

فصل ۱۳:

همبستگی پارامترهای خاک

جزوه درس مهندسی پی (کارشناسی عمران)

استاد: عبدالمتین ستایش

ترجمه فصل ۹ کتاب:

Subsurface Investigations

(Publication No. FHWA HI-97-021)



Email1: a_matin_s@yahoo.com



Email2: Setayesh@outlook.com



Edition: 01, 08/1392



Copyright: Abdul Matin Setayesh



Filename: FoundEng_Ch13

@ME2CH

WWW.ME2CH.ROZBLOG.COM

اغلب از مهندسين و زمين شناسان انتظار مي رود رفتار خاک را حتي با داشتن اطلاعات آزمایشگاهی اندک و حتي بعضی مواقع بدون در اختیار داشتن نتایج آزمایشگاهی پیش بینی نمایند. در بعضی مواقع هم تنها نتایج شناسایی و خصوصیات شاخص خاک موجود هستند. هدف این فصل ارائه روابط همبستگی پارامترهای خاک است. روابطی که جهت طراحی های اولیه بسیار ارزشمند است. این روابط همبستگی برای شناسایی رفتار غیر معمول خاک و بررسی و نتایج آزمایش ها بسیار مفید هستند.

در این فصل مقادیر معمول خصوصیات مهندسی رده های مختلف خاک ها به همراه روابط همبستگی معمول بین خصوصیات خاک و خصوصیات مهندسی ارائه شده است. هدف این فصل محدود است به روابط همبستگی بین نتایج طبقه بندی خاک، خصوصیات شاخص و مقادیر عدد نفوذ استاندارد N_c . علاوه بر این توضیحاتی اضافی هم پیرامون ارتباط پارامترهای مختلف خاک و تفسیر همبستگی بین پارامترها ارائه شده است. محبت همبستگی پارامترهای خاک متنوع و پیچیده بوده و بررسی تمام این روابط همبستگی در قالب یک فصل ممکن نیست. خوانندگان علاقه مند به این مبحث می توانند کارهای کولهاوی و ماین (۱۹۹۰) و کارتر و بنتلی (۱۹۹۸) رجوع نمایند.

در اینجا باید تاکید نماییم که تخمین های انجام گرفته بر مبنای روابط همبستگی هیچگاه نباید جایگزین آزمایش های آزمایشگاهی در طراحی های ژئوتکنیکی شود. به طور کلی تمام روابط همبستگی باید تقریبی تلقی شوند زیرا عوامل مختلفی همچون حساسیت، تاریخچه تنش و گذشت زمان می تواند به طور قابل ملاحظه ای بر خصوصیات خاک تاثیر بگذارد.

۲-۱۳ | خصوصیات ترکیبی خاک

داشتن اطلاعاتی از خصوصیات عمومی ترکیب خاک ها جهت مقاصد مختلف همچون تخمین روابط ساده وزنی - حجمی و تخمین خصوصیات مکانیکی مفید است. روابط ارائه شده در این فصل ما را در انجام این کار یاری خواهد نمود.

۱-۲-۱۳ | وزن واحد حجم

در جدول ۱-۱۳ وزن مخصوص ها به همراه نسبت تخلخل برای خاک های مختلف ارائه شده است.

۲-۲-۱۳ | چگالی

چگالی برای اکثر خاک ها چندان متغییر نیست. اغلب از مقدار $2/67$ برای خاک های غیر چسبنده و مقدار $2/70$ برای رس غیر آلی استفاده می شود. مقادیر چگالی خاک های آلی کمتر است.

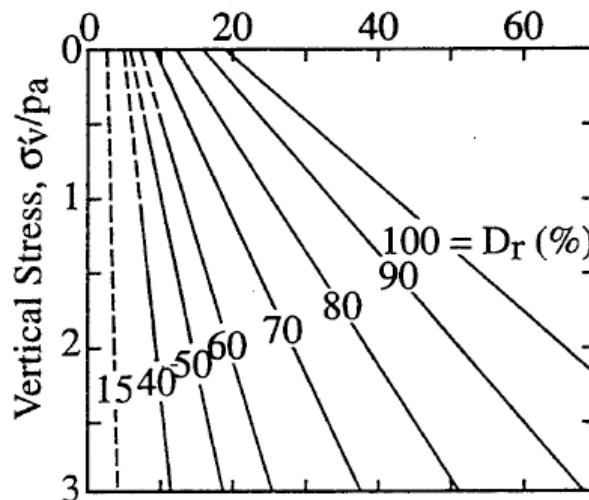
۱۳-۲-۳ تراکم نسبی خاک های غیر چسبنده

تراکم نسبی درجای ماسه ها عمدتاً از طریق مقدار N آزمایش نفوذ استاندارد تخمین زده می شود. در شکل ۱۳-۱ رابطه بین عدد N ، تراکم نسبی و فشار سربار تصحیح شده نشان داده شده است. چنانکه P_a فشار جوی می باشد (هولتز و گیبز). در جدول ۱۳-۲ یک همبستگی نسبتاً قابل اطمینان بین عدد N و تراکم نسبی ارائه شده است. روابط مشابهی نیز بر مبنای آزمایش نفوذ مخروط و آزمایش دیلاتومتر بدست آمده اند.

جدول ۱۳-۱ مقادیر معمول وزن مخصوص خاک ها (Kulhawy and Mayne, 1990)

چگالی توده				نسبت تخلخل		ضریب یکنواختی D_{60}/D_{10}	اندازه تقریبی ذرات، mm			نوع خاک
γ_{dry}/γ_w خشک،		γ_{sat}/γ_w اشباع،		e_{max}	e_{min}		D_{max}	D_{min}	D_{60}	
Min	Max	Min	Max							
-	-	-	-	0.92	0.35	1.0	-	-	-	خاک دانه ای یکنواخت <ul style="list-style-type: none"> کرده های یکسان (مدل نظری) ماسه استاندارد اتاوا ماسه یکنواخت تمیز سیلت غیر ارگانیک یکنواخت
1.47	1.76	1.49	2.10	0.80	0.50	1.1	0.84	0.59	0.67	
1.33	1.89	1.35	2.18	1.00	0.40	1.2 ~ 2.0	-	-	-	
1.28	1.89	1.30	2.18	1.10	0.40	1.2 ~ 2.0	0.05	0.005	0.012	
1.39	2.04	1.41	2.28	0.90	0.30	5 ~ 10	2.0	0.005	0.02	خاک دانه ای خوب دانه بندی شده <ul style="list-style-type: none"> ماسه سیلتی ماسه ریز تا درشت تمیز ماسه میکادار ماسه و شن سیلتی
1.36	2.21	1.38	2.37	0.95	0.20	4 ~ 6	2.0	0.05	0.09	
1.22	1.92	1.23	2.21	1.20	0.40	-	-	-	-	
1.43	2.34	1.44	2.48	0.85	0.14	15 ~ 300	100	0.005	0.02	
0.96	2.16	1.60	2.36	1.80	0.25	10 ~ 30	2.0	0.001	0.003	رس سیلتی یا ماسه ای
1.35	2.24	1.84	2.42	1.00	0.20	-	250	0.001	-	رس سیلتی با دانه بندی منفصل به همراه شن
1.60	2.37	2.00	2.50	0.70	0.13	25~1000	250	0.001	0.002	شن، ماسه، سیلت و رس خوب دانه بندی شده
0.80	1.79	1.51	2.13	2.40	0.50	-	0.05	0.5 μ	0.001	رس ($30 \sim 50\% < 2\mu$)
0.21	1.70	1.14	2.05	12.0	0.60	-	0.01	10Å	0.01	رس کلوئیدی ($Over 50\% < 2\mu$)
0.64	1.76	1.39	2.10	3.00	0.55	-	-	-	-	سیلت ارگانیک
0.48	1.60	1.30	2.00	4.40	0.70	-	-	-	-	رس ارگانیک ($30 \sim 50\% < 2\mu$)

عدد N در آزمایش نفوذ استاندارد (تعداد ضریات در هر ۳۰۰ میلی متر)



شکل ۱۳-۱ رابطه بین عدد N ، تراکم نسبی و فشار سربار تصحیح شده در ماسه ها

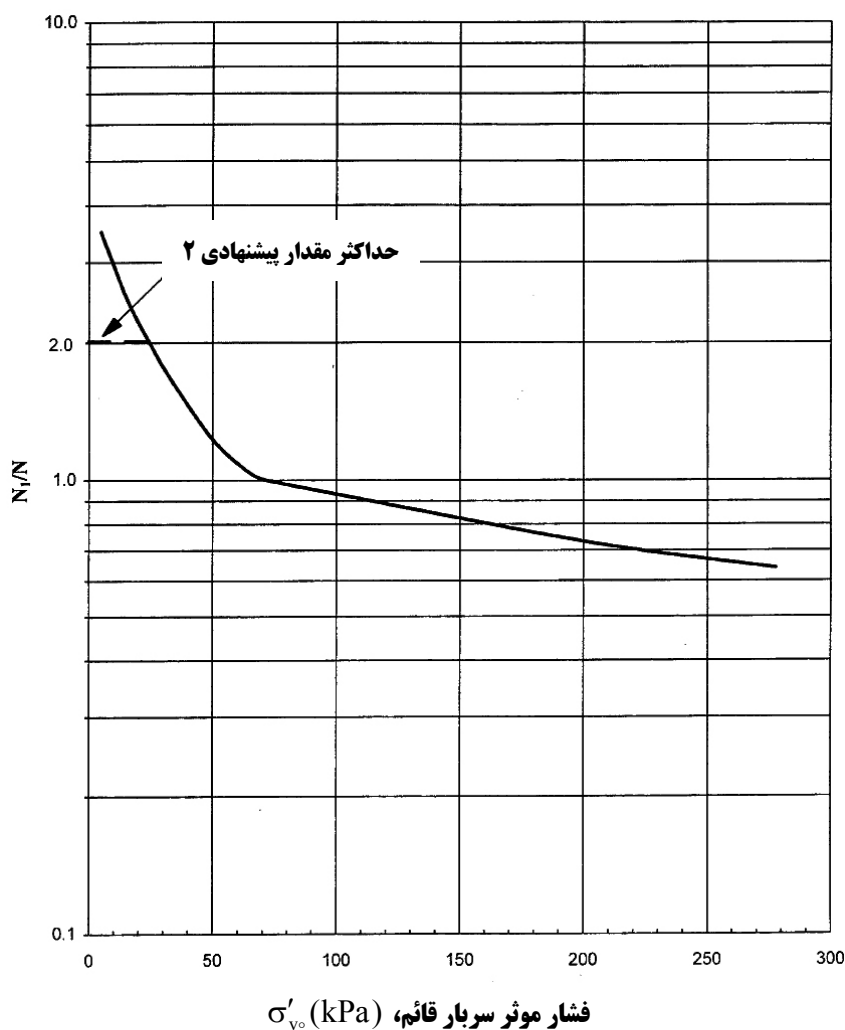
جدول ۱۳-۲ تراکم نسبی ماسه ها (پک و همکاران، ۱۹۷۴)

مقدار N (تعداد ضربه در هر 300mm)	تراکم نسبی
0 - 4	خیلی شل
4 - 10	شل
10 - 30	تراکم متوسط
30 - 50	متراکم
> 50	خیلی متراکم

مقدار N باید برای اثر سربار و فشار منفذی تصحیح شود. در شکل ۱۳-۲ رابطه ای برای بدست آوردن مقادیر N اصلاح شده یعنی N_1 ارائه شده است. به جز مواردی که ذکر شده، تمام روابط همبستگی ارائه شده در این فصل بر حسب مقادیر N تصحیح نشده می باشند.

در ماسه های ریز اشباع یا سیلتی، مقدار N باید برای اثرات فشار منفذی به صورت زیر اصلاح شود:

$$N_{corrected} = 15 + 0.5(N_{field} - 15) \quad (\text{معادله ۱۳-۱})$$



شکل ۱۳-۲: رابطه تصحیح مقدار N برای فشار سربار، Peck and Bazaraa

۱۳-۲-۴ قوام خاک های چسبنده

همانند همبستگی های مرتبط به تراکم نسبی، قوام خاک با استفاده از روابط همبستگی به آزمایش های درجا مرتبط شده است. در جدول ۱۳-۳ مقادیر همبستگی بین قوام خاک و مقادیر عدد N که اغلب مورد استفاده قرار می گیرد ارائه شده است. به طور کلی این همبستگی ها را می توان به عنوان تقریب های اولیه و خام در نظر گرفت.

جدول ۱۳-۳ قوام رس ها (پک و همکاران، ۱۹۷۴)

مقدار N (تعداد ضربه در هر 300mm)	تراکم نسبی
0 - 2	خیلی نرم
2 - 4	نرم
4 - 8	متوسط
8 - 15	سفت
15 - 30	خیلی سفت
> 30	سخت

۱۳-۳ | روابط تراکم پذیری

تراکم خاک در پاسخ به بارگذاری را می توان به دو دسته تقسیم نمود: نشست ارتجاعی و نشست وابسته به زمان. نشست های ارتجاعی، آبی و قابل بازگشت و عمدتاً از طریق نظریه ارتجاعی خطی محاسبه می شوند. نشست های وابسته به زمان هم در خاک های دانه ای و هم در خاک های چسبنده رخ می دهد، گرچه زمان واکنش خاک های دانه ای معمولاً کوتاه است. علاوه بر وابسته به زمان بودن، واکنش خاک در برابر بارگذاری غیر خطی بوده و تغییر شکل ها تنها به طور جزئی قابل بازگشت هستند. دو نوع نشست وابسته به زمان شناسایی شده اند: تحکیم اولیه در اثر خروج آب منفذی تحت فشار از داخل منافذ خاک در اثر بارگذاری ایجاد می شود. تراکم ثانویه اساساً پس از اینکه تمام فشار منفذی اضافی محو شد (یعنی تحکیم اولیه به اتمام رسیده است) رخ می دهد هرچند مکانیزم های مرتبط به تراکم ثانویه به طور کامل درک نشده است. تخمین تراکم پذیری خاک های دانه ای دشوار تر بوده و عمدتاً دلیل اصلی آن تهیه نمونه های دستنخورده جهت آزمایش است. در خاک های دانه ای، تراکم یا نشست معمولاً توسط روش های غیر مستقیم تخمین زده می شود.

۱۳-۳-۱ پارامترهای الاستیک

مدول تنش- کرنش (ارتجاعی) را می توان از طریق شیب (تانژانت یا سکانت) منحنی های تنش- کرنش بدست آمده از آزمون های سه محوری بدست آورد. مقادیر معمول مدول ارتجاعی سکانت E_s و نسبت پواسون ν برای خاک های مختلف در جدول ۱۳-۴ ارائه شده است. هر دو مقدار E_s و ν به شدت وابسته به روش انجام آزمایش هستند (محصور، نامحصور، زهکش نشده، زهکشی شده) میزان محصور شدگی، نسبت پیش تحکیمی، درصد رطوبت، آهنگ کرنش و دستخوردگی نمونه. بنابراین قضاوت مهندسی بسیار زیادی برای بدست آوردن مقادیر قابل اعتماد جهت طراحی مورد نیاز خواهد بود. تعدادی از همبستگی ها بین E_s و مقادیر N در جدول ۱۳-۵ و همبستگی بین مقاومت برشی زهکشی نشده و C_u در جدول ۱۳-۶ ارائه شده است.

جدول ۱۳-۴ ثابت های پلاستیک خاک های مختلف (AASHTO, 1995)

نسبت پواسون، ν	مدول الاستیسیته E_s (Mpa)	خاک
0.4 – 0.5 (زهکشی نشده)	2 - 15	رس
	15 – 50	رس حساس
	50 - 100	رس با سفتی متوسط تا سفت خیلی سفت
0.1 – 0.3	15 – 60	لس
0.3 – 0.35	2 – 20	سیلت
0.25	8 – 12	ماسه ریز
	12 – 20	شل
	20 – 30	متوسط متراکم
0.2 – 0.35	10 – 30	ماسه
	30 – 50	شل
0.3 – 0.4	50 – 80	متوسط متراکم
	0.2 – 0.35	30 – 80
80 – 100		شل
100 - 200		متوسط متراکم

جدول ۱۳-۵ تخمین E_s از طریق مقدار N (آشتو، ۱۹۹۵)

مدول الاستیسیته E_s (Mpa)	خاک
0.4 N_1	سیلت ها، سیلت های ماسه ای، مخلوط ها کمی چسبنده
0.7 N_1	ماسه تمیز ریز تا متوسط و ماسه های اندکی سیلتي
N_1	ماسه های درشت و ماسه های دارای کمی شن
1.17 N_1	شن ماسه ای و شن ها

- $N_1=N$ تصحیح شده نسبت به عمق (شکل ۹-۲)
- برای ماسه های ریز اشباع و سیلت ها، مقدار N همچنین باید برای اثرات فشار منفذی هم تصحیح شود.

جدول ۱۳-۶ تخمین E_s از طریق مقدار c_u (آشتو، ۱۹۹۵)

مدول الاستیسیته E_s (Mpa)	خاک
400 c_u - 1000 c_u	رس نرم حساس
1500 c_u - 2400 c_u	رس متوسط تا سفت
3000 c_u - 4000 c_u	رس خیلی سفت

۱۳-۳-۲ پارامترهای تحکیمی

تراکم پذیری وابسته به زمان خاک های ریزدانه معمولاً با استفاده از آزمایش های تحکیم اندازه گیری می شود. نتایج را می توان به طرق مختلفی ارائه داد. تعدادی از روش های معمول نمایش نتایج تحکیم و پارامترهای مختلف مورد استفاده برای توصیف نتایج آزمایش تحکیم در شکل ۱۳-۳ نشان داده شده است.

چهار متغیر اصلی مورد استفاده برای تخمین نشست تحکیمی عبارتند از (شکل ۱۳-۳ را ببینید):

- شاخص فشردگی C_c یا نسبت فشردگی CR
- شاخص فشردگی مجدد یا شاخص تورم C_r یا نسبت تورم RR
- ضریب تحکیم (فائیم) c_v
- ضریب تحکیم ثانویه C_α

شاخص فشردگی، C_c

بیش از ۷۰ رابطه همبستگی مختلف برای ارتباط C_c با خصوصیات شاخص رس ها توسط محققین ارائه شده است. هرچند پراکندگی زیادی بین نتایج وجود دارد، رابطه ارائه شده توسط ترزاقی و پک (۱۹۶۷) که C_c را بر حسب حد روانی برای رس های عادی تحکیم بدست می دهد، هنوز هم طرفداران زیادی داشته و به صورت زیر بدست می آید:

$$C_c = 0.009(LL - 10) \quad (\text{معادله ۱۳-۲})$$

این رابطه دارای محدوده خطای $\pm 30\%$ بوده و برای رس های غیر ارگانیک با درجه حساسیت حداکثر ۴ و حد روانی حداکثر ۱۰۰ معتبر است.

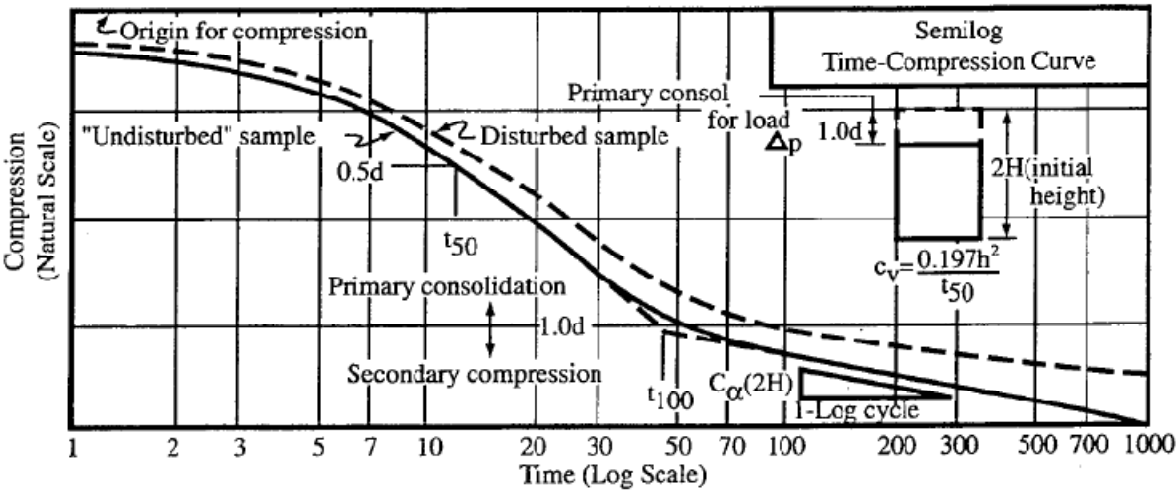
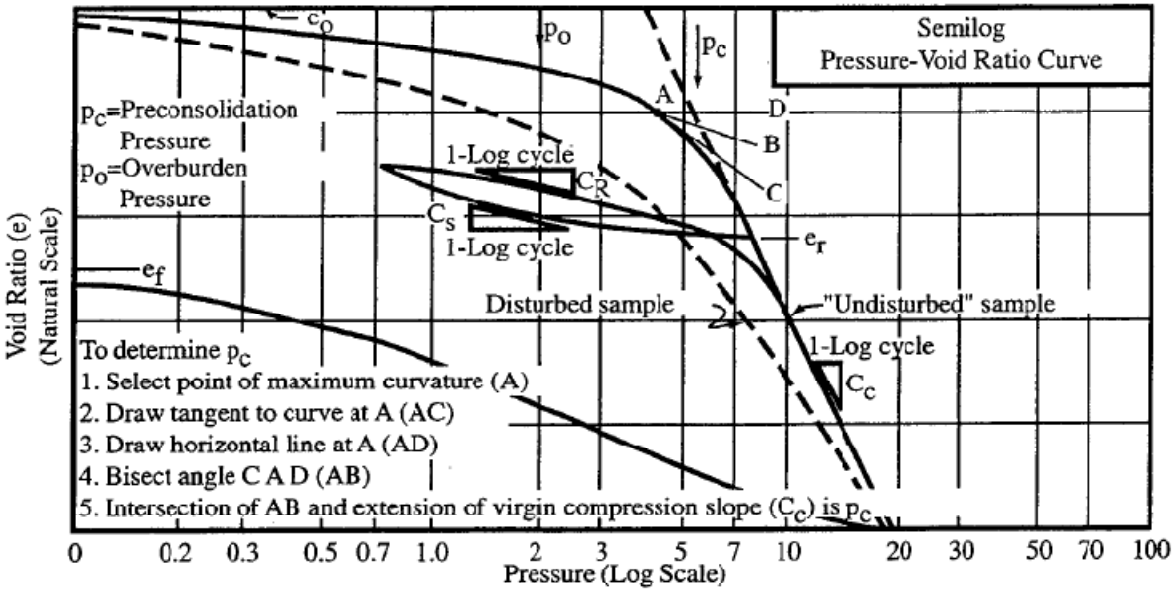
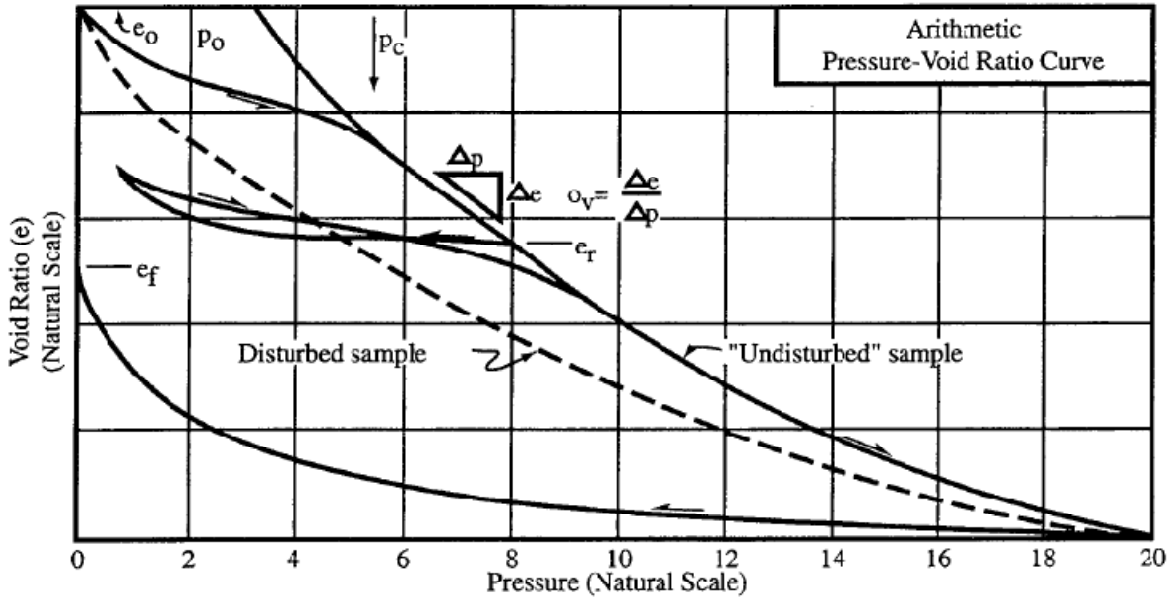
رابطه مفید دیگر C_c را به صورت زیر به PI ارتباط می دهد (Wroth and Wood, 1978):

$$C_c \approx 0.5G_s (PI/100) \quad (\text{معادله ۱۳-۳})$$

که در این رابطه G_s چگالی ذرات است. با فرض مقدار معمول $G_s = 2.7$ برای رس ها رابطه فوق به صورت زیر ساده خواهد شد: $C_c = PI/74$.

برای دیگر روابط بین C_c و پارامترهای شاخص، خواننده می تواند به **Kulhaway & Mayne, 1990** رجوع نماید. مقادیر معمول C_c برای خاک ها در جدول ۱۳-۷ ارائه شده است.

یک پارامتر جایگزین برای C_c ، نسبت فشردگی C_R است که به صورت $C_c/(1+e_0)$ تعریف می شود. در این رابطه e_0 همان نسبت تخلخل اولیه است. نرمالیزه کردن C_c بدین روش باعث کاهش پراکندگی داده ها می شود. بازه معمول مقادیر C_R بر حسب درصد رطوبت طبیعی که توسط لمب و ویتمن (۱۹۷۹) گزارش شده در شکل ۱۳-۴ نشان داده شده است.



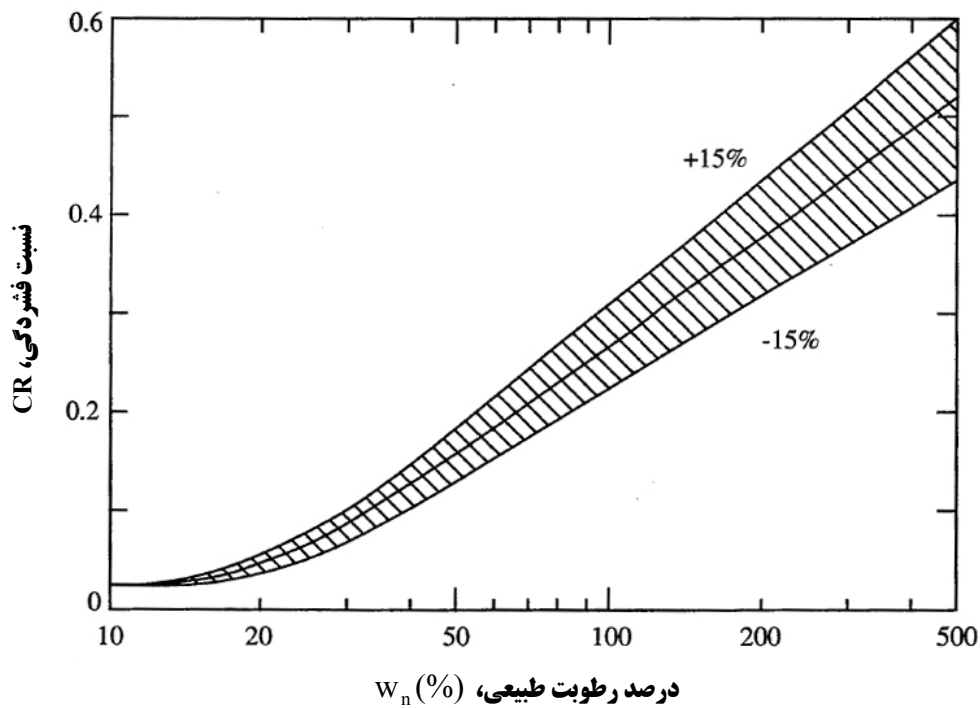
شکل ۱۳-۳ پارامترهای تحکیمی

جدول ۱۳-۷ مقادیر معمول c_c (Holtz and Kovacs, 1981)

C_c	خاک
0.2 – 0.5	رس های عادی تحکیم یافته با حساسیت متوسط
0.15 – 0.30	رس سیلتی شیکاگو (CL)
0.3 – 0.50	رس آبی بوستون (CL)
0.5 – 0.6	رس ناحیه Vicksburg Buckshot (CH)
1 – 3	رس سوئدی با حساسیت متوسط (CL-CH)
1 – 4	رس های کانادایی Leda (CL-CH)
7 – 10	رس مکزیکو سیتی (MH)
4 به بالا	رس های ارگانیک (OH)
10 – 15	پیت ها (Pt)
1.5 – 4.0	سیلت های ارگانیک و سیلت های رسی (ML-MH)
0.4 – 1.2	گل خلیج سانفرانسیسکو (CL)
0.7 – 0.9	رس های ناحیه Old Bay سانفرانسیسکو (CH)
0.40	رس بانکوک

شاخص فشردگی مجدد، C_r

مقادیر معمول C_r بین 0.015 تا 0.35 قرار دارد (Roscoe et al, 1958) و اغلب مقدار آن بین ۱۰ تا ۲۰ درصد C_c می باشد (Ladd, 1973).



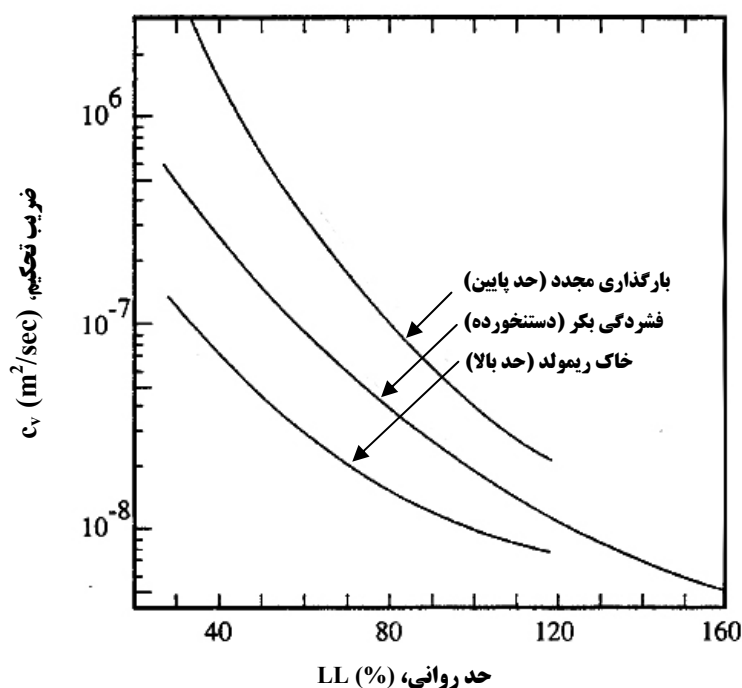
شکل ۱۳-۴ نسبت فشردگی در برابر درصد رطوبت (Lambe and Whitman, 1969)

ضریب تحکیم قائم، c_v

به خاطر بازه وسیع مقادیر نفوذپذیری در خاک ها، ضریب تحکیم خود می تواند مقادیر بسیار متغییر داشته باشد، از $1m^2/yr$ برای رس ها با نفوذپذیری کم تا $1000 m^2/yr$ یا بیشتر برای رس های ماسه دار، رس های ترک خورده و سنگ های هوازده. بعضی از مقادیر معمول برای رس ها در جدول ۱۳-۸ ارائه شده است. همچنین یک رابطه همبستگی تقریبی بین حد روانی در شکل ۱۳-۵ نشان داده شده است. اغلب برای رس های حاوی درز یا نوارهای ریز ماسه، ضریب تحکیم افقی c_h می تواند بسیار بزرگتر از c_v بوده و حاکم بر مسئله باشد.

جدول ۱۳-۸ مقادیر معمول ضریب تحکیم قائم c_v
(گرد آوری شده توسط Carter and Bentley, 1991)

c_v		خاک
$(cm^2/s \times 10^{-4})$	(m^2/yr)	
40 ± 20	12 ± 6	رس آبی بوستون (CL)
2-10	0.6-3.0	سیلت های ارگانیک (OH)
6.5-8.7	2.0-2.7	رس های دریاچه های یخی (CL)
8.5	2.7	رس سیلتی شیکاگو (CL)
		رس سوئدی با حساسیت متوسط (CL-CH)
0.4-0.7	0.1-0.2	▪ آزمایشگاه
0.7-3.0	0.2-1.0	▪ محل
2-4	0.6-1.2	گل خلیج سانفرانسیسکو (CL)
0.9-1.5	0.3-0.5	رس شهر میکزیکو سیتی (MH)



شکل ۱۳-۵ همبستگی تقریبی بین c_v و LL (NAVFAC, DM-7.1, 1982)

ضریب شاخص ثانویه، $C_{\alpha e}$

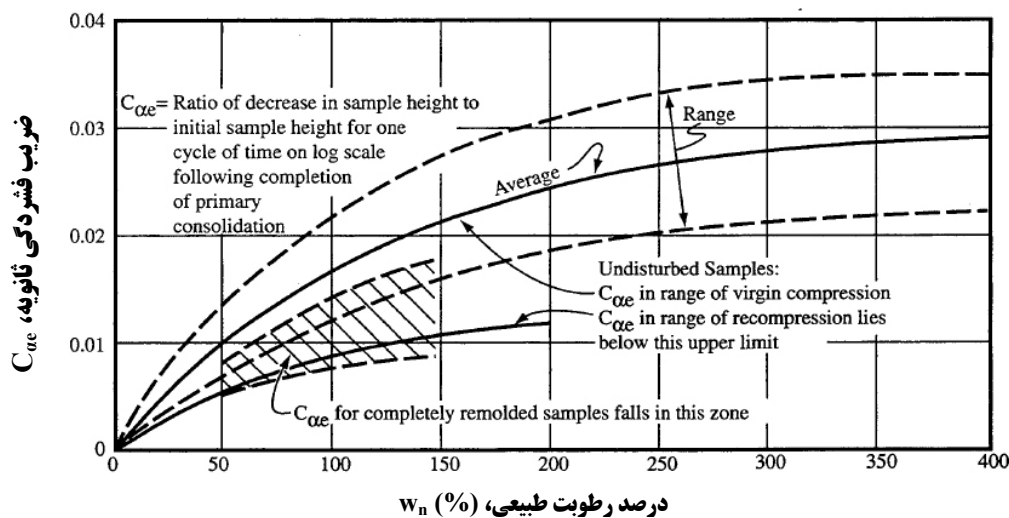
این ضریب را می توان یا برحسب واحدهای کرنش $C_{\alpha e}$ یا نسبت تخلخل $C_{\alpha e}$ در برابر لگاریتم زمان به صورت زیر بیان نمود (شکل ۱۳-۳ را ببینید):

$$C_{\alpha e} = d\varepsilon / d(\log t); C_{\alpha e} = de / d(\log t); C_{\alpha e} = C_{\alpha e} / (1 + e_0) \quad (\text{معادله ۱۳-۴})$$

$C_{\alpha e}$ معمولاً به C_c ارتباط داده می شود به طوری که مقادیر $C_{\alpha e} / C_c$ به طور معمول در بازه ۰.۰۲۵ تا ۰.۰۰۶ برای خاک های غیرآلی و ۰.۰۳۵ تا ۰.۰۸۵ برای خاک های آلی تغییر است. بعضی از مقادیر معمول در جدول ۱۳-۹ ارائه شده است. یکی از همبستگی های بین $C_{\alpha e}$ و درصد رطوبت طبیعی در شکل ۱۳-۶ نشان داده شده است.

جدول ۱۳-۹ مقادیر معمول $C_{\alpha e} / C_c$ (Carter and Bentley, 1991)

$C_{\alpha e} / C_c$	خاک
0.035 - 0.06	خاک های ارگانیک
0.035 - 0.085	پیت های فیبردار و آمورف ^۱
0.09 - 0.10	خاک موسکاژ کانادایی ^۲ (خاک لجنی)
0.03 - 0.06	رس لدا (کانادا)
0.05 - 0.07	رس سوئدی
0.026 -	رس آبی نرم
0.04 - 0.06	رس ها و سیلت های ارگانیک
0.025 - 0.055	رس حساس، پرتلند، ME
0.04 - 0.06	گل خلیج سانفرانسیسکو
0.03 - 0.06	رس متخلخل ناحیه New Liskeard (کانادا)
0.03 - 0.035	رس مکزیکو سیتی
0.03 - 0.06	سیلت رودخانه هادسون
0.04 - 0.075	سیلت رسی ارگانیک New Haven

شکل ۱۳-۶ رابطه همبستگی بین $C_{\alpha e}$ و درصد رطوبت طبیعی (NAVFAC, DM-7.1, 1982)

¹ Amorphous and fibrous peat

² Canadian muskeg

۴-۱۳ | روابط نفوذپذیری

نفوذپذیری خاک به شدت تابع ساختار ذرات و لایه بندی آن است. به طور مثال رس های حاوی رگه یا نوارهای ماسه ای دارای مقادیر نفوذپذیری بسیار بزرگتر از نفوذپذیری خود مصالح است. همچنین از آنجاییکه جریان تمایل به حرکت در مسیر کمترین مقاومت دارد، خاک های لایه بندی شده اغلب دارای مقادیر نفوذپذیری هستند که چندین برابر نفوذپذیری قائم آن ها می باشد. به دلیل اندازه کوچک نمونه های آزمایشگاهی و نحوه نمونه گیری و آماده سازی آنها، خصوصیات توده خاک در این آزمایش ها لحاظ نشده و نتایج آزمایش ها نماینده واقعی از خاک درجا با یک ساختار مشخص نخواهد بود. علاوه بر این در آزمون های آزمایشگاهی معمولاً آب را مجبور به حرکت در راستای قائم از داخل نمونه می نمایند که با شرایط محلی ممکن است کاملاً در تضاد باشد. آزمون های محلی (صحرائی) این کاستی ها را برطرف می نماید اما از آنجایی که الگوی جریان آب از داخل یک چاه را تنها می توان حدس زد، تفسیر نتایج آزمایش ها دشوار و همراه با عدم قطعیت است. بنابراین یک دسته مسئله با دسته ای دیگر جایگزین می شود.

۱۳-۴-۱ مقادیر معمول

نفوذپذیری یک خاک اغلب بر حسب ضریب نفوذپذیری، k بیان می شود، بازه معمول مقادیر نفوذپذیری خاک ها در جدول ۱۳-۱۰ ارائه شده که این مقادیر اولین بار توسط کاساگرانده و فادوم (۱۹۴۰) ارائه شده اند. در این جدول همچنین مقادیر معمول نفوذپذیری خاک های تراکم یافته (با استفاده از آزمایش تراکم اصلاح شده) که به روش یونیفاید طبقه بندی شده اند نیز گنجانده شده است (Carter and Bentley, 1991). مقادیر معمول نفوذپذیری مصالح مورد استفاده در ساخت بزرگراه ها در جدول ۱۳-۱۱ ارائه شده است.

۱۳-۴-۲ همبستگی نفوذپذیری با دانه بندی

یکی از معادلات نظری که در سال ۱۹۴۸ توسط Taylor ارائه شد به صورت زیر k را به دانه بندی خاک، نسبت تخلخل و خواص مرتبط به نفوذپذیری خاک مرتبط می سازد:

$$k = D_s^2 \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{1+e} c \quad (\text{معادله ۱۳-۵})$$

که در این رابطه K ضریب نفوذپذیری، D_s اندازه موثر ذرات، γ وزن مخصوص آب، μ ویسکوزیته آب، e نسبت تخلخل و c ضریب شکل است. در رابطه فوق اندازه موثر D_s معمولاً اندازه موثر D_{10} انتخاب می شود. بدین ترتیب رابطه فوق به رابطه هیزن به صورت زیر قابل تبدیل می شود:

$$k = C_1 D_{10}^2 \quad (\text{معادله ۱۳-۶})$$

که در این رابطه $C_1 = \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{1+e} c$ می باشد.

بر مبنای مطالعات انجام شده بر روی ماسه تمیز، هیزن در سال ۱۹۱۱ مقداری بین ۰.۰۱ تا ۰.۰۱۵ برای C_1 پیشنهاد نمود. چنانکه k بر حسب m/s بوده و D_{10} بر حسب mm می باشد. اما با توجه به معادله ۱۳-۵ می تواند دریافت که حتی تغییرات بسیار کوچک در e به میزان زیادی بر مقدار k تاثیر گذار است ولی بازه تعریف شده برای C_1 توسط هیزن این تاثیر زیاد را در نظر نمی گیرد.

جدول ۱۳-۱۰ مقادیر معمول نفوذپذیری خاک ها (Carter and Bentley, 1991)

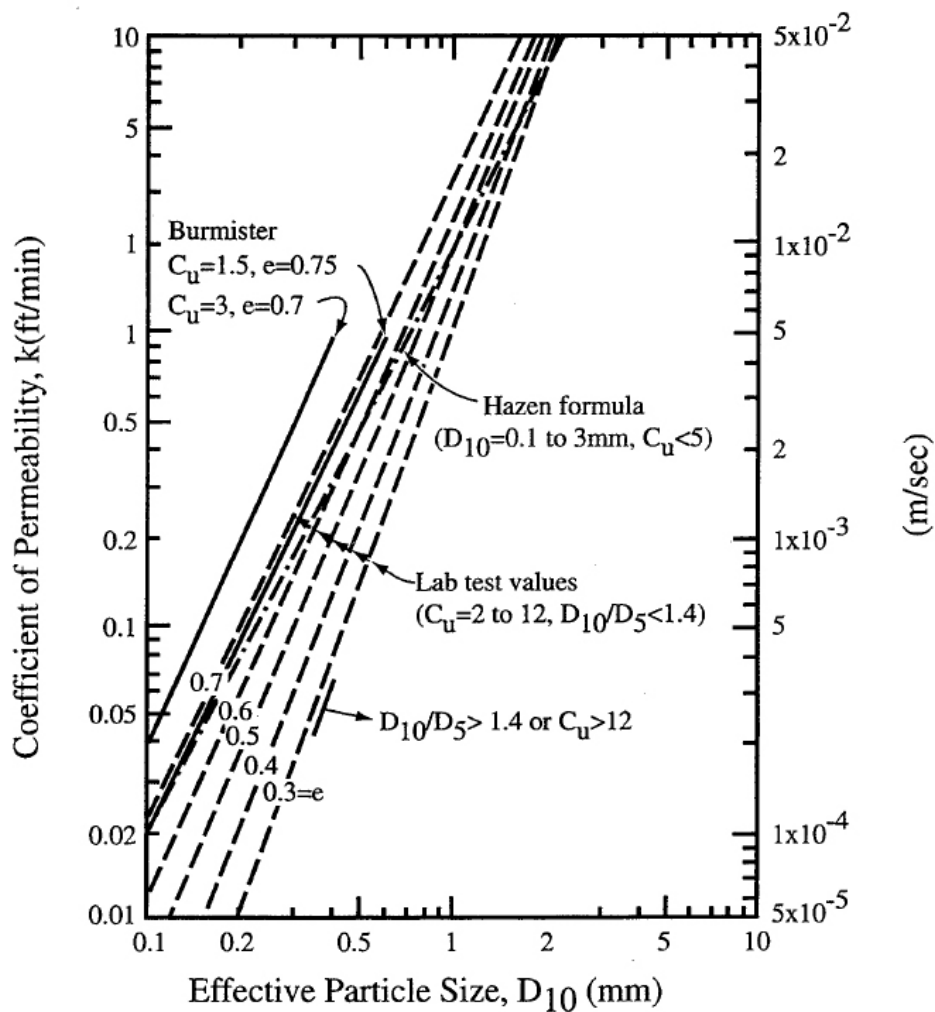
	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1
	m/s											
Coefficient of permeability (log scale)	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	100
	cm/s											
Permeability:	Practically impermeable			Very low			Low			Medium		High
Drainage conditions:	Practically impermeable			Poor			Good					
Typical soil groups:	GC → GM →			SM			SW →			GW →		
	CH			SC			SM-SC			SP →		
	MH			MC-CL						GP →		
Soil types:	Homogeneous clays below the zone of weathering			Silt, fine sands, silty sands, glacial till, stratified clays			Clean sands, sand and gravel mixtures			Clean gravels		
				Fissured and weathered clays and clays modified by the effects of vegetation								

Note: The arrow adjacent to group classes indicates that permeability values can be greater than the typical value shown.

جدول ۱۱-۱۳ مقادیر معمول نفوذپذیری مصالح مورد استفاده در بزرگراه ها (Krebs & Walker, 1971)

نفوذپذیری (m/s)	مصالح
$0.4 - 4 \times 10^{-3}$	مصالح درشت دانه با دانه بندی یکنواخت
$4 \times 10^{-3} - 4 \times 10^{-5}$	مصالح سنگی خوب دانه بندی شده بدون ریزدانه
$7 \times 10^{-4} - 7 \times 10^{-6}$	ماسه مورد استفاده در بتن، با درصد خاکه پایین
$7 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-8}$	ماسه مورد استفاده در بتن، با درصد خاکه بالا
$10^{-7} - 10^{-9}$	ماسه های سیلتی و رسی
$7 \times 10^{-8} - 7 \times 10^{-10}$	سیلت تراکم یافته
کمتر از 10^{-9}	رس تراکم یافته
$4 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-8}$	بتن قیری
کمتر از 10^{-10}	بتن ساخته شده با سیمان پرتلند

در شکل ۷-۱۳ نمودارهای K در برابر D_{10} بر مبنای نتایج آزمایش ها با در نظر گرفتن مقدار e ترسیم شده است. این همبستگی ها برای ماسه و شن توسعه یافته اند. بازه وسیع تر اندازه دانه ها در رس ها و تاثیر نوع کانی، استفاده از این نوع همبستگی ها برای رس ها را محدودتر می نماید.



شکل ۷-۱۳ نفوذپذیری ماسه ها و شن ها (NAVFAC, DM-7.1, 1982)

۵-۱۳ | همبستگی پارامترهای مقاومتی

اغلب فرض بر این است که مقاومت برشی خاک ها تابع معیار تسلیم موهر کولمب می باشد. این معیار بر حسب چسبندگی c و زاویه اصطکاک داخلی ϕ بیان می شود. قبل از اینکه طراح پارامترهای مقاومتی را انتخاب نماید باید تصمیم بگیرد که آیا تحلیل زهکشی نشده (c_u, ϕ_u) مناسب است یا زهکشی شده (c', ϕ') .

۱۳-۵-۱ مقاومت برشی زهکشی نشده خاک های چسبنده

در اکثر رس های اشباع که تحت شرایط بارگذاری زهکش نشده سریع آزمایش شوند، زاویه مقاومت برشی ϕ_u برابر صفر است. این مسئله بدین معنی است که مقاومت برشی رس مقداری ثابت بوده و برابر چسبندگی ظاهری خاک c_u در یک مقدار درصد رطوبت مشخص است.

مقاومت برشی زهکشی نشده را می توان به صورت خام و اولیه با قراردادن یک تکه رس در بین انگشتان و اعمال فشار و به کار بستن مشاهدات تجربی جدول ۱۳-۱۲ تخمین زد. اما باید متذکر شد که از مقادیر بدست آمده از طریق جدول ۱۳-۱۲ نباید برای طراحی استفاده نمود. از عدد نفوذ استاندارد، N هم می توان مطابق جدول ۱۳-۳ برای تخمین مقاومت برشی زهکش نشده استفاده نمود.

جدول ۱۳-۱۲ تخمین مقاومت برشی رس ها (Peck, et. al., 1974)

مشخصات	واژه توصیفی (قوام)	مقاومت فشاری محدود نشده $q_u (=2c_u)$, (kPa)
به راحتی با فشار انگشتان له می شود	خیلی نرم	< 25
با فشار کم انگشتان می توان به آن شکل داد	نرم	20 - 50
با فشار زیاد انگشتان می توان به آن شکل داد	متوسط	50 - 100
با انگشت شست به سهولت می توان آنرا دنداندار نمود	سفت	100 - 200
با ناخن شست به سهولت می توان آنرا دنداندار نمود	خیلی سفت	200 - 400
با ناخن شست به سختی می توان آنرا دنداندار نمود	سخت	> 400

توجه: از این جدول می توان به همراه جدول ۱۳-۳ برای تعیین همبستگی c_u و N استفاده نمود.

مقاومت برشی دستخورده

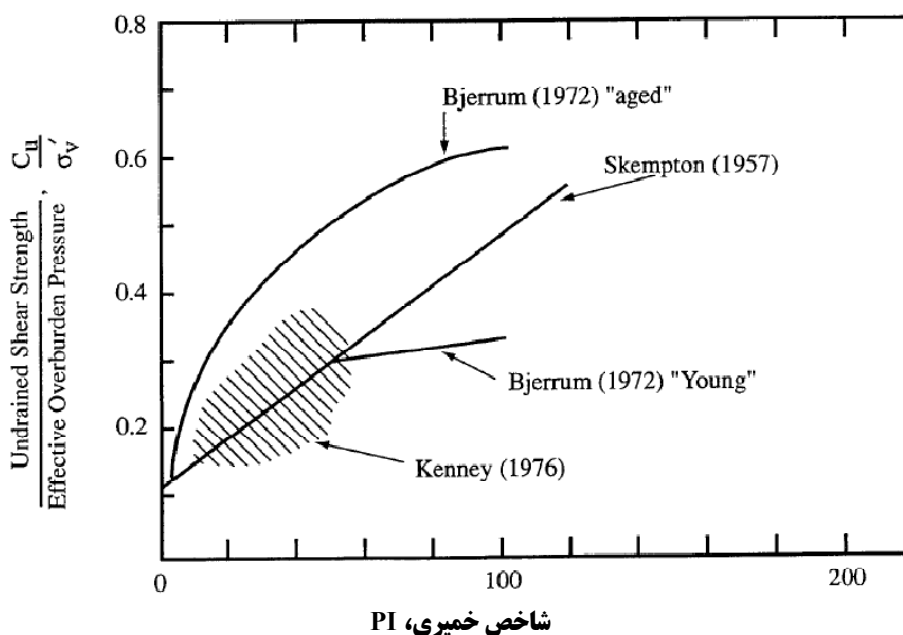
مشاهده شده که در اکثر رس های عادی تحکیم یافته، مقاومت برشی زهکشی نشده متناسب است با فشار سربار موثر. در چنین خاک هایی اسکمپتون (۱۹۵۷) رابطه ای بین مقاومت برشی و فشار سربار موثر (c_u / σ'_v) و شاخص خمیری مطابق شکل ۱۳-۸ پیشنهاد نمود. این شکل همچنین نتایج بدست آمده توسط تعداد دیگری از محققین را هم نشان می دهد. همانطور که می توان مشاهده نمود این یافته ها بسیار متغیر بوده و چنین روابطی باید با احتیاط مورد استفاده قرار گیرد. اما همبستگی هایی همانند رابطه اسکمپتون (۱۹۵۷) برای تخمین اولیه و کنترل داده های آزمایشگاهی رس های عادی تحکیم یافته بسیار مفید است.

همانطور که میدانیم حد روانی (LL) و حد خمیری (PL) از جنس درصد رطوبت بوده و برای یک نمونه مشخص رس، هر یک از این درصد رطوبت ها متناظر است با یک مقاومت برشی زهکشی نشده مشخص. بنابراین می توان نتیجه گرفت که مقاومت برشی تابعی از مقدار درصد رطوبت طبیعی، ω_n نسبت به رطوبت حد روانی LL و حد خمیری PL است. این ارتباط را به راحتی می توان با استفاده از مفهوم شاخص روانی LI که به صورت زیر تعریف می شوند بیان نمود:

یک رابطه مناسب برای تخمین مقاومت برشی زهکش نشده رس های دستخورده بر مبنای شاخص روانی در شکل ۱۳-۹ ارائه شده است.

$$LI = \frac{\omega_n - PL}{LL - PL} = \frac{\omega_n - PL}{PI} \quad (\text{معادله ۱۳-۷})$$

مقاومت برشی زهکش نشده رس ها بستگی به تاریخچه پیش تحکیمی رس و ساختار خاک دارد. به طور کلی نسبت مقاومت برشی زهکشی نشده (c_u / σ'_v) در رس های پیش تحکیم یافته در شکل ۱۳-۱۰ ارائه شده است. همانند دیگر روابط همبستگی، از این رابطه هم باید با احتیاط استفاده نمود. مخصوصاً اینکه این همبستگی از طریق اطلاعات محدودی بدست آمده (۵ رس). در کاربردهای عملی راحت تر است که مقاومت برشی زهکشی نشده رس های پیش تحکیم را به طور مستقیم از طریق آزمایش بدست آوریم تا اینکه بخواهیم از طریق دیگر شاخص های خاک آنرا تخمین بزنیم.



شکل ۱۳-۸ رابطه بین نسبت مقاومت برشی زهکشی نشده به فشار سربار موثر و شاخص خمیری در رس های عادی تحکیم یافته (Holtz and Kovacs, 1981)

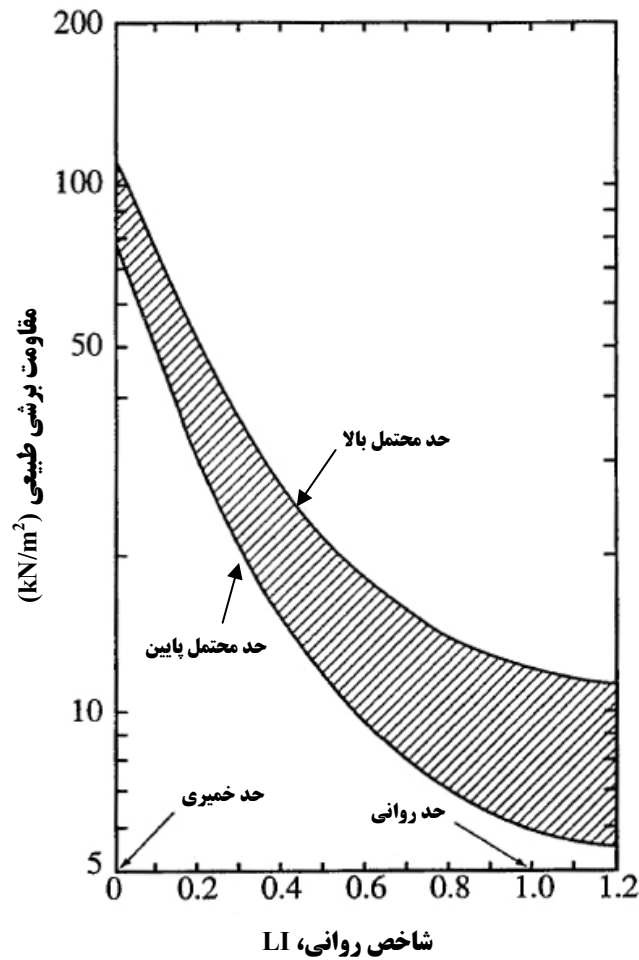
همبستگی با عدد N

تلاش های متعددی جهت تعیین یک رابطه همبستگی بین مقاومت فشاری محدود نشده یا مقاومت برشی زهکشی نشده رس ها با عدد نفوذ استاندارد N به انجام رسیده است که میزان موفقیت این تلاش ها بسیار متغیر بوده است. تعدادی از این روابط در قالب شکل ۱۳-۱۱ ارائه شده است. این روابط خام و اولیه هستند بنابراین باید تنها جهت تخمین های اولیه و کنترل توسط نتایج آزمایشگاهی به کار گرفته شود.

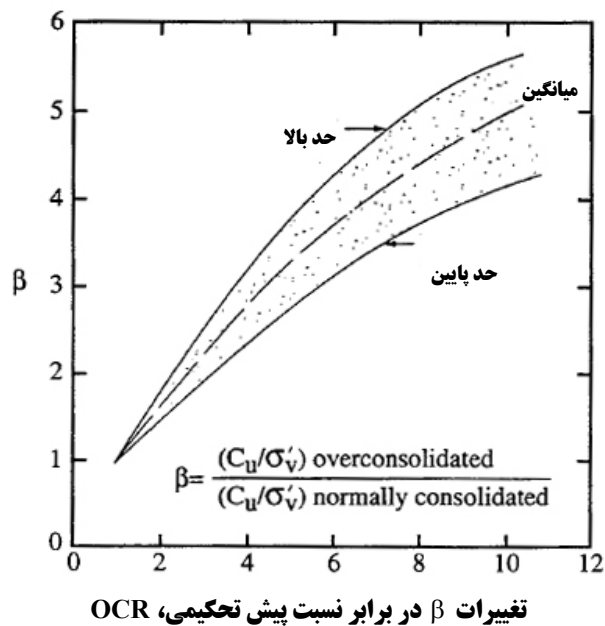
۱۳-۵-۲ مقاومت برشی زهکشی شده و موثر خاک های چسبنده

بعضی مواقع لازم است که محاسبات پایداری بر حسب تنش های موثر به انجام برسد. پارامترهای خاکی که در این محاسبات مورد استفاده قرار می گیرند یا از طریق آزمایش برش مستقیم زهکشی شده یا آزمایش های سه محوری زهکشی شده (که c' و ϕ' را بدست می دهد) یا از طریق آزمایش های سه محوری با اندازه گیری فشار منفذی (که c'_{cu} و ϕ'_{cu} را بدست می دهد)

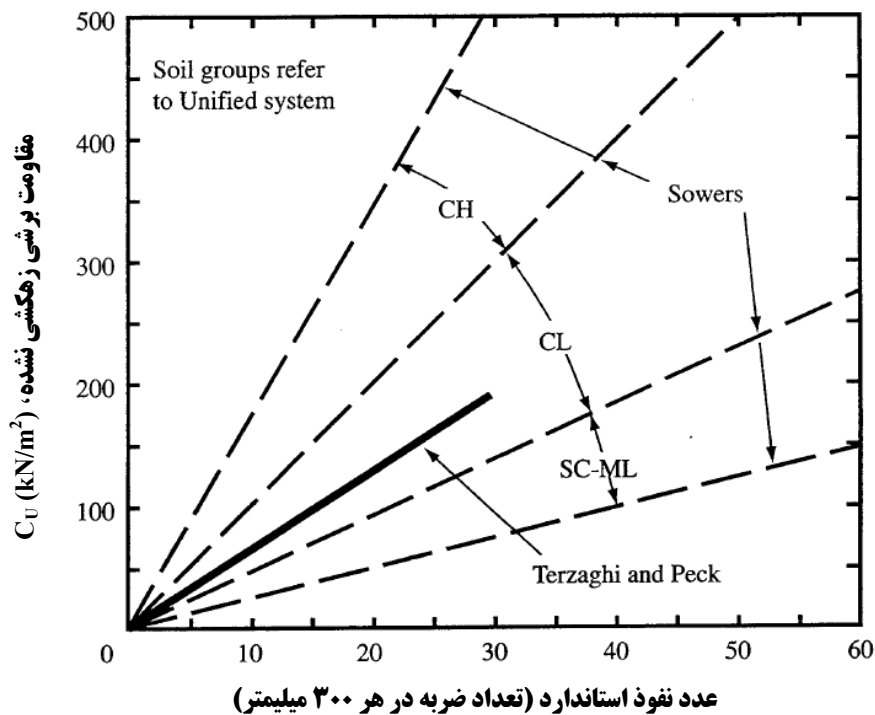
بدست می آیند. به لحاظ عملی اختلاف اندکی بین مقادیر دو دسته پارامترها برای رس های اشباع آزمایش شده تحت شرایط مرزی و مسیرهای تنش مختلف وجود دارد.



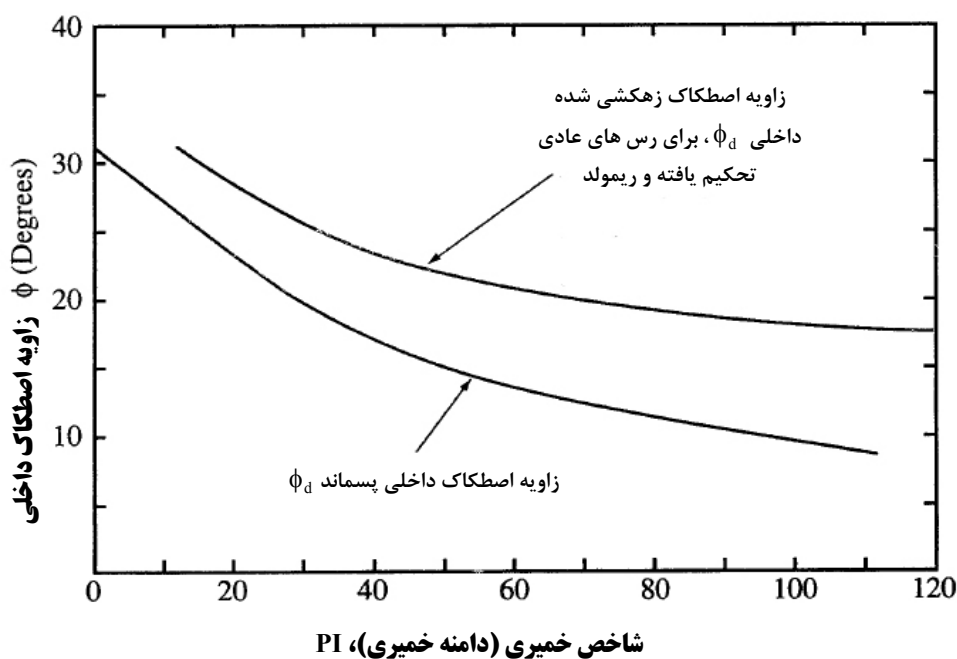
شکل ۹-۱۳ رابطه بین مقاومت برشی طبیعی رس های دستنخورده و LI (Carter and Bentley, 1991)



شکل ۱۰-۱۳ رابطه بین مقاومت برشی طبیعی رس های دستنخورده و LI (Das, 1987)



شکل ۱۱-۱۳ همبستگی تقریبی بین مقاومت برشی زهکشی نشده و مقدار N (Sowers, 1979)

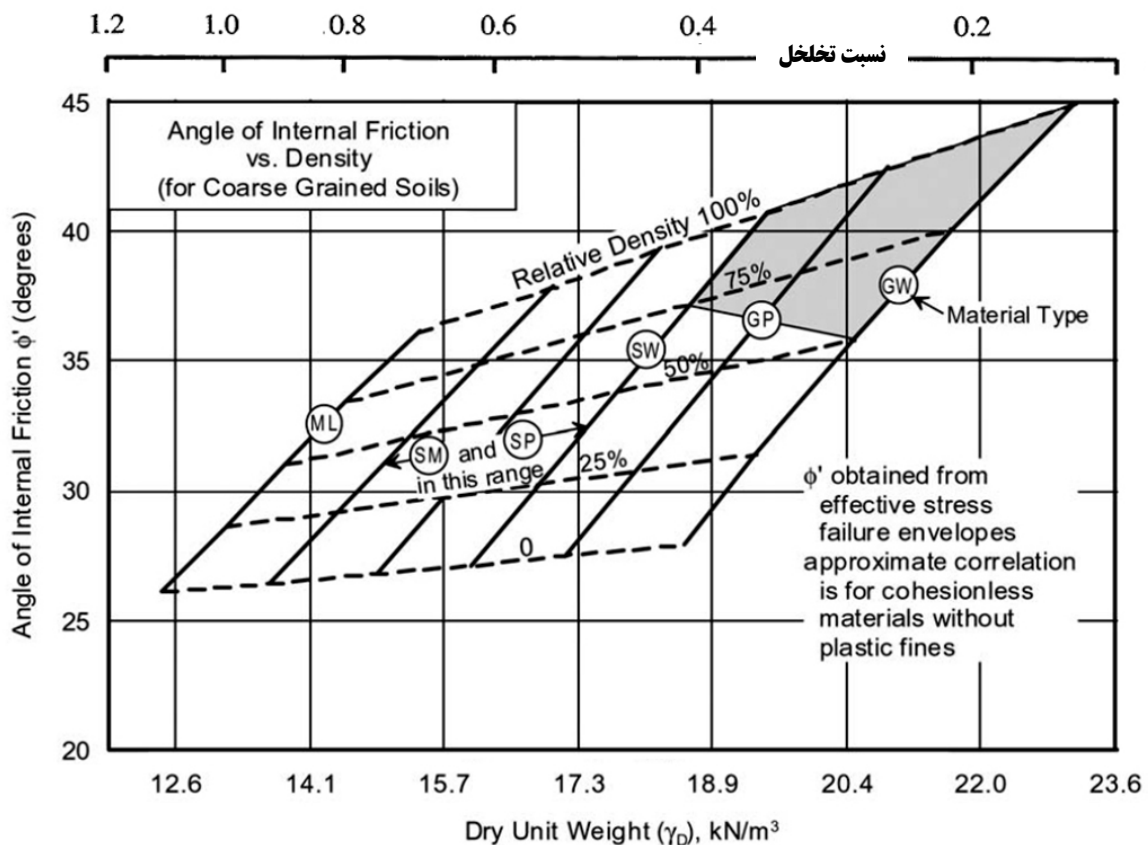


یک رابطه بین مقاومت برشی زهکشی شده و شاخص خمیری PI برای رس های عادی تحکیم و ریمولد در شکل ۱۲-۱۳ نشان داده شده است. در این شکل همچنین رابطه بین مقاومت برشی پسماند، زاویه اصطکاک داخلی و PI نشان داده شده است. ارتباط بین این پارامترها از آنجا ناشی می شود که هم PI و هم مقاومت برشی نشان دهنده ترکیب کانی شناختی خاک هستند، هرچه درصد کانی رسی افزایش یابد، PI افزایش یافته و مقاومت کاهش می یابد. به خاطر پراکندگی گسترده در نتایج آزمایشگاهی، تاکنون رابطه همبستگی پذیرفته شده است بین مقاومت برشی حداکثر رس های پیش تحکیم و PI ارائه نشده است.

همانطور که پیش تر گفته شد، مقاومت رس ها بر حسب تنش موثر اساساً بر مبنای اصطکاک ذرات قرار داد به طوری که $c' = 0$ است. این مسئله در تمام رس های اشباع حاکم است اما در رس های غیر اشباع که در نتیجه اثر مینیسک، ذرات جذب یکدیگر شده و با ایجاد تنش های بین ذره ای، یک مقدار چسبندگی ظاهری کوچک ایجاد می شود که البته خود این مسئله هم پدیده ای اصطکاکی است.

۱۳-۵-۳ مقاومت برشی خاک های دانه ای

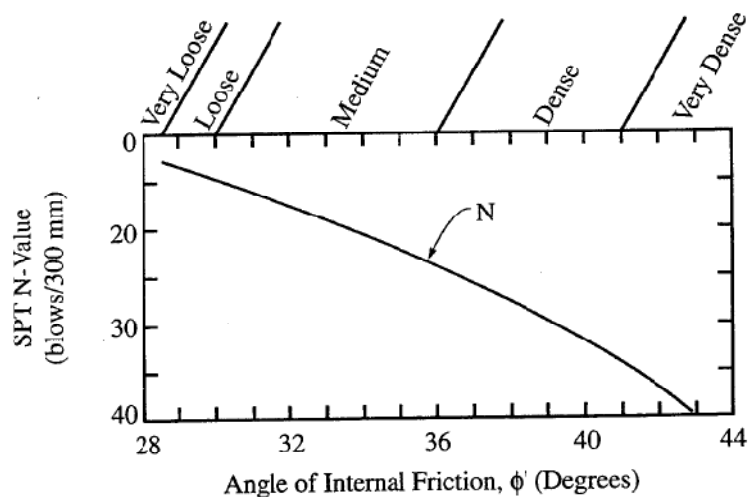
به خاطر نفوذپذیری بالا، هنگامی که خاک های دانه ای در معرض نیروی برشی قرار می گیرند، هیچگونه فشاری منفذی در آنها ایجاد نمی شود. بدین جهت پیچیدگی های مرتبط با تنش های کل و موثر دیگر وجود نداشته و پدیده های چسبندگی ظاهری یا مقاومت برشی زهکشی نشده رخ نمی دهد. در نتیجه مقاومت برشی خاک ها صرفاً بر حسب مقاومت اصطکاکی بین دانه ها تعریف می شود که این مقاومت بر حسب زاویه اصطکاک داخلی ϕ بیان می شود.



شکل ۱۳-۱۳ مقادیر معمول ϕ و تراکم خاک های غیر چسبنده
(NAVFAC, DM7.1, 1982; Kulhawy and Mayne, 1990)

مقادیر معمول ϕ برای ماسه ها و شن ها در شکل ۱۳-۱۳ ارائه شده است. یک رابطه همبستگی بین وزن مخصوص خشک یا تراکم نسبی و ϕ در شکل ۱۳-۱۳ ارائه شده است. در این شکل مصالح مختلف بر حسب سیستم طبقه بندی متحد USCS توصیف شده اند. پک و همکاران (۱۹۷۴) همبستگی بین عدد نفوذ استاندارد و زاویه اصطکاک داخلی ϕ خاک های دانه ای را مطابق شکل ۱۳-۱۴ پیشنهاد نموده اند. همبستگی بین مقادیر N و تراکم نسبی هم در این شکل نشان داده شده است به طوری که می توان مقادیر آنرا با شکل ۱۳-۱۳ مقایسه نمود. در ماسه های ریزدانه قرار گرفته در زیر تراز آب، مقادیر N باید با استفاده از شکل ۱۳-۱ برای اثر فشاری منفذی و اثر فشار سربار تصحیح شود.

بررسی شکل های ۱۳-۱۳ و ۱۴-۱۳ از توافق بین این همبستگی ها حکایت دارد. اما چنانکه در شکل ۱۳-۱۵ نشان داده شده به ازاء یک نوع خاک مشخص تغییرات مقادیر ϕ می تواند بسیار گسترده باشد. این شکل مقادیر ϕ را در برابر تراکم نسبی برای چندین نوع ماسه نمایش می دهد.



شکل ۱۳-۱۴ تخمین ϕ با استفاده از عدد نفوذ استاندارد (Peck, et al., 1974)

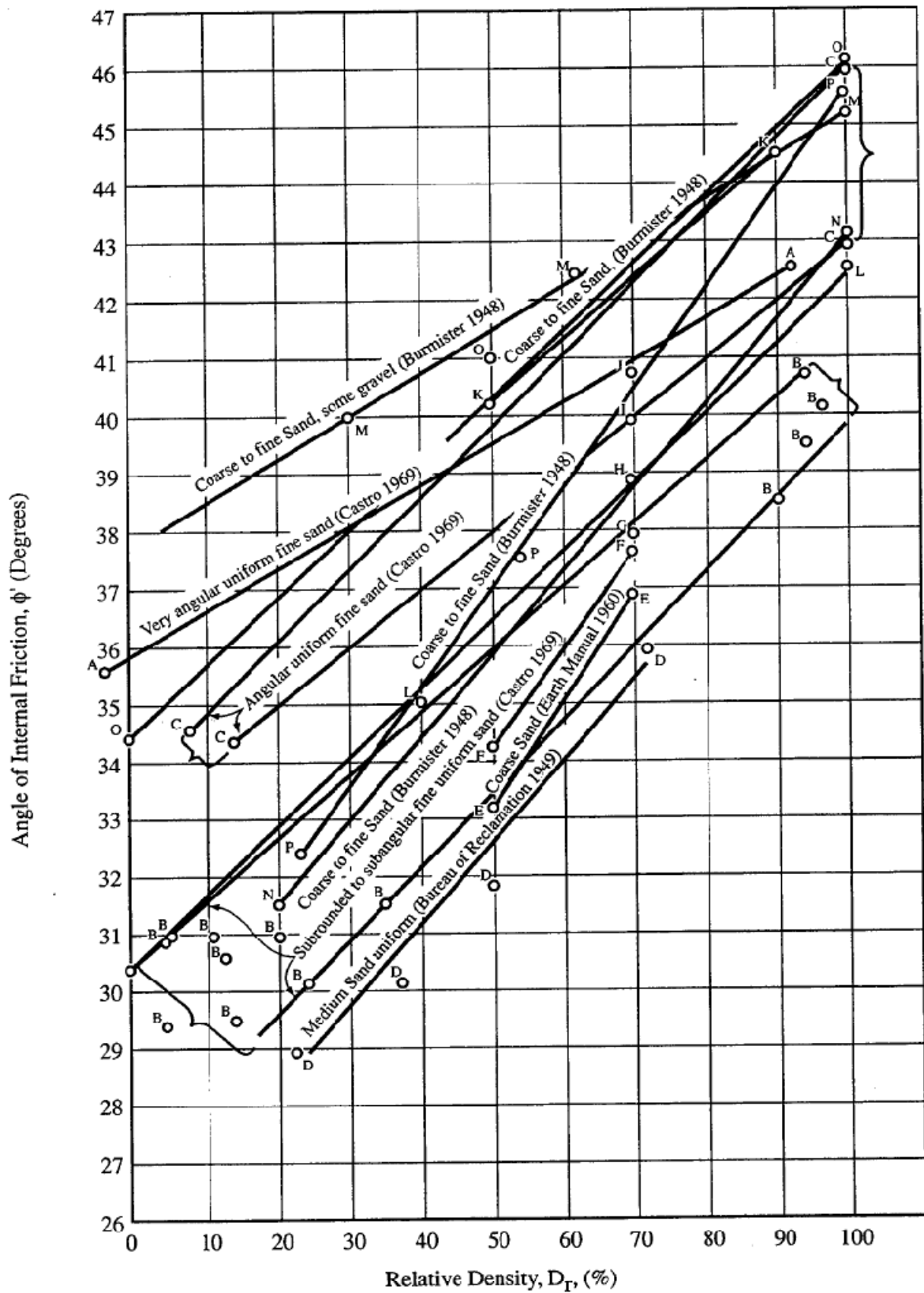
▪ ۱۳-۵-۴ مقاومت برشی خاک های تراکم یافته

مقادیر معمول مقاومت برشی خاک های تراکم یافته در جدول ۱۳-۱۳ ارائه شده است. این مقادیر مربوط به خاک های تراکم یافته تا حداکثر تراکم نسبی خشک در آزمایش تراکم استاندارد می باشد. برای محاسبه مقاومت برشی از آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده استفاده شده است.

جدول ۱۳-۱۳ مقاومت برشی موثر میانگین خاک های تراکم یافته (After Bureau of Reclamation)

Unified Classification	Soil Type	Standard Proctor Compaction (AASHTO T 99)		As Compacted Cohesion, c_o (kPa)	Saturated Cohesion, c_{sat} (kPa)	Friction Angle, ϕ (deg)
		Maximum Dry Density (kN/m^3)	Optimum Moisture Content (%)			
GW	well graded clean gravels, gravel-sand mixture	> 18.7	< 13.3	*	*	> 38
GP	poorly graded clean gravels, gravel sand mixture	> 17.3	< 12.4	*	*	> 37
GM	silty gravels, poorly graded gravel-sand-silt	> 17.9	< 14.5	*	*	> 34
GC	clayey gravels, poorly graded gravel-sand-clay	> 18.1	< 14.7	*	*	> 31
SW	well graded clean sands, gravelly sands	18.7±0.8	13.3±2.5	39±4	*	38±1
SP	poorly graded clean sands, sand-gravel mixture	17.3±0.3	12.4±1.0	23±6	*	37±1
SM	silty sands, poorly graded sand-silt mixture	17.9±0.2	14.5±0.4	51±6	20±7	34±1
SM-SC	sand-silt-clay with slightly plastic fines	18.7±0.2	12.8±0.5	50±21	14±6	33±4
SC	clayey sands, poorly graded sand-clay mixture	18.1±0.2	14.7±0.4	75±15	11±6	31±4
ML	inorganic silts and clayey silts	16.2±0.2	19.2±0.7	67±10	9±*	32±2
ML-CL	mixtures of inorganic silts and clays	17.1±0.3	16.8±0.7	63±17	22±*	32±3
CL	inorganic clays of low to medium plasticity	17.0±0.2	17.3±0.3	87±10	13±2	28±2
OL	organic silts and silty clays of low plasticity	*	*	*	*	*
MH	inorganic clayey silts, elastic silts	12.9±0.6	36.3±3.2	72±30	20±9	25±3
CH	inorganic clays of high plasticity	14.8±0.3	25.5±1.2	103±34	11±6	19±5
OH	organic clays and silty clays	*	*	*	*	*

The entry ± indicates 90 percent confidence limits of the average value, * denotes insufficient data, > is greater than, < is less than



شکل ۱۳-۱۵ رابطه بین ϕ و تراکم نسبی ماسه های مختلف (Hilf, 1975)

