	1.57	0.45	0.24	0.09
6	6.81	1.72	0.57	0.25	0.11
7	7.16	1.88	0.71	0.26	0.12
8	7.53	2.06	0.86	0.27	0.14
9	7.92	2.25	1.03	0.28	0.16
10	8.35	2.47	1.22	0.30	0.18
11	8.80	2.71	1.44	0.31	0.19
12	9.28	2.97	1.69	0.32	0.21
13	9.81	3.26	1.97	0.33	0.23
14	10.37	3.59	2.29	0.35	0.25
15	10.98	3.94	2.65	0.36	0.27
16	11.63	4.34	3.06	0.37	0.29
17	12.34	4.77	3.53	0.39	0.31
18	13.10	5.26	4.07	0.40	0.32
19	13.93	5.80	4.68	0.42	0.34
20	14.83	6.40	5.39	0.43	0.36
21	15.82	7.07	6.20	0.45	0.38
22	16.88	7.82	7.13	0.46	0.40
23	18.05	8.66	8.20	0.48	0.42
24	19.32	9.60	9.44	0.50	0.45
25	20.72	10.66	10.88	0.51	0.47
26	22.25	11.85	12.54	0.53	0.49
27	23.94	13.20	14.47	0.55	0.51
28	25.80	14.72	16.72	0.57	0.53
29	27.86	16.44	19.34	0.59	0.55
30	30.14	18.40	22.40	0.61	0.58
31	32.67	20.63	25.99	0.63	0.60
32	35.49	23.18	30.22	0.65	0.62
33	38.64	26.09	35.19	0.68	0.65
34	42.16	29.44	41.06	0.70	0.67
35	46.12	33.30	48.03	0.72	0.70
36	50.59	37.75	56.31	0.75	0.73
37	55.63	42.92	66.19	0.77	0.75
38	61.35	48.93	78.03	0.80	0.78
39	67.87	55.96	92.25	0.82	0.81
40	75.31	64.20	109.41	0.85	0.84
41	83.86	73.90	130.22	0.88	0.87
42	93.71	85.38	155.55	0.91	0.90
43	105.11	99.02	186.54	0.94	0.93
44	118.37	115.31	224.64	0.97	0.97
45	133.88	134.88	271.76	1.01	1.00
46	152.10	158.51	330.35	1.04	1.04
47	173.64	187.21	403.67	1.08	1.07
48	199.26	222.31	496.01	1.12	1.11
49	229.93	265.51	613.16	1.15	1.15
50	266.89	319.07	762.89	1.20	1.19

www.PnuEB.com

جدول ۱۰-۲ مقادیر ضرایب شکل، عمق و تمایل (شیب) بار

ضریب شکل برای شالودهٔ مستطیلی (طول شالوده $= L$ و عرض شالوده $= B$)
$\lambda_{cs} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right)\left(\frac{N_q}{N_c}\right)$
$\lambda_{qs} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right)(tg\phi)$
$\lambda_{\gamma s} = 1 - 0.4\left(\frac{B}{L}\right)$
ضریب شکل برای شالوده‌های دایره و مربع
$\lambda_{cs} = 1 + \frac{N_q}{N_c}$
$\lambda_{qs} = 1 + tg\phi$
$\lambda_{\gamma s} = 0.6$
ضریب عمق برای $\frac{D_f}{B} \le 1$
$\lambda_{qd} = 1 + 2tg\phi(1 - \sin\phi)^2\left(\frac{D_f}{B}\right)$
$\lambda_{cd} = \lambda_{qd} - \frac{1 - \lambda_{qd}}{N_q tg\phi}$
$\lambda_{\gamma d} = 1$
ضریب عمق برای $\phi = 0$
$\lambda_{\gamma d} = 1 + 0.4\left(\frac{D_f}{B}\right)$
ضریب عمق برای $\frac{D_f}{B} > 1$
$\lambda_{qd} = 1 + 2tg\phi(1 - \sin\phi)^2 tg^{-1}\left(\frac{D_f}{B}\right)$
$\lambda_{\gamma d} = 1$
ضریب عمق برای $\phi = 0$
$\lambda_{cd} = 1 + 0.4tg^{-1}\left(\frac{D_f}{B}\right)$
ضریب شیب بار
$\lambda_{ci} = \left(1 - \frac{\alpha^\circ}{90^\circ}\right)^2$
$\lambda_{qi} = \left(1 - \frac{\alpha^\circ}{90^\circ}\right)^2$
$\lambda_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\alpha^\circ}{\phi^\circ}\right)^2$



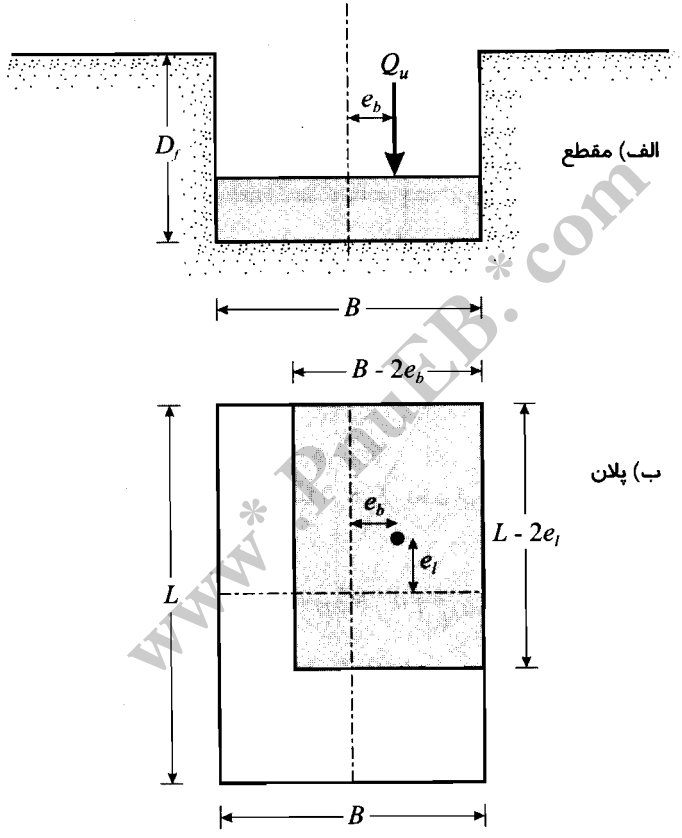
www.PnuEB.com

بار نهایی برای شالودهٔ سطحی با بار برون محور

اگر باری که روی شالوده وارد می‌شود در راستای محور مرکزی شالوده نباشد (چه در راستای یک محور و یا در راستای هر دو محور) در اینصورت طبق نظریهٔ مایرهوف از طول و عرض مؤثر استفاده می‌کنیم:

عرض مؤثر شالوده : $B' = B - 2e_b$

طول مؤثر شالوده : $L' = L - 2e_l$



بار نهایی شالوده سطحی تحت بار برون محور

در اینصورت مقدار B در جملهٔ سوم رابطهٔ عمومی ظرفیت باربری نهایی به B' تغییر می‌یابد و همچنین بعد از تعیین q_u می‌توان بار نهایی کلی (دارای دیمانسیون نیرو نه فشار) را از رابطهٔ زیر بدست آورد:

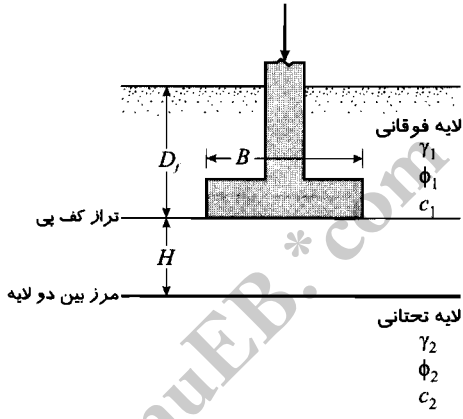
$$Q_u = q_u(B'.L')$$

نکته: اگر خروج از محوریت بار وارده روی شالوده تنها در امتداد طولی شالوده باشد (یعنی $e_b = 0$) در اینصورت ابعاد مؤثر شالوده بصورت B و $L' = L - 2e_l$ می‌باشد و بجای B در جملهٔ سوم رابطهٔ عمومی ظرفیت باربری، اگر $L' < B$ باشد، مقدار L' قرار خواهد گرفت.

www.PnuEB.com

شالودهٔ سطحی در روی خاک لایه‌بندی شده

در این قسمت ظرفیت باربری شالوده را در شرایطی که خاک زیر شالوده همگن نمی‌باشد بررسی می‌کنیم و این مسئله به ترتیب قرارگیری لایه‌ها روی هم و ضخامت هر کدام وابسته می‌باشد. امّا در تمام مواردی که بحث خواهد شد زیرنویس $\underline{1}$ مربوط به لایهٔ فوقانی و زیرنویس $\underline{2}$ مربوط به لایهٔ تحتانی می‌باشد و H نشان‌دهندهٔ ارتفاع مرز بین دو لایه از تراز کف پی می‌باشد (مانند شکل زیر)



۱- ماسهٔ متراکم روی ماسهٔ شل ($c = 0$)

الف) اگر ضخامت لایهٔ فوقانی نسبتاً زیاد باشد یا $H > B$: تحت این شرایط، گسیختگی برشی کلی در لایهٔ فوقانی رخ می‌دهد و به لایهٔ تحتانی نمی‌رسد.

برای شالودهٔ نواری : $q_u = q_{u(t)} = \gamma_1 D_f N_{q(1)} + \frac{1}{2}\gamma_1 B N_{\gamma(1)}$

برای شالودهٔ دایره یا مربع : $q_u = q_{u(t)} = \gamma_1 D_f N_{q(1)} + 0.3\gamma_1 B N_{\gamma(1)}$

برای شالودهٔ مستطیل : $q_u = q_{u(t)} = \gamma_1 D_f N_{q(1)} + \frac{1}{2}\left[1 - 0.4(\frac{B}{L})\right]\gamma_1 B N_{\gamma(1)}$

γ_1: وزن مخصوص لایهٔ فوقانی

$N_{q(1)}$, $N_{\gamma(1)}$: ضرایب ظرفیت باربری که برمبنای ϕ_1 تعیین می‌شوند (از جدول ۱۰-۱)

ب) اگر ضخامت ماسهٔ فوقانی نسبتاً کم باشد یا $H < B$: تحت این شرایط، گسیختگی خاک با سوراخ‌شدن لایهٔ متراکم فوقانی (گسیختگی پانچ) و گسیختگی برشی کلی لایهٔ تحتانی ضعیفتر همراه خواهد بود.

برای شالودهٔ نواری : $q_u = q_{u(b)} + \gamma_1 H^2 (1 + \frac{2D_f}{H})(\frac{K_s tg\phi_1}{B}) - \gamma_1 H \le q_{u(t)}$

برای شالودهٔ مربع یا دایره : $q_u = q_{u(b)} + 2\gamma_1 H^2 (1 + \frac{2D_f}{H})(\frac{K_s tg\phi_1}{B})\lambda'_s - \gamma_1 H \le q_{u(t)}$

برای شالودهٔ مستطیل : $q_u = q_{u(b)} + (1 + \frac{B}{L})\gamma_1 H^2 (1 + \frac{2D_f}{H})(\frac{K_s tg\phi_1}{B})\lambda'_s - \gamma_1 H \le q_{u(t)}$

www.PnuEB.com

در روابط فوق: K_s = ضریب برش سوراخ‌کننده که از شکل ۱۰-۲۲ قابل تعیین می‌باشد.

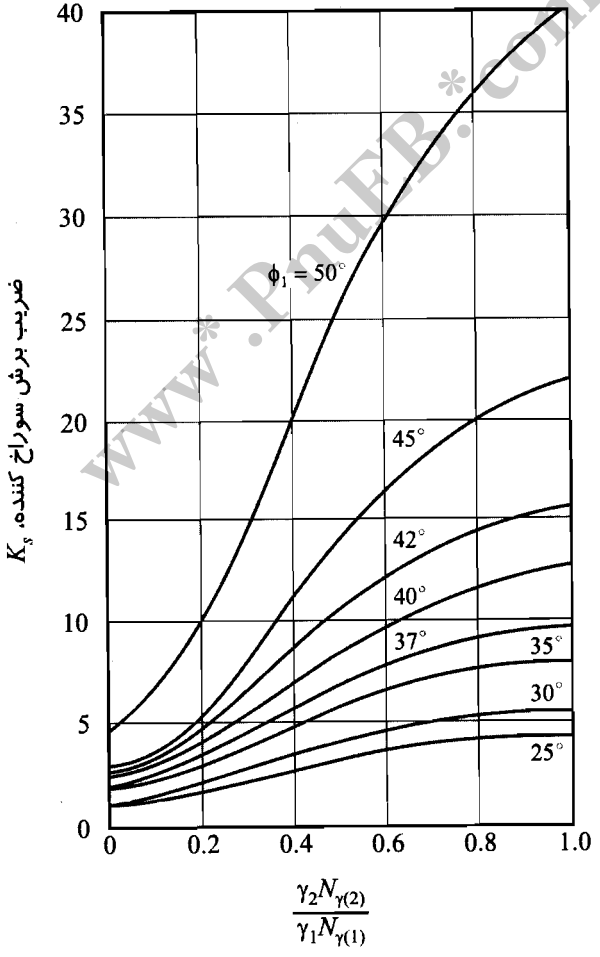
λ'_s = ضریب شکل، که می‌توان آنرا تقریباً یک فرض کرد.

$q_{u(b)}$ = ظرفیت باربری نهایی لایهٔ ماسه‌ای تحتانی است که مطابق روابط زیر تعیین می‌شود:

شالودهٔ نواری : $q_{u(b)} = \gamma_1(D_f + H)N_{q(2)} + \frac{1}{2}\gamma_2 BN_{\gamma(2)}$

شالودهٔ دایره یا مربع : $q_{u(b)} = \gamma_1(D_f + H)N_{q(2)} + 0.3\gamma_2 BN_{\gamma(2)}$

شالودهٔ مستطیل : $q_{u(b)} = \gamma_1(D_f + H)N_{q(2)} + \frac{1}{2}\left[1 - 0.4(\frac{B}{L})\right]\gamma_2 BN_{\gamma(2)}$



شکل ۱۰-۲۲: تغییرات K_s با $\gamma_2 N_{\gamma(2)}/\gamma_1 N_{\gamma(1)}$

www.PnuFB.com

۲- ماسهٔ شل روی ماسهٔ متراکم ($c=0$)

الف) اگر $H > B$: تحت این شرایط، سطح گسیختگی کلاً در لایهٔ ماسهٔ شل فوقانی قرار خواهد گرفت و به لایهٔ تحتانی نمی‌رسد.

برای شالودهٔ نواری : $q_u = q_{u(t')} = \gamma_1 D_f N_{q(1)} + \frac{1}{2}\gamma_1 B N_{\gamma(1)}$

برای شالودهٔ دایره یا مربع : $q_u = q_{u(t')} = \gamma_1 D_f N_{q(1)} + 0.3\gamma_1 B N_{\gamma(1)}$

برای شالودهٔ مستطیل : $q_u = q_{u(t')} = \gamma_1 D_f N_{q(1)} + \frac{1}{2}\left[1-0.4(\frac{B}{L})\right]\gamma_1 B N_{\gamma(1)}$

ب) اگر $H < B$: تحت این شرایط، سطح گسیختگی کلی هم از لایهٔ فوقانی و هم از لایهٔ تحتانی عبور خواهد کرد. برای این حالت مایرهوف و هانا، رابطهٔ زیر را برای q_u پیشنهاد کردند:

$$q_u = q_{u(t')} + (q_{u(b')} - q_{u(i)})(1-\frac{H}{H_f})^2$$

با شرط : $q_{u(t')} \le q_u \le q_{u(b')}$

برای شالودهٔ نواری : $q_{u(b')} = \gamma_2 D_f N_{q(2)} + \frac{1}{2}\gamma_2 B N_{\gamma(2)}$

برای شالودهٔ دایره یا مربع : $q_{u(b')} = \gamma_2 D_f N_{q(2)} + 0.3\gamma_2 B N_{\gamma(2)}$

برای شالودهٔ مستطیل : $q_{u(b')} = \gamma_2 D_f N_{q(2)} + \frac{1}{2}\left[1-0.4(\frac{B}{L})\right]\gamma_2 B N_{\gamma(2)}$

که در این روابط:
γ_2 = وزن مخصوص لایهٔ تحتانی
$N_{q(2)}, N_{\gamma(2)}$ = ضرایب ظرفیت باربری که برمبنای ϕ_2 تعیین می‌گردند (از جدول ۱۰-۱)
H_f = برای تمام مقاصد عملی، می‌توان آنرا مساوی $2B$ در نظر گرفت.

نکته: هر لایه‌ای که ϕ بزرگتری داشته باشد آن لایه متراکم‌تر از دیگری است.

۳- رس قوی روی رس ضعیفتر (تحت شرایط $\phi = 0$ و c_u)

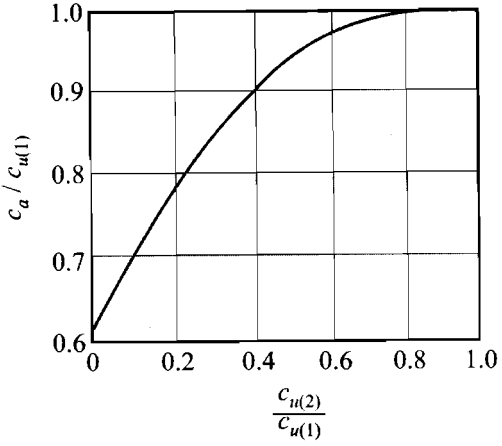
اگر مقدار $\frac{H}{B}$ نسبتاً کوچک باشد، گسیختگی بصورت سوراخ‌کردن لایهٔ فوقانی و گسیختگی برشی در لایهٔ تحتانی بوجود می‌آید. در صورتیکه اگر $\frac{H}{B}$ نسبتاً بزرگ باشد، گسیختگی بطور کامل در لایهٔ قویتر فوقانی بوجود می‌آید. در نتیجه ظرفیت باربری نهایی شالودهٔ مستطیلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_u = \left[1+0.2(\frac{B}{L})\right]c_{u(2)}N_c + (1+\frac{B}{L})(\frac{2c_a H}{B}) + \gamma_1 D_f \le q_{u(t'')}$$

که در این رابطه:
c_a = مطابق شکل ۱۰-۲۷ قابل تعیین می‌باشد
N_c = ضریب ظرفیت باربری (با فرض $\phi = 0$ مساوی 5.14 بدست می‌آید)
$q_{u(t'')}$ = ظرفیت باربری نهایی شالوده وقتیکه گسیختگی بطور کامل در لایهٔ فوقانی رخ می‌دهد و از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$q_{u(t'')} = \left[1+0.2(\frac{B}{L})\right]c_{u(1)}N_c + \gamma_1 D_f$$

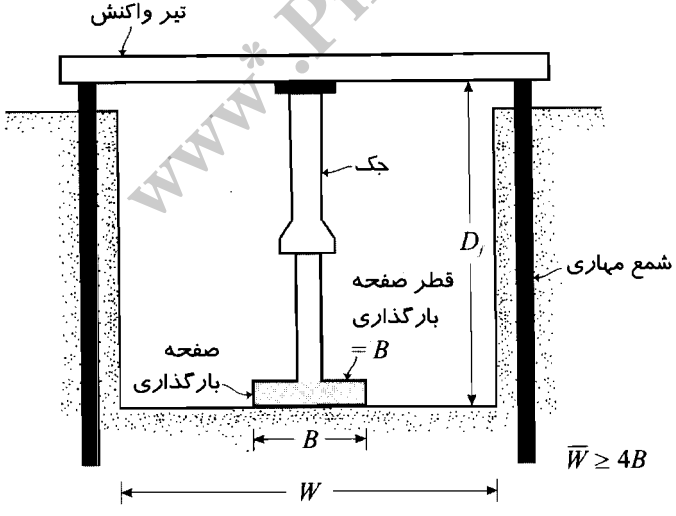
www.*PnuFB.*com



شکل ۱۰-۲۷: تغییرات $c_a / c_{u(1)}$ بر حسب $c_{u(2)}/c_{u(1)}$ طبق نظریه مایرهوف و هنسن

آزمایش ظرفیت باربری در محل (آزمایش بارگذاری صفحه *plate load test*)

اصول کلی انجام این آزمایش همانند شکل شماتیک زیر صورت می‌گیرد و در واقع صفحهٔ بارگذاری نظیر یک شالوده با ابعاد کوچک است که مورد آزمایش قرار می‌گیرد.



با استفاده از نتایج آزمایش بارگذاری صفحه، ظرفیت باربری نهایی شالودهٔ واقعی بصورت زیر تقریب زده می‌شود:

برای رس: $q_{u\,(\text{شالوده})} = q_{u\,(\text{صفحه})}$

برای ماسه: $q_{u\,(\text{شالوده})} = q_{u\,(\text{صفحه})} \times \frac{B_{(\text{شالوده})}}{B_{(\text{صفحه})}}$

www.PnuEB.com

همچنین، برای شدت بار معلوم q، نشست شالودهٔ واقعی را می‌توان بصورت زیر تقریب زد:

برای رس: $$S_{(\text{شالوده})} = S_{(\text{صفحه})} \times \frac{B_{(\text{شالوده})}}{B_{(\text{صفحه})}}$$

برای ماسه: $$S_{(\text{شالوده})} = S_{(\text{صفحه})} \times \left[\frac{2B_{(\text{شالوده})}}{B_{(\text{شالوده})} + B_{(\text{صفحه})}}\right]^2$$

همچنین، هوسل (*1929*)، روش زیر را برای تعیین ظرفیت باربری یک شالودهٔ متکی بر خاک رس برای نشست معلوم S ارائه کرد:

$$Q = Aq + Ps$$

که در آن:

q = تنش فشاری زیر شالوده

s = تنش برشی واحد در محیط

A = سطح مقطع بارگذاری شده

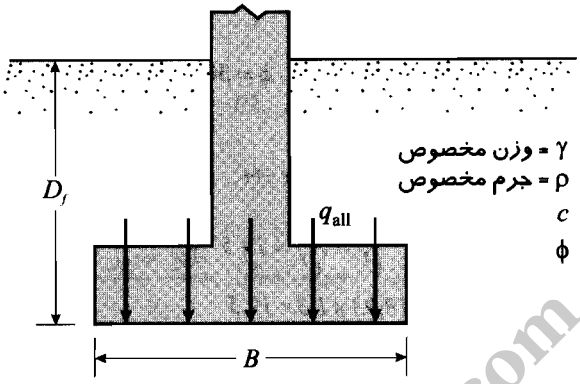
P = محیط بارگذاری شده

توجه شود در این رابطه q و s دو مجهول هستند که با استفاده از نتایج آزمایش بارگذاری صفحه با دو صفحه به ابعاد مختلف تعیین می‌شوند.

$$\begin{cases} Q_1 = A_1 q + P_1 s \\ Q_2 = A_2 q + P_2 s \end{cases} \rightarrow q \text{ و } s \text{ قابل تعیین‌اند}$$

www.PnuEB.com

۱۰-۱ یک شالودهٔ نواری در شکل نشان داده شده است. با استفاده از ضرایب ظرفیت باربری ترزاقی، مطلوب است تعیین ظرفیت باربری مجاز کلی (q_{all}) برای واحد سطح شالوده، از ضریب اطمینان ۳ استفاده کنید و برای تمام حالات، فرض کنید که گسیختگی برشی کلی رخ می‌دهد.



الف: $\gamma = 18.4\,^{kN}/_{m^3}$, $c = 15\,^{kN}/_{m^2}$, $\phi = 28^\circ$, $D_f = 2m$, $B = 2.5m$

ضرایب ظرفیت باربری ترزاقی برای گسیختگی برشی کلی — شکل ۱۰-۷ ($\phi = 28^\circ$) → $N_c = 32$, $N_q = 18$, $N_\gamma = 16$

شالوده نواری : $q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma$

$q = \gamma D_f = 18.4 \times 2 = 36.8\,^{kN}/_{m^2}$

$q_u = 15 \times 32 + 36.8 \times 18 + \frac{1}{2} \times 18.4 \times 2.5 \times 16 = 1510.4\,^{kN}/_{m^2}$

$q_{all} = \frac{q_u}{F_s} = \frac{1510.4}{3}$

$q_{all} = 503.5\,^{kN}/_{m^2}$

ب: $\gamma = 19.2\,^{kN}/_{m^3}$, $c = 0$, $\phi = 40^\circ$, $D_f = 3m$, $B = 3.5m$

$q = \gamma D_f = 19.2 \times 3 = 57.6\,^{kN}/_{m^2}$

شکل ۱۰-۷ → $N_c = 95$, $N_q = 81$, $N_\gamma = 100$

$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma = 0 \times 95 + 57.6 \times 81 + \frac{1}{2} \times 19.2 \times 3.5 \times 100$

$q_u = 8025.6\,^{kN}/_{m^2} \quad \Rightarrow \quad q_{all} = \frac{q_u}{F_s} = 2675.2\,^{kN}/_{m^2}$

پ: $\gamma = 16.98\,^{kN}/_{m^3}$, $c_u = 35.9\,^{kN}/_{m^2}$, $\phi = 0$, $D_f = 0.62m$, $B = 9.62m$

$q = \gamma D_f = 16.98 \times 0.62 = 10.53\,^{kN}/_{m^2}$

www.PnuEB.com

شکل ۱۰-۷ ⟵ $\phi = 0$ برای : $N_c = 5.7$ ، $N_q = 1$ و $N_\gamma = 0$

$$q_u = 35.9 \times 5.7 + 10.53 \times 1 + \frac{1}{2} \times 16.98 \times 9.62 \times 0 = 215.16\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$\Rightarrow \quad q_{all} = \frac{215.16}{3} = 71.72\ ^{kN}/_{m^2}$$

ت: $\rho = 1930\ ^{kN}/_{m^3}$ ، $c = 11.97\ ^{kN}/_{m^2}$ ، $\phi = 30^\circ$ ، $D_f = 1.1m$ ، $B = 1.3m$

$$\gamma = \rho g = 1930 \times \frac{9.81}{1000} = 18.93\ ^{kN}/_{m^3}$$

$$q = \gamma D_f = 18.93 \times 1.1 = 20.83\ ^{kN}/_{m^2}$$

شکل ۱۰-۷ ⟵ $N_c = 35$ ، $N_q = 22$ ، $N_\gamma = 19.5$

$$q_u = 11.97 \times 35 + 20.83 \times 22 + \frac{1}{2} \times 18.93 \times 1.3 \times 19.5$$

$$q_u = 1117.15\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$q_{all} = \frac{q_u}{F_s} = 372.38\ ^{kN}/_{m^2}$$

ث: $\rho = 1800\ ^{kN}/_{m^3}$ ، $c_u = 48\ ^{kN}/_{m^2}$ ، $\phi = 0$ ، $D_f = 0.6m$ ، $B = 0.8m$

$$\gamma = \rho g = 1800 \times \frac{9.81}{1000} = 17.66\ ^{kN}/_{m^3}$$

$$q = \gamma D_f = 17.66 \times 0.6 = 10.6\ ^{kN}/_{m^2}$$

$\phi = 0$ برای : $N_c = 5.7$ ، $N_q = 1$ و $N_\gamma = 0$

$$q_u = 48 \times 5.7 + 10.6 \times 1 = 284.2\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$q_{all} = \frac{284.2}{3} = 94.73\ ^{kN}/_{m^2}$$

۱۰-۲ مسئلهٔ ۱۰-۱-الف را با فرض گسیختگی برشی موضعی حل کنید.

$\phi = 28^\circ$

$q = 36.8\ ^{kN}/_{m^2}$

$$q'_u = c'N'_c + qN'_q + {}^1/_2 \gamma B N'_\gamma$$

برای تعیین N'_c و N'_q و N'_γ می‌توان از جایگزینی $\phi' = tg^{-1}(\frac{2}{3}tg\phi)$ به جای ϕ در روابط N'_c و N'_q و N'_γ استفاده کرد و یا بدون انجام چنین کاری با داشتن ϕ از شکل ۱۰-۸ استفاده کرد.

$$\Rightarrow \quad N'_c = 17 \quad ، \quad N'_q = 7 \quad ، \quad N'_\gamma = 4.6$$

$$c' = \frac{2}{3} \times c = \frac{2}{3} \times 15 = 10\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$\Rightarrow \quad q'_u = 10 \times 17 + 36.8 \times 7 + \frac{1}{2} \times 18.4 \times 2.5 \times 4.6$$

$$q'_u = 533.4\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$q'_{all} = \frac{q'_u}{F_s} = \frac{533.4}{3} = 177.8\ ^{kN}/_{m^2}$$

www.PnuFB.com

۳-۱۰ مسئلهٔ ۱۰-۱- الف را با استفاده از ضرایب ظرفیت باربری پراندل، رایزنر، کاکو و کریزل که در جدول ۱۰-۱ ارائه شده و با رابطهٔ ۱۰-۳۸ حل کنید.

$$\phi = 28^\circ \xrightarrow{\text{جدول ۱۰-۱}} N_c = 25.80 \quad , \quad N_q = 14.72 \quad , \quad N_\gamma = 16.72$$

$$q_u = C\lambda_{cs}\lambda_{cd}\lambda_{ci}N_c + q\lambda_{qs}\lambda_{qd}\lambda_{qi}N_q + \frac{1}{2}\gamma B\lambda_{\gamma s}\lambda_{\gamma d}\lambda_{\gamma i}N_\gamma$$

شالوده نواری است، یعنی مستطیلی به عرض $B = 2.5m$ و بطول بینهایت. یعنی $\frac{B}{L} = 0$

$$\text{ضرایب شکل} : \lambda_{cs} = \lambda_{qs} = \lambda_{\gamma s} = 1 \xrightarrow{\text{طبق جدول ۱۰-۲}}$$

$$\frac{D_f}{B} = \frac{2}{2.5} = 0.8 \le 1$$

$$\text{ضرایب عمق} \Rightarrow \begin{cases} \lambda_{qd} = 1 + 2tg\phi(1-\sin\phi)^2(\frac{D_f}{B}) = 1 + 2tg28 \times (1-\sin 28)^2 \times 0.8 = 1.24 \\ \lambda_{cd} = \lambda_{qd} - \frac{1-\lambda_{qd}}{N_q tg\phi} = 1.24 - \frac{1-1.24}{14.72 \times tg28} = 1.27 \\ \lambda_{\gamma d} = 1 \end{cases}$$

بار وارده با محور قائم زاویهٔ صفر درجه دارد $(\alpha = 0)$:

$$\text{ضرایب شیب} : \lambda_{ci} = \lambda_{qi} = \lambda_{\gamma i} = 1$$

$$q_u = 15 \times 1 \times 1.27 \times 1 \times 25.80 + 36.8 \times 1 \times 1.24 \times 1 \times 14.72 + \frac{1}{2} \times 18.4 \times 2.5 \times 1 \times 1 \times 1 \times 16.72$$

$$\Rightarrow \quad q_u = 1547.75\, {}^{kN}/_{m^2}$$

$$\Rightarrow \quad q_{all} = \frac{q_u}{F_s} = 515.92\, {}^{kN}/_{m^2}$$

مشاهده می‌کنید که اختلاف چندانی بین جواب بدست آمده با q_{all} بدست آمده از مسئله ۱۰-۱- الف ندارد و این بیانگر نزدیکی نتایج دو روش می‌باشد.

۴-۱۰ یک شالودهٔ مربع به ابعاد $(B \times B)$ قرار است بار کلی 670 کیلونیوتن را در حالت بهره‌برداری حمل کند. کف شالوده در عمق 0.92 متری از سطح زمین قرار دارد. برای خاک اطلاعات زیر دردست است.

$$\gamma = 18.1\, {}^{kN}/_{m^3} \quad \text{و} \quad c = 0 \quad \text{و} \quad \phi = 40^\circ$$

با ضریب اطمینان 3 ، مطلوب است تعیین ابعاد شالوده از ضرایب ظرفیت ترزاقی با فرض گسیختگی برشی کلی (رابطهٔ ۱۰-۱۰) استفاده کنید.

وقتی صحبت از بارکلی در حالت بهره‌برداری می‌شود یعنی میزان باری که می‌توان روی شالوده اعمال نمود به عبارت دیگر منظور Q_{all} می‌باشد.

www.PnuB.com

$Q_{all} = 670\,kN$

$\longrightarrow q_{all} = \frac{Q_{all}}{A} = \frac{670}{B^2}$

$q_u = q_{all} \times F_s = \frac{2010}{B^2}$

$q = \gamma D_f = 18.1 \times 0.92 = 16.652\,{}^{kN}/_{m^2}$

$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma$ (رابطهٔ ۱۰-۱۰)

$N_c = 95$ و $N_q = 81$ و $N_\gamma = 100$: برای $\phi = 40^\circ$ (با استفاده از شکل ۱۰-۷)

$\xrightarrow{\text{جایگذاری}} \frac{2010}{B^2} = 16.652 \times 81 + 0.4 \times 18.1 \times B \times 100$

$\Rightarrow \frac{2010}{B^2} = 1348.8 + 724B$

برای تعیین B از روش آزمون و خطا استفاده می‌کنیم.

$B(m)$	$\frac{2010}{B^2}$	$1348.8 + 724B$
0.5	8040	1710.8
1	2010	2072.8
0.987	2063	2063

$\Rightarrow B = 0.987m \simeq 1.0m$

۱۰-۵ مسئله ۱۰-۴ را با فرض گسیختگی برشی موضعی خاک (رابطهٔ ۱۰-۱۵) حل کنید.

$\phi = 40^\circ \xrightarrow{\text{با استفاده از شکل ۱۰-۸}} N'_c = 34.8$ و $N'_q = 21$ و $N'_\gamma = 18.8$

$c' = \frac{2}{3}c = 0$

$\Rightarrow q_u = qN'_q + 0.4\gamma BN'_\gamma$

$\frac{2010}{B^2} = 16.652 \times 21 + 0.4 \times 18.1 \times B \times 18.8$

$\Rightarrow \frac{2010}{B^2} = 349.1 + 136.1B$

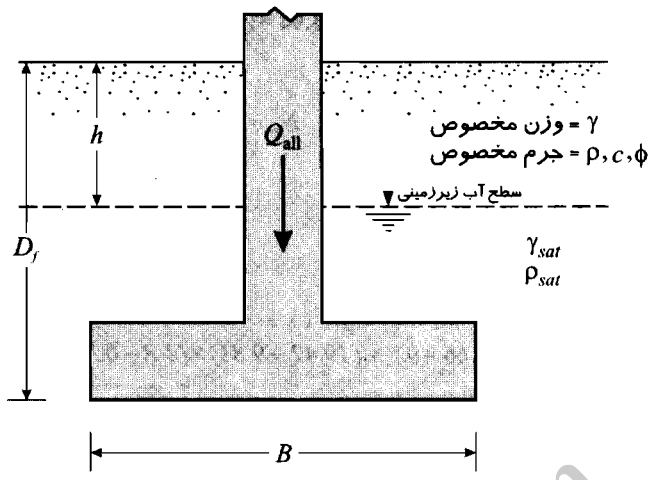
(آزمون و خطا)

B	$\frac{2010}{B^2}$	$349.1 + 136.1B$
1	2010	485.2
2	502.5	621.3
1.83	600	598.1

$\Rightarrow B \simeq 1.83m$

۱۰-۶ در شکل، یک شالودهٔ مربع نشان داده شده است. برای حالات زیر مطلوب است تعیین بار کلی مجاز Q_{all} قابل تحمل توسط شالوده. از رابطهٔ ترزاقی با ضریب اطمینان 3 با فرض گسیختگی برشی کلی استفاده کنید.

www.PnuEP.com



الف) $\gamma = 16.8\,^{kN}/_{m^3}$, $\gamma_{sat} = 18.9\,^{kN}/_{m^3}$, $c = 0$, $\phi = 35^\circ$, $B = 5m$, $D_f = 4m$, $h = 2m$

برای $\phi = 35^\circ$ با استفاده از شکل ۱۰-۷ : $N_c = 57.8$, $N_q = 41.4$, $N_\gamma = 42.4$

برای شالودهٔ مربعی : $q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma$

با توجه به سطح آب زیرزمینی ($h < D_f$) بجای γ در قسمت سوم رابطهٔ فوق γ' قرار می‌گیرد و q نیز از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$q = \gamma \times h + \gamma'(D_f - h) = 16.8 \times 2 + (18.9 - 9.81) \times (4 - 2) = 51.78\,^{kN}/_{m^2}$$

$$q_u = 0 + 51.78 \times 41.4 + 0.4 \times (18.9 - 9.81) \times 5 \times 42.4 = 2914.524\,^{kN}/_{m^2}$$

$$q_{all} = \frac{q_u}{F_s} = 971.5\,^{kN}/_{m^2}$$

$$\Rightarrow \qquad Q_{all} = q_{all} \times A = 971.5 \times (5)^2 = 24287.7kN$$

ب) $\gamma = 18.4\,^{kN}/_{m^3}$, $\gamma_{sat} = 19.6\,^{kN}/_{m^3}$, $c = 50\,^{kN}/_{m^2}$, $\phi = 30^\circ$, $B = 4m$, $D_f = 3m$, $h = 4m$

برای $\phi = 30^\circ$: $N_c = 35$, $N_q = 22$, $N_\gamma = 19.5$

$$D = h - D_f = 4 - 3 = 1m$$

$$D \le B \quad \Rightarrow \gamma_{av} = \frac{1}{B}[\gamma D + \gamma'(B - D)]$$

$$\gamma_{av} = \frac{1}{4}[18.4 \times 1 + (19.6 - 9.81)(4 - 1)] = 11.94\,^{kN}/_{m^3}$$

و

$$q = \gamma D_f = 18.4 \times 3 = 55.2\,^{kN}/_{m^2}$$

$$q_u = 1.3 \times 50 \times 35 + 55.2 \times 22 + 0.4 \times 11.94 \times 4 \times 19.5 = 3861.93\,^{kN}/_{m^2}$$

$$q_{all} = \frac{3861.93}{3} = 1287.3\,^{kN}/_{m^2}$$

$$\Rightarrow \qquad Q_{all} = 1287.3 \times (4)^2 = 20596.8kN$$

www.PnuEB.com

پ: $\rho = 1800\,^{kg}/_{m^3}$ ، $\rho_{sat} = 1980\,^{kg}/_{m^3}$ ، $c = 23.94\,^{kN}/_{m^2}$ ، $\phi = 25^\circ$ ، $B = 1.8m$

$D_f = 1.2m$ ، $h = 2m$

برای $\phi = 25^\circ$: $N_c = 24.8$ ، $N_q = 12.1$ ، $N_\gamma = 9.8$

$$\gamma = \rho g = 1800 \times \frac{9.81}{1000} = 17.66\,^{kN}/_{m^3}$$

$$\gamma_{sat} = \rho_{sat} g = 1980 \times \frac{9.81}{1000} = 19.42\,^{kN}/_{m^3}$$

$$D = h - D_f = 2 - 1.2 = 0.8m$$

$$D \le B \quad \Rightarrow \quad \gamma_{av} = \frac{1}{1.8}[17.66 \times 0.8 + (19.42 - 9.81) \times (1.8 - 0.8)] = 13.19\,^{kN}/_{m^3}$$

$$q = \gamma D_f = 17.66 \times 1.2 = 21.19\,^{kN}/_{m^2}$$

$$q_u = 1.3 \times 23.94 \times 24.8 + 21.19 \times 12.1 + 0.4 \times 13.19 \times 1.8 \times 9.8 = 1121.3\,^{kN}/_{m^2}$$

$$q_{all} = \frac{q_u}{F_s} = 373.8\,^{kN}/_{m^2}$$

$$\Rightarrow \quad Q_{all} = 373.8 \times (1.8)^2 = 1211kN$$

۱۰-۷ مسئلهٔ ۱۰-۶ را با استفاده از رابطهٔ ۱۰-۳۸ حل کنید.

الف) $\phi = 35^\circ$ برای : با استفاده از جدول ۱۰-۱ : $N_c = 46.12$ ، $N_q = 33.30$ ، $N_\gamma = 48.03$

ضرایب شکل

$$\begin{cases} \lambda_{cs} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right)\left(\frac{N_q}{N_c}\right) = 1 + 1 \times (\frac{33.3}{46.12}) = 1.72 \\ \lambda_{qs} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) tg\phi = 1 + 1 \times tg35 = 1.7 \\ \lambda_{\gamma s} = 1 - 0.4\left(\frac{B}{L}\right) = 1 - 0.4 \times 1 = 0.6 \end{cases}$$

$\frac{D_f}{B} = \frac{4}{5} = 0.8 \le 1$: ضرایب عمق

$$\begin{cases} \lambda_{qd} = 1 + 2tg\phi(1 - \sin\phi)^2(\frac{D_f}{B}) \\ \qquad = 1 + 2tg35(1 - \sin 35)^2 \times 0.8 = 1.2 \\ \lambda_{cd} = \lambda_{qd} - \dfrac{1 - \lambda_{qd}}{N_q tg\phi} \\ \qquad = 1.24 - \dfrac{1 - 1.2}{33.3 \times tg35} = 1.21 \\ \lambda_{\gamma d} = 1 \end{cases}$$

ضرایب شیب : $\lambda_{ci} = \lambda_{qi} = \lambda_{\gamma i} = 1$

$$q_u = c\lambda_{cs}\lambda_{cd}\lambda_{ci}N_c + q\lambda_{qs}\lambda_{qd}\lambda_{qi}N_q + \frac{1}{2}\gamma' B\lambda_{\gamma s}\lambda_{\gamma d}\lambda_{\gamma i}N_\gamma$$

$$q_u = 0 + 51.78 \times 1.7 \times 1.2 \times 1 \times 33.3 + \frac{1}{2} \times (18.9 - 9.81) \times 5 \times 0.6 \times 1 \times 1 \times 48.03 = 4172.4\,^{kN}/_{m^2}$$

$$q_{all} = \frac{q_u}{F_s} = 1390.8\,^{kN}/_{m^2}$$

www.PnuEB.com

$$\Rightarrow \quad Q_{all} = q_{all} \times B^2 = 1390.8 \times (5)^2 = 34770kN$$

ب) $\phi = 30^\circ$ برای : $N_c = 30.14$ ، $N_q = 18.40$ ، $N_\gamma = 22.40$

ضرایب شکل
$$\begin{cases} \lambda_{cs} = 1 + (1)(\frac{18.4}{30.14}) = 1.61 \\ \lambda_{qs} = 1 + (1)(tg30) = 1.58 \\ \lambda_{\gamma s} = 1 - 0.4(1) = 0.6 \end{cases}$$

$\frac{D_f}{B} = \frac{3}{4} = 0.75 \le 1 \Rightarrow$ ضرایب عمق
$$\begin{cases} \lambda_{qd} = 1 + 2tg30(1 - \sin 30)^2 \times (0.75) = 1.22 \\ \lambda_{cd} = 1.22 - \frac{1 - 1.22}{18.40 \times tg30} = 1.24 \\ \lambda_{\gamma d} = 1 \end{cases}$$

ضرایب شیب : $\lambda_{ci} = \lambda_{qi} = \lambda_{\gamma i} = 1$

$$\Rightarrow q_u = (50 \times 1.61 \times 1.24 \times 30.14) + (55.2 \times 1.58 \times 1.22 \times 18.4) + (\frac{1}{2} \times 11.94 \times 4 \times 0.6 \times 22.4)$$

$$q_u = 5287.35 \, kN/m^2$$

$$q_{all} = \frac{q_u}{F_s} = 1762.45 \, kN/m^2$$

$$Q_{all} = q_{all} \times B^2 = 28199.2kN$$

پ) $\phi = 25^\circ$ برای : $N_c = 20.72$ ، $N_q = 10.66$ ، $N_\gamma = 10.88$

ضرایب شکل
$$\begin{cases} \lambda_{cs} = 1 + \frac{10.66}{20.72} = 1.51 \\ \lambda_{qs} = 1 + tg25 = 1.47 \\ \lambda_{\gamma s} = 1 - 0.4 = 0.6 \end{cases}$$

$\frac{D_f}{B} = \frac{1.2}{1.8} = 0.67 < 1 \Rightarrow$ ضرایب عمق
$$\begin{cases} \lambda_{qd} = 1 + 2tg25(1 - \sin 25)^2 \times 0.67 = 1.21 \\ \lambda_{cd} = 1.21 - \frac{1 - 1.21}{10.66 \times tg25} = 1.25 \\ \lambda_{\gamma d} = 1 \end{cases}$$

ضرایب شیب : $\lambda_{ci} = \lambda_{qi} = \lambda_{\gamma i} = 1$

$$q_u = (23.94 \times 1.51 \times 1.25 \times 20.72) + (21.19 \times 1.47 \times 1.21 \times 10.66) + (\frac{1}{2} \times 13.19 \times 1.8 \times 0.6 \times 10.88)$$

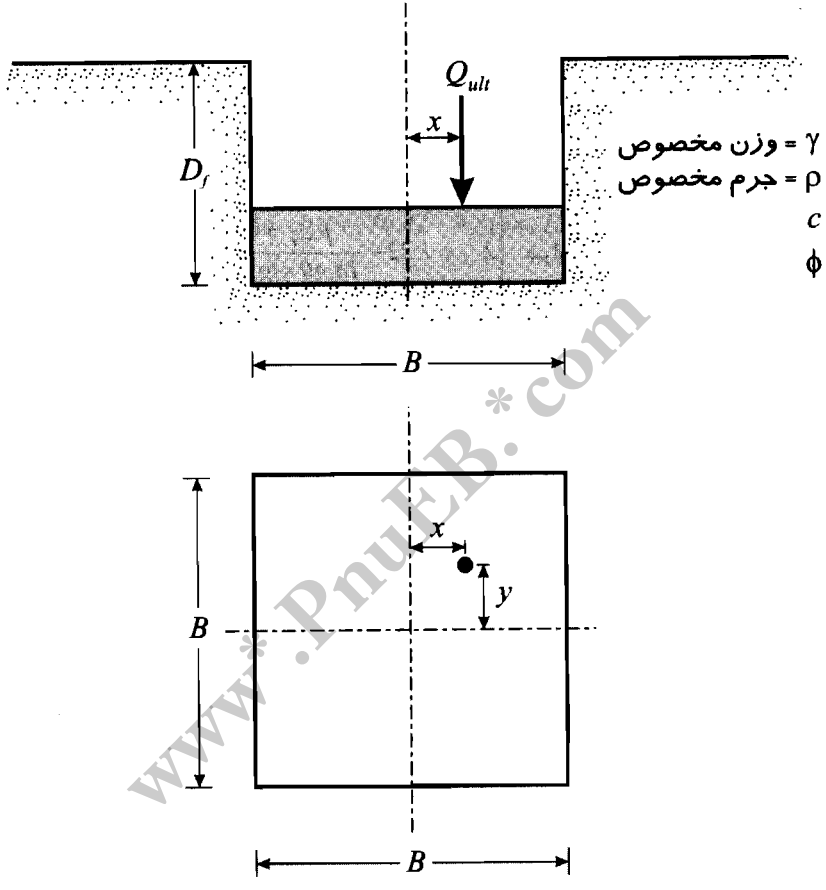
$$q_u = 1415.54 \, kN/m^2$$

$$q_{all} = \frac{1415.54}{3} = 471.85 \, kN/m^2$$

$$\Rightarrow \quad Q_{all} = 471.85 \times (1.8)^2 = 1528.8kN$$

www.PnuEB.com

۸-۱۰ **در شکل، یک شالودهٔ مربع، نشان داده شده است. شالوده تحت یک بار برون محور قرار دارد. برای حالات زیر، مطلوب است تعیین بار نهایی کلی قابل حمل توسط شالوده.**



www.PnuEB.com

الف: $\gamma = 16.8\,^{kN}/_{m^3}$, $c = 0$, $\phi = 30^\circ$, $B = 4.5m$, $D_f = 3.5m$, $x = 0.5m$, $y = 0$

با قرار دادن $c = 0$ خواهیم داشت: $q_u = q\lambda_{qs}\lambda_{qd}N_q + \frac{1}{2}\gamma B'\lambda_{\gamma s}\lambda_{\gamma d}N_\gamma$

برای $\phi = 30^\circ$ با استفاده از جدول ۱۰-۱ : $N_q = 18.40$, $N_\gamma = 22.40$

$B' = B - 2x = 4.5 - 2(0.5) = 3.5m$, $L' = B = 4.5m$

$$\begin{cases} \lambda_{qs} = 1 + \left(\frac{B'}{L'}\right)(tg\phi) = 1 + \frac{3.5}{4.5} \times tg30 = 1.45 \\ \lambda_{\gamma s} = 1 - 0.4\left(\frac{B'}{L'}\right) = 1 - 0.4\left(\frac{3.5}{4.5}\right) = 0.69 \end{cases}$$

$$\frac{D_f}{B'} = \frac{3.5}{3.5} = 1 \Rightarrow \begin{cases} \lambda_{qd} = 1 + 2tg\phi(1 - \sin\phi)^2(\frac{D_f}{B'}) = 1 + 2tg30 \times (1 - \sin 30)^2 \times 1 = 1.29 \\ \lambda_{\gamma d} = 1 \end{cases}$$

$$q = \gamma D_f = 16.8 \times 3.5 = 58.8\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$q_u = (58.8 \times 1.45 \times 1.29 \times 18.4) + (\frac{1}{2} \times 16.8 \times 3.5 \times 0.69 \times 1 \times 22.4) = 2478.14\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$Q_{ult} = q_u \times (B' \times L') = 2478.14 \times (3.5 \times 4.5) = 39030.7kN$$

ب: $\gamma = 19.2\ ^{kN}/_{m^3}$ ، $c = 20\ ^{kN}/_{m^2}$ ، $\phi = 25^\circ$ ، $B = 6m$ ، $D_f = 4.5m$ ، $x = 0.6m$ ، $y = 0.5m$

$\phi = 25^\circ$ برای : $N_c = 20.72$ و $N_q = 10.66$ و $N_\gamma = 10.88$

$$L' = B - 2y = 6 - 2(0.5) = 5m \quad , \quad B' = B - 2x = 6 - 2(0.6) = 4.8m$$

$$\begin{cases} \lambda_{cs} = 1 + (\frac{B'}{L'})(\frac{N_q}{N_c}) = 1 + (\frac{4.8}{5})(\frac{10.66}{20.72}) = 1.49 \\ \lambda_{qs} = 1 + (\frac{B'}{L'})(tg\phi) = 1 + (\frac{4.8}{5})(tg25) = 1.45 \\ \lambda_{\gamma s} = 1 - 0.4(\frac{B'}{L'}) = 1 - 0.4(\frac{4.8}{5}) = 0.62 \end{cases}$$

$$\frac{D_f}{B'} = \frac{4.5}{4.8} = 0.94 \le 1 \quad \begin{cases} \lambda_{qd} = 1 + 2tg(25)(1 - \sin 25)^2 \times 0.94 = 1.29 \\ \lambda_{cd} = 1.29 - \frac{1 - 1.29}{10.66 \times tg25} = 1.35 \\ \lambda_{\gamma d} = 1 \end{cases}$$

$$q = \gamma\ D_f = 19.2 \times 4.5 = 86.4\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$q_u = c\lambda_{cs}\lambda_{cd}N_c + q\lambda_{qs}\lambda_{qd}N_q + \frac{1}{2}\gamma B'\lambda_{\gamma s}\lambda_{\gamma d}N_\gamma$$

$$q_u = (20 \times 1.49 \times 1.35 \times 20.72) + (86.4 \times 1.45 \times 1.29 \times 10.66) + (\frac{1}{2} \times 19.2 \times 4.8 \times 0.62 \times 1 \times 10.88$$

$$q_u = 2867.18\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$\Rightarrow \quad Q_{ult} = q_u \times (B' \times L') = 68812.3kN$$

پ) $\rho = 2000\ ^{kg}/_{m^3}$ ، $c = 0$ ، $\phi = 42^\circ$ ، $B = 2.5m$ ، $D_f = 1.5m$ ، $x = 0.2m$ ، $y = 0.2m$

$$B' = L' = 2.5 - 2(0.2) = 2.1m$$

$\phi = 42^\circ$ برای : $N_q = 85.38$ و $N_\gamma = 155.55$

$$\begin{cases} \lambda_{qs} = 1 + tg\phi = 1 + tg42 = 1.9 \\ \lambda_{\gamma s} = 0.6 \end{cases}$$

$$\frac{D_f}{B'} = \frac{1.5}{2.1} = 0.71 \le 1 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \lambda_{qd} = 1 + 2tg42(1 - \sin 42)^2 \times 0.71 = 1.14 \\ \lambda_{\gamma d} = 1 \end{cases}$$

$$\gamma = \rho g = 2000 \times \frac{9.81}{1000} = 19.62\ ^{kN}/_{m^3}$$

$$q = \gamma D_f = 19.62 \times 1.5 = 29.43\ ^{kN}/_{m^2}$$

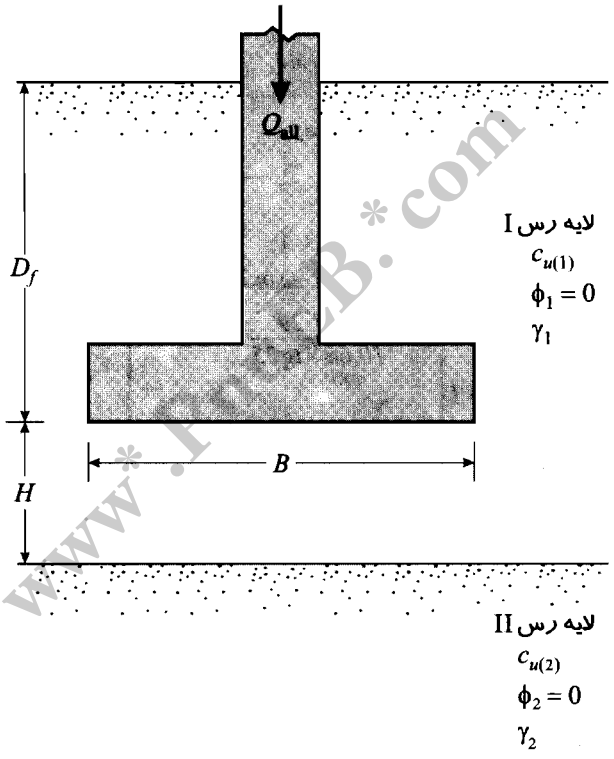
www.PnuEB.com

$$q_u = q\lambda_{qs}\lambda_{qd}N_q + \frac{1}{2}\gamma B'\lambda_{\gamma s}\lambda_{\gamma d}N_\gamma$$

$$q_u = (29.43\times 1.9\times 1.14\times 85.38) + (\frac{1}{2}\times 19.62\times 2.1\times 0.6\times 1\times 155.55) = 7365.3\,^{kN}/_{m^2}$$

$$Q_{ult} = q_u\times (B')^2 = 32480.8kN$$

۴-۱۰ در شکل، یک شالوده مربع نشان داده شده است. برای حالات زیر، مطلوب است تعیین بار مجاز کلی قابل حمل توسط شالوده با استفاده از ضریب اطمینان 3.



الف)

$B = 5m$ ، $D_f = 3m$ ، $H = 3m$ ، $c_{u(1)} = 40\,^{kN}/_{m^2}$

$c_{u(2)} = 30\,^{kN}/_{m^2}$ ، $\gamma_1 = 17.6\,^{kN}/_{m^3}$ ، $\gamma_2 = 16.8\,^{kN}/_{m^3}$

$$q_{u(t')} = \left[1+0.2(\frac{B}{L})\right]c_{u(1)}N_c + \gamma_1 D_f$$

$\phi = 0$ برای $\rightarrow$ $N_c = 5.14$

$$q_{u(t')} = [1+0.2]\times 5.14\times 40 + 17.6\times 3 = 299.52\,^{kN}/_{m^2}$$

$$\frac{c_{u(2)}}{c_{u(1)}} = \frac{30}{40} = 0.75 \xrightarrow{\text{شکل ۱۰-۲۷}} \frac{c_a}{c_{u(1)}} = 0.98$$

$$\Rightarrow \quad c_a = 0.98\times 40 = 39.2\,^{kN}/_{m^2}$$

$$q_u = \left[1 + 0.2(\frac{B}{L})\right] c_{u(2)} N_c + (1 + \frac{B}{L})(\frac{2 c_a H}{B}) + \gamma_1 D_f \le q_{u(t^*)}$$

$$q_u = [1 + 0.2] \times 30 \times 5.14 + (1 + 1)(\frac{2 \times 39.2 \times 3}{5}) + 17.6 \times 3 = 331.92\ ^{kN}/_{m^2} > 299.52$$

$$\Rightarrow \qquad q_u = 299.52\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$q_{all} = \frac{q_u}{F_s} = \frac{299.52}{3} = 99.84\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$\Rightarrow \qquad Q_{all} = q_{all} \times B^2 = 2496kN$$

ب) $\mathbf{B = 4.5m}$ ، $\mathbf{D_f = 4m}$ ، $\mathbf{H = 4m}$ ، $\mathbf{c_{u(1)} = 60\ ^{kN}/_{m^2}}$

$\mathbf{c_{u(2)} = 30\ ^{kN}/_{m^2}}$ ، $\mathbf{\gamma_1 = 19.52\ ^{kN}/_{m^3}}$ ، $\mathbf{\gamma_2 = 18.4\ ^{kN}/_{m^3}}$

$$q_{u(t^*)} = [1 + 0.2] \times 60 \times 5.14 + 19.52 \times 4 = 448.16\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$\frac{c_{u(2)}}{c_{u(1)}} = \frac{30}{60} = 0.5 \xrightarrow{\text{شکل ۱۰-۲۷}} \frac{c_a}{c_{u(1)}} = 0.95 \Rightarrow c_a = 57\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$q_u = [1 + 0.2] \times 30 \times 5.14 + (1 + 1)(\frac{2 \times 57 \times 4}{4.5}) + 19.52 \times 4 = 465.8 > 448.16$$

$$\Rightarrow \qquad q_u = 448.16\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$\Rightarrow \qquad q_{all} = \frac{448.16}{3} = 149.4\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$Q_{all} = 149.4 \times (4.5)^2 = 3025.35kN$$

پ) $\mathbf{B = 2m}$ ، $\mathbf{D_f = 1.5m}$ ، $\mathbf{H = 1.5m}$ ، $\mathbf{c_{u(1)} = 50\ ^{kN}/_{m^3}}$

$\mathbf{c_{u(2)} = 28.72\ ^{kN}/_{m^2}}$ ، $\mathbf{\gamma_1 = 21\ ^{kN}/_{m^3}}$ ، $\mathbf{\gamma_2 = 18\ ^{kN}/_{m^3}}$

$$q_{u(t^*)} = [1 + 0.2] \times 50 \times 5.14 + 21 \times 1.5 = 339.9\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$\frac{c_{u(2)}}{c_{u(1)}} = \frac{28.72}{50} = 0.57 \xrightarrow{\text{شکل ۱۰-۲۷}} \frac{c_a}{c_{u(1)}} = 0.97 \Rightarrow c_a = 48.5\ ^{kN}/_{m^2}$$

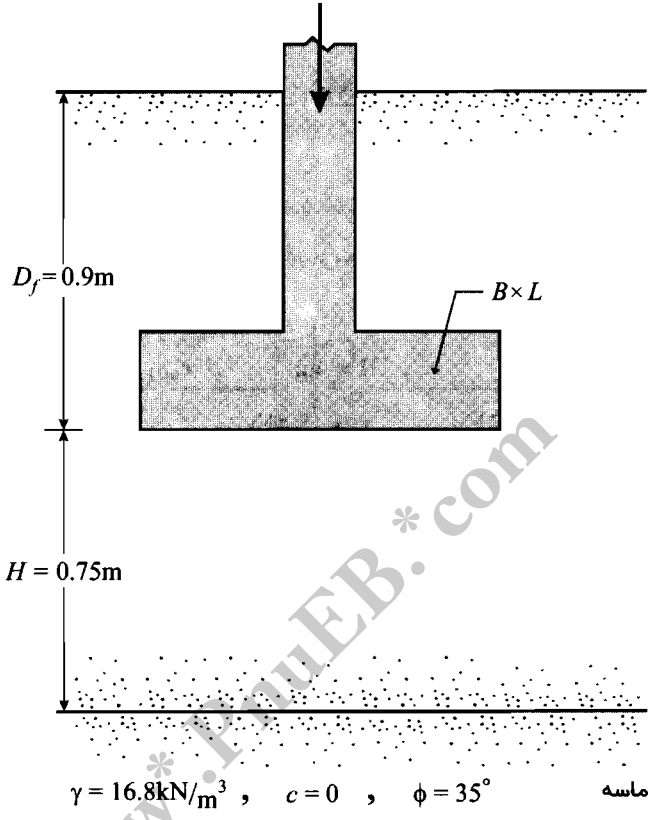
$$q_u = [1 + 0.2] \times 28.72 \times 5.14 + (1 + 1)(\frac{2 \times 48.5 \times 1.5}{2}) + 21 \times 1.5 = 354.14\ ^{kN}/_{m^2} > 339.9\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$\Rightarrow \qquad q_u = 339.9\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$q_{all} = \frac{q_u}{F_s} = 113.3\ ^{kN}/_{m^2} \qquad \Rightarrow \qquad Q_{all} = q_{all} \times B^2 = 453.2kN$$

۱۰-۱۰ شکل نشان دهندهٔ یک شالودهٔ مستطیلی است. مقدار $\mathbf{B = 1.2m}$ و $\mathbf{L = 1.8m}$ می‌باشد. با استفاده از ضریب اطمینان3 مطلوب است تعیین بار مجاز خالص قابل حمل توسط شالوده.

www.PnuEB.com



www.PnuEB.com

از آنجائیکه $\phi_1(=42^\circ) > \phi_2(=35^\circ)$ و همچنین $\gamma_1(=18.9) > \gamma_2(=16.8)$ لذا لایهٔ فوقانی متراکم‌تر می‌باشد.

لایهٔ فوقانی (1) $\phi = 42^\circ \xrightarrow{\text{جدول ۱۰-۱}} N_q = 85.38$, $N_\gamma = 155.55$

لایهٔ تحتانی (2) $\phi = 35^\circ \xrightarrow{\text{جدول ۱۰-۱}} N_q = 33.30$, $N_\gamma = 48.03$

ظرفیت باربری نهایی لایهٔ فوقانی $q_{u(t)} = \gamma_1 D_f N_{q(1)} + \frac{1}{2}\left[1 - 0.4(\frac{B}{L})\right]\gamma_1 B N_{\gamma_1}$

$$q_{u(t)} = 18.9 \times 0.9 \times 85.38 + \frac{1}{2}\left[1 - 0.4(\frac{1.2}{1.8})\right] \times 18.9 \times 1.2 \times 155.55$$

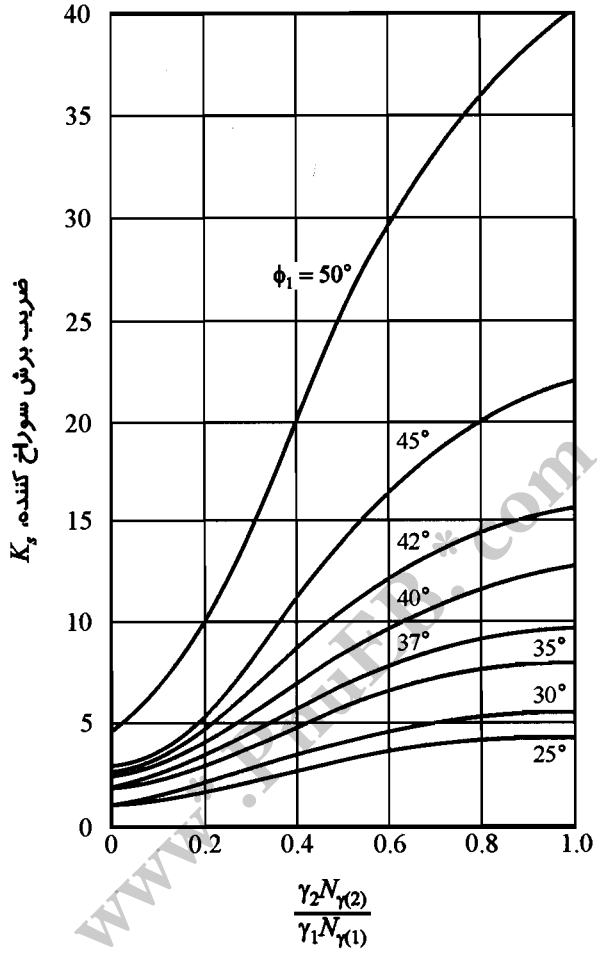
$$q_{u(t)} = 2745.87\ ^{kN}/_{m^2}$$

ظرفیت باربری نهایی لایهٔ تحتانی $q_{u(b)} = \gamma_1(D_f + H)N_{q(2)} + \frac{1}{2}\left[1 - 0.4(\frac{B}{L})\right]\gamma_2 B N_{\gamma_{(2)}}$

$$q_{u(b)} = 18.9(0.9 + 0.75) \times 33.3 + \frac{1}{2}\left[1 - 0.4(\frac{1.2}{1.8})\right] \times 16.8 \times 1.2 \times 48.03$$

$$q_{u(b)} = 1393.5\ ^{kN}/_{m^2}$$

$$q_u = q_{u(b)} + (1 + \frac{B}{L})\gamma_1 H^2 (1 + \frac{2D_f}{H})(\frac{K_s tg\phi_1}{B})\lambda_s' - \gamma_1 H \le q_{u(t)}$$



تغییرات K_s با $\gamma_2 N_{\gamma(2)} / \gamma_1 N_{\gamma(1)}$

$$\frac{\gamma_2 N_{\gamma(2)}}{\gamma_1 N_{\gamma(1)}} = \frac{16.8 \times 48.03}{18.9 \times 155.55} = 0.27 \quad \text{و} \quad \phi_1 = 42^\circ \xrightarrow{\text{شکل ۱۰-۲۲}} K_s = 6.5$$

می‌توان بطور تقریب، ضریب شکل (λ'_s) را یک فرض کرد.

$$q_u = 1393.5 + (1 + \frac{1.2}{1.8}) \times 18.9 \times 0.75^2 (1 + \frac{2 \times 0.9}{0.75})(\frac{6.5 tg42}{1.2}) \times 1 - 18.9 \times 0.75 = 1673.14 \, kN/m^2$$

$$q_u \le q_{u(t)} \qquad \underline{O.K} \qquad \Rightarrow \qquad q_u = 1673.14 \, kN/m^2$$

$$q_{u(net)} = q_u - \gamma_1 D_f = 1673.14 - 18.9 \times 0.9 = 1656.13 \, kN/m^2$$

$$\Rightarrow q_{all(net)} = \frac{q_{u(net)}}{F_s} = \frac{1656.13}{3} = 552 \, kN/m^2$$

$$Q_{all(net)} = q_{all(net)} \times (B \times L) = 552 \times (1.2 \times 1.8) = 1192.3 kN$$

www.sharif.com

۱۱-۱۰ مسئله ۱۰-۱۰ را برای $B = L = 1.5m$ حل کنید.

شالوده مربعی است لذا از روابط شالوده‌های مربعی باید استفاده کنیم.

$$q_{u(t)} = \gamma_1 D_f N_{q(1)} + 0.3\gamma_1 B N_{\gamma_1} = 18.9\times 0.9\times 85.38 + 0.3\times 18.9\times 1.5\times 155.55 = 2775.3\ {}^{kN}/_{m^2}$$

$$q_{u(b)} = \gamma_1 (D_f + H) N_{q(2)} + 0.3\gamma_2 B N_{\gamma_{(2)}} = 18.9(0.9+0.75)\times 33.3 + 0.3\times 16.8\times 1.5\times 48.03$$

$$= 1401.6\ {}^{kN}/_{m^2}$$

$$q_u = q_{u(b)} + 2\gamma_1 H^2 (1+\frac{2D_f}{H})(\frac{K_s tg\phi_1}{B})\lambda_s' - \gamma_1 H \le q_{u(t)}$$

از مسئلهٔ قبل : $K_s = 6.5$

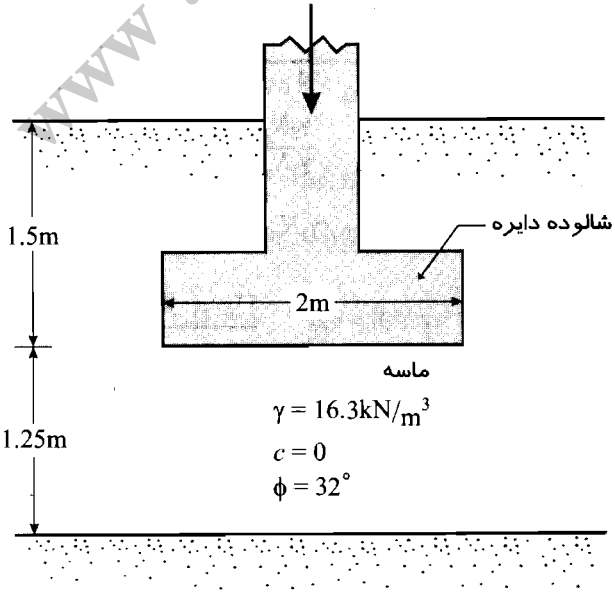
$$q_u = 1401.6 + 2\times 18.9\times (0.75)^2 (1+\frac{2\times 0.9}{0.75})(sd\ \frac{6.5tg42}{1.5})\times 1 - 18.9\times 0.75$$

$$= 1669.5\ {}^{kN}/_{m^2} < 2775.3\ {}^{kN}/_{m^2}$$

$$q_{u(net)} = 1669.5 - (18.9)\times(0.9) = 1652.49\ {}^{kN}/_{m^2} \Rightarrow q_{all(net)} = \frac{1652.49}{3} = 550.83\ {}^{kN}/_{m^2}$$

$$Q_{all(net)} = 550.83\times (1.5)^2 = 1239.4kN$$

۱۲-۱۰ با مراجعه به شکل، مطلوب است تعیین بار مجاز خالص قابل حمل توسط شالوده. از ضریب اطمینان 4 استفاده کنید.



از آنجائیکه $\phi_2 > \phi_1$ و $\gamma_2 > \gamma_1$ در نتیجه لایهٔ تحتانی متراکم‌تر از لایهٔ فوقانی است.

www.*PnuER*.com

لایهٔ فوقانی $\phi = 32^\circ$ $\xrightarrow{\text{جدول ۱۰-۱}}$ $N_q = 23.18$ ، $N_\gamma = 30.22$

لایهٔ تحتانی $\phi = 42^\circ$ $\xrightarrow{\text{جدول ۱۰-۱}}$ $N_q = 85.38$ ، $N_\gamma = 155.55$

(B قطر شالودهٔ دایره‌ای می‌باشد)

$$q_{u(t')} = \gamma_1 D_f N_{q(1)} + 0.3\gamma_1 B N_{\gamma_{(1)}}$$

$$q_{u(t')} = 16.3 \times 1.5 \times 23.18 + 0.3 \times 16.3 \times 2 \times 30.22 = 862.3 \, kN/m^2$$

$$q_{u(b')} = \gamma_2 D_f N_{q(2)} + 0.3\gamma_2 B N_{\gamma_{(2)}}$$

$$q_{u(b')} = 18.2 \times 1.5 \times 85.38 + 0.3 \times 18.2 \times 2 \times 155.55 = 4029.48 \, kN/m^2$$

$$q_u = q_{u(t')} + \left(q_{u(b')} - q_{u(t')}\right)\left(1 - \frac{H}{H_f}\right)^2$$

$$H_f = 2B = 2(2) = 4m$$

$$q_u = 862.3 + (4029.48 - 862.3)(1 - \frac{1.25}{4})^2 = 2359.3 \, kN/m^2$$

$$q_{u(t')} \le q_u \le q_{u(b')} \qquad \underline{O.K}$$

$$q_{u(net)} = q_u - \gamma_1 D_f = 2359.3 - 16.3 \times 1.5 = 2334.85 \, kN/m^2$$

$$(Q_{all})_{net} = \frac{q_{u(net)}}{F_s} \times (\frac{\pi D^2}{4}) = 1833.8kN$$

۱۳-۱۰ مسئلهٔ ۱۰-۱۲ را برای شالوده‌ای به قطر 1.25متر تکرار نمایید.

$$q_{u(t')} = 16.3 \times 1.5 \times 23.18 + 0.3 \times 16.3 \times 1.25 \times 30.22 = 751.47 \, kN/m^2$$

$$q_{u(b')} = 18.2 \times 1.5 \times 85.38 + 0.3 \times 18.2 \times 1.25 \times 155.55 = 3392.5 \, kN/m^2$$

$$q_u = 751.47 + (3392.5 - 751.47)(1 - \frac{1.25}{2 \times 1.25})^2 = 1411.73 \, kN/m^2$$

$$q_{u(t')} \le q_u \le q_{u(b')} \qquad \underline{O.K}$$

$$q_{u(net)} = 1411.73 - 16.3 \times 1.5 = 1387.28 = kN/m^2 \quad , \quad q_{all(net)} = \frac{1387.28}{4} = 346.82 \, kN/m^2$$

$$Q_{all(net)} = q_{all(net)} \times A = 346.82 \times (\pi \times \frac{(1.25)^2}{4}) = 425.6kN$$

۱۴-۱۰ با مراجعه به مسئلهٔ ۱۰-۱- الف، مطلوب است تعیین بار مجاز کلی با ضریب اطمینان 4 در مقابل گسیختگی برشی.

از مسئلهٔ ۱۰-۱- الف بدست آوردیم: $q_u = 1510.4 \, kN/m^2$

$$\Rightarrow \qquad q_{all} = \frac{q_u}{F_s} = \frac{1510.4}{4} = 377.6 \, kN/m^2$$

شالوده نواری است، لذا بار مجاز در هر متر طول آن را بدست می‌آوریم.

$$Q_{all} = q_{all} \times B \times 1 = 377.6 \times 2.5 \times 1 = 944 \, kN/m$$

www.PnuEB.com

۱۵-۱۰ **یک آزمایش بارگذاری صفحه با ابعاد $0.3\times0.3m$ بر روی یک خاک ماسه‌ای انجام شده است. بار نهایی q_u وارد بر واحد سطح برای آزمایش مساوی 205کیلونیوتن بر مترمربع بدست آمده است. با استفاده از ضریب اطمینان 4، مطلوبست تعیین بارکلی مجاز Q_{all} برای شالوده‌ای به ابعاد 1.65×1.65 متر.**

منظور از P، صفحه (*Plate*) و F، شالوده (*Foundation*) می‌باشد.

$$q_{u(F)}=q_{u(P)}\times\frac{B_{(F)}}{B_{(P)}}$$

$$q_{u(F)}=205\times\frac{1.65}{0.3}=1127.5\,{}^{kN}/_{m^2}$$

$$q_{all}=\frac{q_u}{F_s}=\frac{1127.5}{4}=281.875\,{}^{kN}/_{m^2}$$

$$Q_{all}=q_{all}\times B^2=281.875\times(1.65)^2=767.4kN$$

۱۶-۱۰ **یک آزمایش بارگذاری صفحه به قطر 762 میلیمتر بر روی خاک رس انجام شده و ظرفیت بار نهایی q_u بر واحد سطح مساوی 250 کیلونیوتن بر مترمربع بدست آمده است. بار مجاز کلی Q_{all} برای شالوده‌ای به قطر 2 متر چقدر می‌باشد؟ از ضریب اطمینان 3 استفاده کنید.**

$$q_{u(F)}=q_{u(P)}\times\frac{B_{(F)}}{B_{(P)}}$$

$$q_{u(F)}=250\times\frac{2000}{762}=656.17\,{}^{kN}/_{m^2}$$

$$q_{all}=\frac{656.17}{3}=218.72\,{}^{kN}/_{m^2}$$

$$Q_{all}=218.72\times(\pi\times\frac{2^2}{4})=687.14kN$$

۱۷-۱۰ **در زیر نتایج دو آزمایش بارگذاری صفحه ارائه شده است:**

بار کل Q (کیلونیوتن)	نشست (cm)	ابعاد صفحه (cm)
71.5	1.27	45 × 45
153.5	1.27	75 × 75

برای یک شالودهٔ مربع به ابعاد 1.75×1.75 متر با حداکثر نشست 1.27 سانتیمتر، مقدار بار کل قابل حمل چقدر می‌باشد؟

$$Q=Aq+Ps$$

در این رابطه A و P بترتیب مساحت و محیط می‌باشند.

$$\begin{cases}71.5=(0.45)^2q+(4\times0.45)s\\153.5=(0.75)^2q+(4\times0.75)s\end{cases}$$

با حل این دستگاه نتیجه می‌شود:

www.*PnEB*.com

$$\begin{cases} q = 152.59\,{}^{kN}/_{m^2} \\ s = 22.56\,{}^{kN}/_{m} \end{cases}$$

حال بار کل قابل حمل (Q) توسط شالوده‌ای با ابعاد 1.75×1.75 متر را از همان فرمول اولیه حساب می‌کنیم.

$$Q = Aq + Ps = (1.75)^2 \times 152.59 + (4\times1.75)\times 22.56 = 625.23kN$$

۱۸-۱۰ بر پایهٔ نتایج آزمایش بارگذاری صفحه در مسئلهٔ ۱۰-۱۷ مطلوب است تعیین قطر شالودهٔ دایره که قادر به حمل بارکلی 280 کیلونیوتن با نشست مجاز 12.7 میلیمتر باشد.

$$Q = Aq + Ps$$

$$280 = (\pi \times \frac{D^2}{4}) \times 152.59 + (\pi D) \times 22.56$$

$$\Rightarrow \qquad D = 1.26m$$ قطر شالودهٔ موردنظر

۱۹-۱۰ در زیر نتایج دو آزمایش بارگذاری صفحه نشان داده شده است. برپایهٔ این نتایج، مطلوب است تعیین اندازهٔ یک شالودهٔ مربع که قادر به حمل بار کل 300 کیلونیوتن با حداکثر نشست 15میلیمتر باشد.

بار کل (kN)	نشست (cm)	قطر صفحه (cm)
49.5	15	204.8
133.1	15	457.2

$$Q = Aq + Ps$$

$$\begin{cases} 49.5 = (\pi \times \frac{20.48^2}{4})q + (\pi \times 20.48)s \\ 133.1 = (\pi \times \frac{45.72^2}{4})q + (\pi \times 45.72)s \end{cases}$$

$$\Rightarrow \qquad \begin{cases} q = 0.025\,{}^{kN}/_{cm^2} \\ s = 0.642\,{}^{kN}/_{cm} \end{cases}$$

$$Q = Aq + Ps$$

$$300 = (B^2) \times 0.25 + (4B) \times 0.642$$

$$\Rightarrow \qquad B = 69.6\,cm$$

شالودهٔ مورد نظر مربعی به ضلع 0.696 متر می‌باشد.

www.PnuB.com

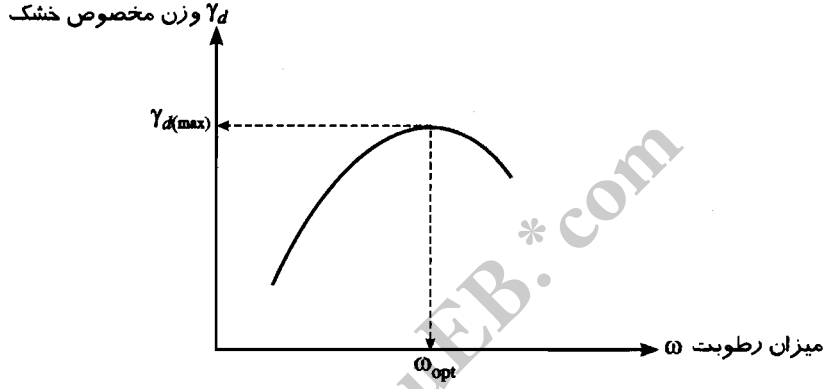
www*.PnuEB*.com

فصل ۱۲

تراکم خاک

www.KetabFarsi.com

ملاک درجهٔ تراکم خاک، وزن مخصوص خشک آن می‌باشد. با افزایس میزان رطوبت، وزن مخصوص خشک خاک نیز افزایش می‌یابد. علت این موضوع، نفوذ آب در بین دانه‌های خاک و کم‌شدن اصطکاک بین دانه‌های خاک می‌باشد و در نتیجه در اثر کوبیدن خاک راحت‌تر و بیشتر متراکم می‌شوند. این فرآیند تا جائی پیش می‌رود تا γ_d به $\gamma_{d(max)}$ برسد. دراین لحظه، رطوبت خاک را رطوبت بهینه می گویند و با ω_{opt} نشان می‌دهند. بعد از ω_{opt} با افزایش میزان رطوبت، از مقدار وزن مخصوص خشک خاک کاسته می‌شود. علت این موضوع، پر شدن حفرات خاک توسط آب و جلوگیری از پر شدن این حفرات توسط ذرات خاک در حین تراکم می‌باشد. (مجموعه‌ای از عملیات تراکم خاک را می‌توان با نمودار زیر که به نمودار تراکم معروف است نشان داد)



آزمایشی که بوسیلهٔ آن حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینهٔ خاک موردنظر به دست می‌آید، آزمایش تراکم پروکتور نامیده می‌شود.

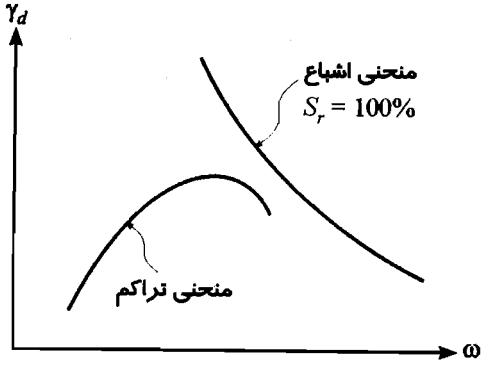
آزمایش پروکتور استاندارد: در این آزمایش، خاک در سه لایه در قالبی با حجم مشخص (تقریباً $950cm^3$) ریخته شده و هر لایه با 25ضربهٔ چکشی به وزن 2.5کیلوگرم که از ارتفاع 30 سانتی‌متر رها می‌شود، کوبیده می‌شود. سپس با تعیین وزن و حجم قالب، وزن مخصوص طبیعی نمونهٔ متراکم شده بدست می‌آید. با گذاشتن بخشی از نمونه در کوره (اون) و تعیین وزن اولیه و خشک‌شدهٔ‌آن، میزان رطوبت طبیعی نمونه بدست می‌آید و در نتیجه با رابطهٔ $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega}$ می‌توانیم وزن مخصوص خشک نمونه را بدست آوریم. عملیات فوق را با اضافه‌نمودن مقادیر مختلف آب به نمونه چندین بار تکرار می‌کنیم. سپس با بدست آوردن γ_d و ω مربوط به هر آزمایش می‌توانیم نمودار تراکم و از آنجا $\gamma_{d\,max}$ و ω_{opt} را تعیین کنیم.

منحنی اشباع: به طور نظری، حداکثر وزن مخصوص خشک (برای یک میزان رطوبت معلوم) زمانی بدست می‌آید که هیچ هوایی در فضای حفرات خاک نباشد یا به عبارتی درجهٔ اشباع مساوی صددرصد گردد. در این حالت وزن مخصوص خشک حداکثر را با γ_{zav} نشان می‌دهند که از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$\gamma_{zav} = \frac{\gamma_w}{\omega + \frac{1}{G_s}}$$

www.PnuEB.com

حال با دادن مقادیر مختلف ω می‌توان تغییرات γ_{zav} با ω را ترسیم نمود:



نکته: تحت هیچ شرایطی، منحنی تراکم، منحنی اشباع را قطع نمی‌کند و یا سمت راست آن نیز قرار نمی‌گیرد.

تراکم کارگاهی

عملیات تراکم کارگاهی اغلب با غلتک و نوع غلتک نیز وابسته به نوع خاک تعیین می‌گردد مثلاً برای خاک یکنواخت ماسه‌ای غلتک ویبره و ارتعاشی مناسب می‌باشد.

درجهٔ تراکم : $$R(\%) = \frac{\gamma_d \text{ (کارگاهی)}}{\gamma_d \text{ (حداکثر آزمایشگاهی)}} \times 100$$

تراکم نسبی : $$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} = \left[\frac{\gamma_{d}\text{ (کارگاه)} - \gamma_{d(min)}}{\gamma_{d(max)} - \gamma_{d(min)}}\right]\left[\frac{\gamma_{d(max)}}{\gamma_{d}\text{ (کارگاه)}}\right]$$

روشهای استانداردی برای تعیین وزن مخصوص یک خاک متراکم شده نظیر؛ روش مخروط ماسه، روش بالون لاستیکی، روش چگالی‌سنج هسته‌ای وجود دارد که از توضیح آنها در اینجا می‌پرهیزیم (نمونه‌ای از روش مخروط ماسه در مسئلهٔ ۱۲-۶ آورده شده است).

البته روشهای خاصی هم برای تراکم وجود دارد که در زیر به دو مورد آن اشاره شده است:

تراکم ارتعاشی

در این روش، کیفیت مصالح پرکننده (که در حین تراکم مورد استفاده قرار می‌گیرند) باتوجه به کمیتی به نام عدد تناسب (S_N) به کمک جدول زیر تعیین می‌گردد:

عدد تناسب $$S_N = 1.7\sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2} + \frac{1}{(D_{20})^2} + \frac{1}{(D_{10})^2}}$$

www.PtuEB.com

که در آن D_{50}، D_{20} و D_{10} بترتیب قـطر دانـه‌هایی (برحسب میلیمتر) هستند که 50درصد، 20درصد و 10درصد مصالح از آن ریزترند.

کیفیت مصالح پرکننده	محدودهٔ S_N
عالی	0-10
خوب	10-20
نسبتاً خوب	20-30
بد	30-50
غیرمناسب	>50

تراکم دینامیکی

عمق مؤثر نفوذ تراکم: $\boxed{D \cong 0.158\sqrt{W_H.h}}$

که در آن: D= عمق مؤثر نفوذ (m)

W_H = وزن وزنه (kN)

h = ارتفاع سقوط (m)

www.PnuEB.com

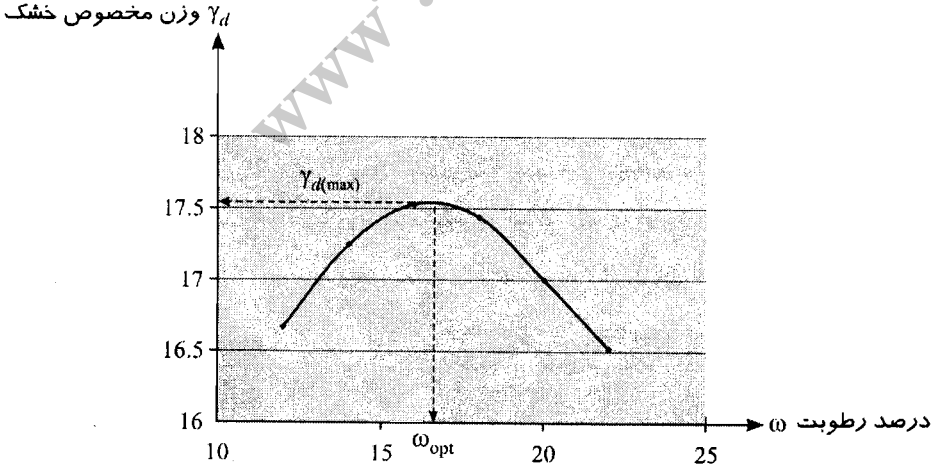
۱۲-۱ نتایج یک آزمایش پروکتور استاندارد به شرح زیر است. مطلوب است تعیین حداکثر وزن مخصوص خشک و میزان رطوبت بهینه.

میزان رطوبت	وزن خاک مرطوب در قالب (پوند)	حجم قالب آزمایش (سانتیمتر مکعب)
12	17.62	944
14	18.57	944
16	19.20	944
18	19.43	944
20	19.25	944
22	19.02	944

برای تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و همچنین رطوبت بهینه بایستی منحنی تراکم را ترسیم کنیم و همانطور که بیان شد منحنی تراکم، منحنی‌ای است که در دستگاه با محور افقی میزان رطوبت و محور قائم وزن مخصوص خشک بدست می‌آید.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad \text{و} \quad \gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega}$$

میزان رطوبت	γ (kN/m^3)	γ_d (kN/m^3)
12	18.67	16.67
14	19.67	17.25
16	20.34	17.53
18	20.58	17.44
20	20.39	17
22	20.15	16.52



با توجه به منحنی تراکم بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت $\omega_{opt} = 16.2\%$ و $\gamma_{d\,max} = 17.54\,kN/m^3$

۱۲-۲ برای خاکی با چگالی دانه‌های $G_s = 2.68$ در میزان رطوبتهای 5، 10، 15، 20 و 25 مطلوب است تعیین وزن مخصوص حفرات هوای صفر بر حسب کیلونیوتن بر متر مکعب. نمودار γ_{zav} را در مقابل میزان رطوبت رسم کنید.

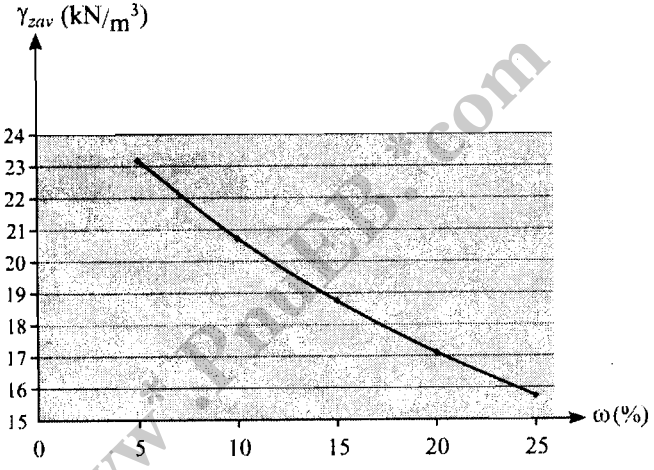
www.*PnuEB.com

همانطور که می‌دانید وزن مخصوص حفرات صفر (*Zero air void*) γ را از رابطهٔ زیر بدست می‌آورند.

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \omega G_s}$$

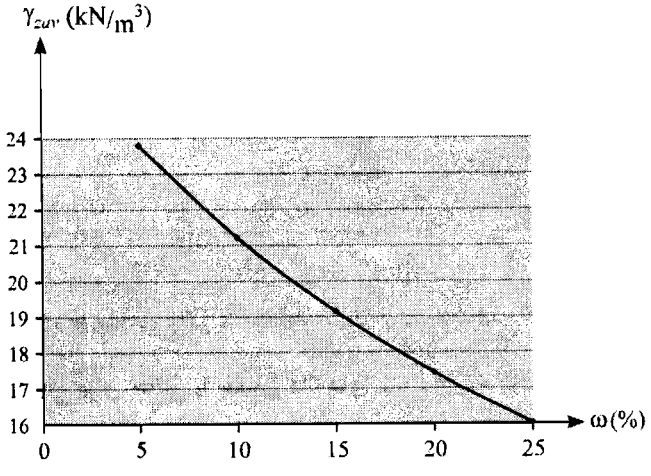
و در واقع γ_{zav} همان $\gamma_{d\,max}$ زمانیکه حجم حفرات هوا صفر می‌باشد بازای رطوبتهای مختلف می‌باشد.

$\omega(\%)$	5	10	15	20	25
$\gamma_{zav}(kN/m^3)$	23.18	20.73	18.75	17.12	15.74



www.PnuEB.com

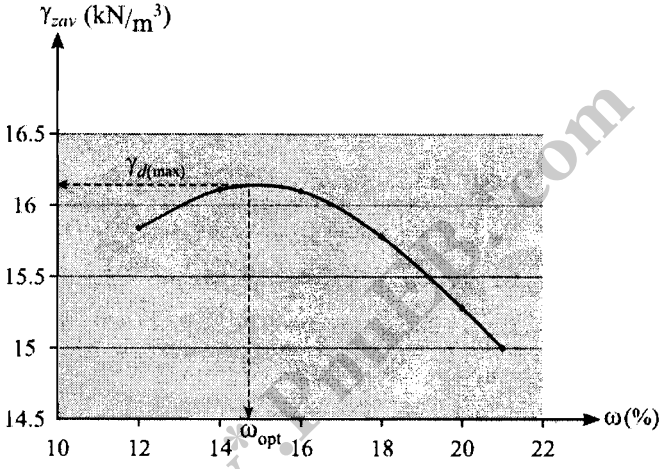
۳-۱۲ مسئلهٔ ۱۲- ۲ را با $G_s = 2.76$ تکرار کنید.



$\omega(\%)$	$\gamma_{zav}(kN/m^3)$
5	23.79
10	21.22
15	19.15
20	17.44
25	16.02

۱۲-٤ مسئلهٔ ۱۲- ۱ را با داده‌های زیر مجدداً تکرار کنید.

حجم قالب آزمایش	وزن خاک مرطوب در قالب	میزان رطوبت	γ	γ_d
( )	( )	(%)	(kN/m^3)	(kN/m^3)
944	16.75	12	17.74	15.84
944	17.34	14	18.37	16.11
944	17.62	16	18.66	16.1
944	17.58	18	18.62	15.78
944	17.30	20	18.33	15.28
944	17.12	21	18.14	15



www.niazir.com

با توجه به نمودار فوق استنباط می‌شود که: $\gamma_{d\,max} = 16.15\,^{kN}/_{m^3}$ و $\omega_{opt} = 14.7\%$

۱۲-۵ وزن مخصوص خشک حداکثر و حداقل یک ماسه که در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده، بترتیب مساوی 18.31 و 15.25کیلونیوتن بر مترمکعب می‌باشد، در صورتی که تراکم نسبی 64 درصد باشد، میزان تراکم کارگاهی چقدر خواهد بود؟

$\gamma_{d(max)} = 18.31\,^{kN}/_{m^3}$

$\gamma_{d(min)} = 15.25\,^{kN}/_{m^3}$

$D_r = 64\%$

$R = ?$

$$R_o = \frac{\gamma_{d(min)}}{\gamma_{d(max)}} = \frac{15.25}{18.31} = 0.83$$

$$R = \frac{R_o}{1 - D_r(1 - R_o)}$$

میزان تراکم $R = \dfrac{0.83}{1 - 0.64(1 - 0.83)} = 0.931 = 93.1\%$

$$R(\%)=\frac{\gamma_{d\ (\text{کارگاهی})}}{\gamma_{d\ (\text{حداکثر آزمایشگاهی})}}\times 100$$

$$\Rightarrow \gamma_{d\ (\text{کارگاهی})}=0.931\times 18.31=17.05\,{}^{kN}/_{m^3}$$

۶-۱۲ نتایج وزن مخصوص کارگاهی تعیین شده با استفاده از روش مخروط ماسه به شرح زیر می‌باشد:

الف: $1570\,{}^{kg}/_{m^3}$ = جرم مخصوص خشک ماسهٔ اتاوا

ب: 0.545kg = جرم ماسهٔ اتاوای لازم برای پرکردن مخروط

پ: 7.59kg = (قبل از استفاده) ماسه+ مخروط+جرم تنگ

ت: 4.78kg = (بعد از استفاده) ماسه+ مخروط+جرم تنگ

ث: 3.007kg = جرم خاک مرطوب کنده شده از حفره

ج: 10.2% = میزان رطوبت خاک مرطوب

مطلوب است تعیین وزن مخصوص خشک خاک کوبیده شده در کارگاه (کیلونیوتن بر مترمکعب)

با توجه به معلومات مسئله نامگذاری‌هایی به ترتیب زیر انجام می‌دهیم:

m_1 = (قبل از استفاده) جرم ماسهٔ درون تنگ + جرم قیف + جرم تنگ $= 7.59\,kg$

m_4 = (بعد از استفاده) جرم ماسهٔ باقیمانده در تنگ + جرم قیف + جرم تنگ $= 4.78\,kg$

$\Rightarrow$ جرم ماسهٔدرون قیف و حفره $= m_5 = m_1 - m_4 = 7.59 - 4.78 = 2.81\,kg$

m_2 = جرم خاک مرطوب حفاری شده از حفره $= 3.007\,kg$

$$\Rightarrow \text{جرم خشک خاک کنده شده از حفره} = m_3 = \frac{m_2}{1+\frac{\omega(\%)}{100}} = \frac{3.007}{1+\frac{10.2}{100}} = 2.73\,kg$$

حالا جرم خشک خاک درون حفره را داریم اگر حجم حفره را هم بدست آوریم می‌توانیم وزن مخصوص خشک خاک کوبیده شده در کارگاه را بدست آوریم:

m_c = جرم ماسهٔ لازم برای پرکردن قیف (مخروط) $= 0.545\,kg$

$$\text{حجم حفرهٔ حفاری شده} = V = \frac{m_5 - m_c}{\rho_{d(\text{ماسه})}} = \frac{2.81-0.545}{1570} = 1.44\times 10^{-3}\,m^3$$

$$\text{جرم مخصوص خشک خاک کوبیده شده}\ \rho_d = \frac{m_3}{V} = \frac{2.73}{1.44\times 10^{-3}} = 1892.32\,{}^{kg}/_{m^3}$$

$$\text{وزن مخصوص خشک خاک کوبیده شده}\ \gamma_d = \rho_d \times g = 1892.32\times 9.81 = 18563\,{}^{N}/_{m^3} = 18.56\,{}^{kN}/_{m^3}$$

۷-۱۲ در یک پروژهٔ تراکم ارتعاشی، مشخصات خاک پرکننده به شرح زیر است:
مطلوب است تعیین عدد تناسب و کیفیت خاک برای استفاده به عنوان پرکننده.

$D_{10} = 0.11\,mm$

$D_{20} = 0.19\,mm$

$D_{50} = 1.3\,mm$

www.PnuFB.com

S_N = عدد تناسب (*Suitability*)

$$S_N = 1.7\sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2}+\frac{1}{(D_{20})^2}+\frac{1}{(D_{10})^2}}$$

$$S_N = 1.7\sqrt{\frac{3}{(1.3)^2}+\frac{1}{(0.19)^2}+\frac{1}{(0.11)^2}} = 18$$

با توجه به جدول ارائه شده توسط براون (*1977*) مشاهده می‌کنیم S_N در محدوده *10* تا *20* قرار گرفته است لذا خاکی با مشخصات موجود در صورت مسئله به عنوان مصالح پرکننده «خوب» می‌باشد.

۸-۱۲ مسئلهٔ ۱۲-۷ را با اطلاعات زیر مجدداً حل کنید:

$D_{10} = 0.28\,mm$

$D_{20} = 0.37\,mm$

$D_{50} = 1.3\,mm$

$$S_N = 1.7\sqrt{\frac{3}{(1.3)^2}+\frac{1}{(0.37)^2}+\frac{1}{(0.28)^2}} = 7.94$$

با توجه به جدول براون $0 < S_N < 10 \Leftarrow$ کیفیت مصالح پرکننده عالی می‌باشد.

۹-۱۲ در یک آزمایش تراکم دینامیکی، وزن وزنه 150کیلونیوتن و ارتفاع سقوط 12 متر بود. مطلوب است تعیین عمق مؤثر تراکم برحسب متر.

$D \cong 0.158\sqrt{W_H.h}$ عمق مؤثر نفوذ تراکم (m)

که در این رابطه: W_H = وزن وزنه برحسب کیلونیوتن

h = ارتفاع سقوط برحسب متر

$D \cong 0.158\sqrt{150 \times 12} = 6.7\,m$

۱۰-۱۲ مسئلهٔ ۱۲- ۹ را با وزن وزنهٔ 250 کیلونیوتن برای ارتفاع سقوط 9 متر تکرار کنید.

$D \cong 0.158\sqrt{250 \times 9} = 7.5\,m$

www.PnuEB.com