

اصول همبستگی خصوصیات خاک و سنگ

در آزمونهای مهندسی ژئوتکنیک

مولفین : جای آمراتونگا

ناگراتنام سیواکوگان

براجا ام داس

مترجمین :

دکتر احد باقرزاده خلخالی

عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

مرتضی عسکری

عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان

محمد تقی پور اسماعیل گاوری

دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک



انتشارات دانشگاهی فرهنگ

نام کتاب: اصول همبستگی خصوصیات خاک و سنگ در آزمونهای مهندسی ژئوتکنیک

مؤلفین: جای آمراتونگا / ناگراتنام سیواکوغان / برآجا ام داس

مترجمین: دکتر احد باقرزاده خلخالی / مرتضی عسگری / محمد تقی پور اسماعیل گوری

تاریخ و نوبت چاپ: اول ۱۴۰۵

شمارگان: ۱۰۰ نسخه

بها: ۸۵۰۰۰۰۰ ریال

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۴۹۸۰-۸۶-۱

حق چاپ برای نشر دانشگاهی فرهنگ محفوظ می باشد

نشانی: تهران، خیابان انقلاب، روبروی دانشگاه تهران، پاساژ فروزنده، طبقه اول، پلاک ۴۱۹

تلفن: ۶۶۹۶۸۶۱۴ - ۶۶۴۱۰۶۸۸

WWW.FARBOOK.IR

Farbook.pub@gmail.com

سرشناسه	: آمراتونگا، جای
عنوان و نام پدیدآور	: Ameratunga, Jay
مشخصات نشر	: اصول همبستگی خصوصیات خاک و سنگ در آزمونهای مهندسی ژئوتکنیک/ مؤلفین جای آمراتونگا، ناگراتنام سیواکوغان، برآجا ام داس؛ مترجمین احد باقرزاده خلخالی، مرتضی عسگری، محمد تقی پور اسماعیل گوری، تهران: نشر دانشگاهی فرهنگ، ۱۴۰۵.
مشخصات ظاهری	: ۲۶۲ ص:، مصور، جدول.
شابک	: 978-622-4980-86-1 ۸۵۰۰۰۰۰ ریال
وضعیت فهرست نویسی	: فیا
پادداشت	: عنوان اصلی: Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering, 2016.
موضوع	: ساختمانسازی -- نظارت و اجرا Building -- Superintendence ساختمانسازی -- صنعت و تجارت -- مدیریت Construction industry -- Management پی سازی Foundations زمین شناسی مهندسی Engineering geology هیدرولیک Hydraulics مهندسی ژئوتکنیک Geotechnical engineering
شناسه افزوده	: سیواکوغان، ناگراتنام، ۱۹۵۶- م.
شناسه افزوده	: Sivakugan, N. (Nagaratnam), 1956-
شناسه افزوده	: داس، برآجا ام، ۱۹۴۱- م.
شناسه افزوده	: Das, Braja M., 1941-
شناسه افزوده	: باقرزاده خلخالی، احد، ۱۳۵۶-، مترجم
شناسه افزوده	: عسگری، مرتضی، ۱۳۵۸-، مترجم
شناسه افزوده	: پور اسماعیل گوری، محمد تقی، مترجم
رده بندی کنگره	: TH۴۲۸
رده بندی دیویی	: ۶۹۰/۰۶۸
شماره کاتالوگ ملی	: ۱۰۵۲۵۳۹۷
اطلاعات رگورد کتابشناسی	: فیا

مقدمه:

صنعت ساختمان و ابنیه بدون دستیابی به خصوصیات مهندسی بستر خاکی یا سنگی پروژه‌های عمرانی؛ از مرحله طراحی و اجرا تا مرحله مقاوم‌سازی و پایش، امکان گسترش و بهینه‌سازی را نخواهد داشت. لذا در سال‌های متمادی، محققین و دانشمندان رشته مهندسی عمران بویژه با گرایش‌های ژئوتکنیک، تلاش نموده‌اند روش‌ها، ابزارآلات، آزمون‌ها و دستگاه‌های نوین و کاربردی را به منظور ارتقاء فرایند تعیین خصوصیات مکانیکی و فیزیکی-شیمیائی مصالح خاکی و سنگی ارائه نمایند. به موازات این تلاش‌های علمی و تخصصی؛ همواره مسیر دیگری با هدف ارائه اصول و روابط همبستگی به منظور پیش‌بینی خصوصیات مهندسی مجهول بستر به کمک پارامترهای مهندسی در دسترس نیز مطرح بوده و همچنان تلاش‌های متعددی در این راستا در گسترده بین‌المللی انجام می‌پذیرد. مجلد حاضر نیز بخشی از این تلاش‌های تخصصی و علمی است.

در تدوین مجلد حاضر، نویسندگان سعی نموده‌اند با بهره‌گیری از ترجمه متون و کتب علمی و تخصصی ژئوتکنیکی در زمینه اصول و روابط همبستگی به کمک آزمون‌های ژئوتکنیکی؛ فرایند تعیین پارامترهای مجهول بر پایه خصوصیات مهندسی در دسترس و معلوم را هموار نمایند. طبیعتاً در مراحل طراحی پروژه‌ها، در بسیاری از موارد و با بهره‌گیری از این روابط همبستگی، می‌توان امکان‌سنجی و یا توجیه‌پذیری گزینه‌ها را مورد بررسی و تصمیم‌گیری قرار داد و البته برای طراحی در مراحل نهائی و بر پایه جزئیات، همچنان بهره‌مندی از آزمون‌ها و شیوه‌های دقیق‌تر می‌تواند مکمل نهائی باشد. در این مجلد سعی گردیده، ضمن بهره‌گیری از متون علمی، از نگارش مشابه صنعت آزمایشگاهی و تخصصی استفاده شود؛ تا از نظر کاربردی نیز قابل بهره‌برداری باشد.

ضمن آرزوی توفیق و پیشرفت روزافزون برای مخاطبان گرامی، بهره‌مندی از نظرات تکمیلی و پیشنهادهای فنی خوانندگان و مخاطبان گرامی برای ارتقاء مجلد حاضر در چاپ‌های آتی، مزید امتنان خواهد بود.

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه	۵
فصل دوم : روابط همبستگی برای پارامترهای آزمون های آزمایشگاهی	۱۶
فصل سوم : روابط همبستگی برای پارامترهای آزمون های آزمایشگاهی	۵۸
فصل چهارم : آزمایش نفوذ استاندارد	۹۴
فصل پنجم : آزمایش نفوذ مخروط	۱۲۰
فصل ششم : آزمایش پرسیومتر	۱۶۲
فصل هفتم : آزمایش دیلانومتر	۱۸۳
فصل هشتم : آزمایش برش پره	۱۹۲
فصل نهم : آزمایش های سنگ	۲۰۵

فصل اول : مقدمه

مهندسی ژئوتکنیک درباره خاک و سنگ، اعم از خصوصیات، رفتار و اثرات آنها بر طراحی و اجرا بحث می کند. مهندسی ژئوتکنیک طیف وسیعی از مهندسی عمران، شامل شیب ها، پی ها، خاکریزها و سیل بندها، دیوارهای نگهبان، نیلینگ خاک، آنکراژ، خاکبرداری ها و خاکریزی ها و مواردی که در ادامه می آید را شامل می شود. به عنوان مهندسین ژئوتکنیکی، اهداف اصلی ما درک رفتار خاک و سنگ بوده و تهیه توصیه مناسبی برای کنترل و جلوگیری از خطرات ژئوتکنیکی مرتبط با هر پروژه ای در مقیاس کوچک و بزرگ است. چنین توصیه ای بستگی به استخراج پارامترهای مورد نیاز برای ارزیابی، تحلیل و حل مسائل مورد استفاده در ابزارهای ذیل دارد:

۱- آزمایش های آزمایشگاهی

۲- آزمایش های درجا

۳- آزمون ها و یا پایش در طول اجرا

این کتاب ابتدا دو آیتم لیست شده فوق را پوشش می دهد.

زمانیکه در خصوص آزمایش های ژئوتکنیکی بحث می شود، بیان کردن اینکه آزمایش های صحرایی مناسب تر است یا آزمایش های آزمایشگاهی، مشکل است، زیرا بستگی به خاص بودن پروژه و محدودیت های آن و همچنین اهداف توسعه آن دارد.

۱-۱- آزمایش های آزمایشگاهی

انجام آزمون های آزمایشگاهی وابستگی مستقیم به نمونه گیری و امکان تهیه و انتقال نمونه های خاکی و سنگی مورد نیاز دارد. بسته به آزمایش آزمایشگاهی؛ نمونه های دست خورده، حجمی و یا نمونه های دست نخورده مورد نیاز خواهد بود. در اکثر تحقیقات ژئوتکنیکی ترکیبی از آزمایش های درجا و آزمایشگاهی برای ارزیابی خصوصیات خاک به کار برده می شود. در حالیکه بعضی ها نسبت به یکی یا دیگری ممکن است تعصب داشته باشند، یک مهندس ژئوتکنیک بامنطق اهداف شناسایی و مصالحی که برخورد شده و یا احتمالاً برخورد می شوند را قبل از تعیین آزمایش-هایی که در رسیدن به اهداف برای ارائه توصیه ژئوتکنیکی صحیح کمک خواهند کرد را ارزیابی می کند. مزایا و محدودیت های آزمایش های آزمایشگاهی به صورت زیر خلاصه می شود (اصلاح شده توسط Jamiolkowski و همکاران ۱۹۸۵).

مزایای آزمایش های آزمایشگاهی

- شرایط مرزی به خوبی تعریف می شود.
- شرایط زهکشی کاملاً کنترل می شود.

- مسیرهای تنش قبل و حین آزمایش انتخاب و به خوبی تعریف می‌شود.
- اصولاً کرنش یکنواخت نگه داشته می‌شود.
- بافت و خصوصیات فیزیکی خاک، یقیناً شناسایی شده است.
- در صورتیکه نمونه خاک کافی موجود باشد، آزمایش‌های متعددی می‌توان انجام داد. این موضوع در تصدیق نتایج غیرعادی/غیرمنتظره یک آزمایش، سودمند خواهد بود.

محدودیت‌های آزمایش‌های آزمایشگاهی

- در خاک‌های چسبنده، اثرات دست‌خوردگی نمونه اجتناب‌ناپذیر بوده و عملاً ارزیابی نمونه‌های دست‌نخورده به اصطلاح "با کیفیت" نیز مشکل است.
- عملاً نمونه‌گیری دست‌نخورده از خاک‌های غیرچسبنده همچنان یک مسأله حل نشده می‌باشد.
- حجم کوچک نمونه‌های آزمایشگاهی، اغلب قادر به ترکیب کردن وجود ماکروساختار و ناهمگنی طبیعت نهشته‌های خاک نیست (Row ۱۹۷۲). این مسأله منجر به ایجاد شک و تردید در توسعه رفتار توده بزرگی از خاک محل می‌شود که می‌تواند به طور موفقیت‌آمیزی به وسیله آزمایش‌های آزمایشگاهی کوچک مقیاس مدل شود.
- هنوز شناخت عواملی که باعث تشکیل صفحه برشی در طول آزمایش نمونه‌های آزمایشگاهی می‌شوند، به صورت خیلی ضعیفی ادراک شده است. این مسأله باید مورد تاکید قرار گیرد که برای صفحه برشی توسعه یافته، تغییر شکل‌ها در طول این صفحه متمرکز یافته و تغییر مکان‌ها و تنش‌های اندازه‌گیری شده در مرزهای نمونه تابعی از رفتار تنش کرنش مصالح آزمایش شده نخواهند بود.
- اصولاً طبیعت ناپیوسته اطلاعات فراهم شده از آزمایش‌های آزمایشگاهی ممکن است منجر به مدلسازی غلطی از رفتار توده بزرگی از خاک گردد.
- به‌طور کلی شناسایی خاک بر مبنای آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده بر روی نمونه‌های به‌دست آمده از گمانه‌زنی، احتمالاً گران‌تر و طولانی‌تر از شناسایی‌های به‌دست آمده از تکنیک‌های آزمایشگاهی درجا خواهد بود.
- برای بعضی از آزمایش‌های آزمایشگاهی، خطای آزمایشگر می‌تواند تأثیر مهمی بر نتایج نهایی داشته باشد.

۱-۲- آزمایش های درجا

انواع زیادی از آزمایش های درجا وجود دارد، طوریکه بعضی ها برای مصالح چسبنده مناسب تر بوده و بعضی های دیگر برای مصالح غیرچسبنده مناسب تر هستند. در اغلب موارد امکان ارزیابی احتمالی مصالح خاکی مورد انتظار برای انتخاب مناسب ترین آزمایش تا قبل از آغاز شناسایی وجود ندارد.

Table 1.1 Applicability and usefulness of in situ tests

Group	Device	Soil parameters										Ground type									
		Soil type	Profile α	ϕ^1	c_u	I_D	m_v	c_v	k	G_v	σ_h	OCR	$\sigma - \epsilon$	Hard Rock	Soft Rock	Gravel	Sand	Silt	Clay	Peat	
Penetrometers	Dynamic	C	B	-	C	C	-	-	C	-	C	-	-	-	C	B	A	B	B	B	
	Mechanical	B	A/B	-	C	C	B	C	-	C	C	-	-	-	C	C	A	A	A	A	
	Electric (CPT)	B	A	-	C	B	A/B	C	-	B	B/C	B	-	-	C	C	A	A	A	A	
	Pneumatic (CPTU)	A	A	A	B	B	A/B	A/B	B	B	B/C	B	C	-	C	-	A	A	A	A	
	Seismic (SCPT)	A	A	A	B	A/B	A/B	A/B	B	A	B	B	B	-	C	-	A	A	A	A	
	SCPTU																				
Pressuremeters	Flat Dilatometer (DMT)	B	A	C	B	B	C	B	-	B	B	B	C	C	C	-	A	A	A	A	
	Standard Penetration Test (SPT)	A	B	-	C	C	B	-	-	C	-	C	-	-	C	B	A	A	A	A	
	Resistivity Probe	B	B	-	B	C	A	C	-	-	-	-	-	-	C	-	A	A	A	A	
	Pre-Bored (PBP)	B	B	-	C	B	C	B	C	-	B	C	C	C	A	B	B	B	A	B	
	Self boring (SBP)	B	B	A	B	B	B	A	B	A ²	A/B	B	A/B ²	-	B	-	B	B	A	B	
	Full displacement (FDP)	B	B	-	C	B	C	C	C	-	A ²	C	C	C	-	C	-	B	B	A	A
Others	Vane	B	C	-	-	A	-	-	-	-	-	B/C	B	-	-	-	-	-	A	B	
	Plate load	C	-	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B	A	B	B	A	A	A	
	Screw plate	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	-	-	-	A	A	A	A	
	Boothole permeability	C	-	A	-	-	-	B	A	-	-	-	-	A	A	A	A	A	A	B	
	Hydraulic fracture	-	-	B	-	-	-	C	C	-	B	-	-	B	B	-	-	C	A	C	
	Crosshole/downhole/surface seismic	C	C	-	-	-	-	-	-	A	-	B	-	A	A	A	A	A	A	A	

Applicability: A = High, B = Moderate, C = Low, - = None

¹ = only when pore pressure sensor fitted, ² = only when displacement sensor fitted * ϕ^1 = will depend on soil type

Soil parameter definition: α = in situ pore pressure; ϕ^1 = effective internal friction angle, c_u = undrained shear strength, m_v = coefficient of volume compressibility

c_v = coefficient of consolidation, k = coefficient of permeability, G_u = shear modulus at small strains, OCR = over consolidation ratio σ_h = horizontal stress

$\sigma - \epsilon$ = stress-strain relationship, I_D = density index

همان طور که در جدول ۱-۱ نشان داده شده، Lunne و همکاران (۱۹۹۷) آزمایش های درجای مختلف را در عمل و زمان خلاصه بندی کرده اند و روش ها را بر مبنای قابلیت کاربرد و مناسب بودن آنها در استخراج پارامترهای مختلف طراحی در انواع مختلف مصالح طبقه بندی کردند.

پس از انتشار این جدول پیشرفت هایی حاصل شده است، به ویژه در آزمایش های پیزوکن و دیلاتومتر که بعداً در این کتاب پوشش داده می شوند. مزایا و محدودیت های آزمایش های درجا به صورت زیر می تواند خلاصه شود (اصلاح شده توسط Jamiolkowski و همکاران ۱۹۸۵).

مزایای آزمایش های درجا

- ✓ در مقایسه با اکثر آزمایش های آزمایشگاهی، حجم بیشتری از خاک مورد آزمایش قرار می گیرد، از این رو اصولاً آزمایش های درجا در تعیین خصوصیات خاک ها اثر ماکروساختاری خاک را با دقت بیشتری منعکس می کند.
- ✓ تعدادی از آزمایش های درجا رکوردهای پیوسته ای از خصوصیات خاک را ثبت می کند که این امر در تعیین مرز لایه ها و ماکروساختار خاک ها به کار می رود.
- ✓ در نهشته های خاکی که در آن نمونه برداری دست نخورده غیرممکن و یا غیرقابل اطمینان باشد، آزمایش های درجا می تواند انجام می شود. مثال هایی از این خاک ها عبارتند از: خاک های غیرچسبنده، خاک های با ماکروساختار توسعه یافته، خاک های با لایه بندی شدید و یا خاک های ناهمگن و رس های با درز و ترک زیاد.
- ✓ خاک ها در محیط طبیعی خودشان آزمایش می شوند درحالی که ممکن است در آزمایش های آزمایشگاهی خاک محفوظ باقی نماند. برای مثال، اکثر تلاش های موفقیت آمیز در اندازه گیری تنش های کل افقی درجای اولیه، با پیشرفت هایی است که اخیراً در تکنیک های درجا حاصل شده است، به عنوان نمونه پرسیمتر خودخفار، دیلاتومتر تخت، تیغه دنداندار Iowa.
- ✓ بعضی از آزمایش های درجا در مقایسه با شناسایی های صورت گرفته بر مبنای آزمایش های آزمایشگاهی، نسبتاً ارزان هستند.
- ✓ به عبارت کلی تر، اکتشافات صورت گرفته به وسیله تکنیک های درجا زمان کمتری را در مقایسه با اکتشافات صورت گرفته بر مبنای آزمایش های آزمایشگاهی، مصرف می کند.

✓ نتایج به دست آمده از آزمایش‌های درجا به راحتی در دسترس بوده و در مقایسه با تحویل نمونه به آزمایشگاه و انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی با حداقل تأخیر قابل تفسیر هستند. این موضوع زمانیکه محل آزمایش در فاصله دورتری از آزمایشگاه باشد، اهمیت زیادی خواهد داشت.

محدودیت‌های آزمایش‌های درجا

- تعریف شرایط مرزی به لحاظ تنش‌ها و یا کرنش‌ها به استثنای پرسیومتر خودحفار، ضعیف بوده و تفسیر آزمایش‌های درجا بسیار مشکل است.
- شرایط زهکشی در طول آزمایش‌ها به طور کلی ناشناخته بوده و در صورتی که مشخصات خاک بر مبنای رفتار زهکشی نشده، زهکشی شده و یا جزئی زهکشی شده باشد، با یک عدم قطعیت مواجه خواهد بود. در این رابطه برنامه‌ریزی صحیح در آزمایش‌های نفوذ مخروط و آزمایش‌های پرسیومتر خودحفار (همراه با اندازه‌گیری‌های فشار حفره‌ای)، می‌تواند در به حداقل رساندن مشکل کمک کنند.
- درجه دست‌خوردگی ایجاد شده در اثر نفوذ ابزار در داخل زمین و به طور کلی تأثیر آن بر نتایج آزمایش زیاد بوده (به استثنای پرسیومتر خودحفار) لیکن مقدار آن نامعلوم می‌باشد.
- به طور کلی مدهای تغییر شکل و گسیختگی که بر خاک اطراف تحمیل می‌شود، متفاوت از سازه‌های مهندسی عمران می‌باشد؛ به عنوان مثال در آزمایش پره صحرایی، آنها اغلب به طور صحیح تشکیل نمی‌شوند.
- میدان تنش غیر یکنواخت بوده و نرخ‌های کرنش بیشتر از مقادیری است که در آزمایش‌های آزمایشگاهی یا مقادیر مورد انتظار در فونداسیون سازه‌ها، اعمال می‌شود.
- به جزء آزمایش نفوذ استاندارد که اجازه برداشتن نمونه‌ها را می‌دهد، در آزمایش‌های درجا طبیعت خاک مورد آزمایش، مستقیماً شناخته نمی‌شود.

این کتاب فقط بر روی تعداد کمی از آزمایش‌های درجای منتخب متمرکز می‌شود که اعتقاد فنی و تخصصی بر استفاده بیشتر آنها نسبت به دیگر آزمایش‌ها می‌باشد. این آزمایش‌ها شامل:

- آزمایش نفوذ استاندارد،
- آزمایش نفوذ مخروط،
- آزمایش پرسیومتر،
- آزمایش دیلاتومتری و
- آزمایش برش پره.

خلاصه‌ای از مزایا و محدودیت‌های مرتبط با این آزمایش‌ها در جدول ۲-۱ نشان داده شده است (اصلاح شده توسط Becker, ۲۰۰۱).

جدول (۲-۱) خلاصه مزایا و محدودیت‌های آزمون‌های منتخب

مزایا	محدودیت‌ها	آزمایش
■ آزمایش استاندارد شده با اساس قوی، ارزان قیمت ■ امکان انجام در محدوده وسیعی از خاک‌ها ■ تهیه نمونه (نمونه‌گیر شکافدار) ■ سالیان طولانی به طور وسیع استفاده شده و داده‌ها و روابط زیادی برای اکثر خصوصیات خاک وجود دارد. ■ اساس طراحی پی‌ها و ارزیابی روانگرایی خاک‌ها می‌باشد.	- متأثر از دست‌خوردگی گمانه، از قبیل رگاب، تورم و آزادسازی تنش - متأثر از تجهیزات حفاری، راندمان انرژی و اپراتور - نتایج متأثر از اندازه دانه‌ها، ساختار خاک و تاریخچه تنش است. - روابط زیادی برای تفسیر و طراحی مورد نیاز است.	آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)
■ آزمایش استاندارد شده با اساس قوی و کاربری آسان ■ پروفیل پیوسته‌ای از خاک را فراهم می‌کند. ■ آزمایش نسبتاً سریعی بوده و در یک روز تعداد زیادی قابل انجام است. ■ نیازی به گمانه نداشته مگر در مواردی که با انسداد مواجه شود. ■ اگر به‌طور صحیح انجام شود، نتایج آزمایش دقیق و تکرارپذیر خواهد بود.	- نامناسب برای مصالح با اندازه-های درشت که در برابر نفوذ مقاومت می‌کنند. برای خاک-های ریزدانه و یکنواخت مناسب‌تر است. - نفوذ در خاک‌های خیلی متراکم یا مصالح سخت، آسان نیست. - مشکلاتی که می‌تواند در اثر کماتش میله در مواجهه ناگهانی با مصالح سخت در زیر خاک-های نرم به‌وجود آید.	آزمایش نفوذ پی‌زکن (CPTu)

- برای فراهم شدن مقاومت و داده‌های سختی خاک، احتیاج به کالیبراسیون با آزمایش‌های دیگر دارد. - هیچ نمونه‌ای فراهم نمی‌شود. - ابزارها نسبتاً گران است.	▪ اندازه‌گیری‌های مختلف باعث ارتقای فرایند تفسیر می‌شود. ▪ به‌طور فزاینده‌ای در ارزیابی روانگرایی خاک‌ها مورد استفاده واقع می‌شود. ▪ روابط زیادی برای اکثر خصوصیات خاک و کاربردهای طراحی در دسترس می‌باشد. ▪ پرهیز از اثرات دست‌خوردگی مرتبط با گمانه	
- هیچ نمونه‌ای فراهم نمی‌شود و نتایج می‌بایست توسط داده‌های مقاومتی دیگر پشتیبانی شوند. - پیچیده، نسبتاً گران و ابزارها نیاز به اپراتورهای مجرب و ماهر دارد. - آزمایش زمان‌بر بوده و نسبت به آزمایش‌های دیگر مثل CPTu پیوستگی کمتری دارد. - نتایج متأثر از پروسه آزمایش بوده و روش تفسیر بااهمیت می‌باشد؛ طوریکه روش‌های مختلف تفسیر نتایج متفاوتی ارائه می‌کند.	▪ منجر به استخراج منحنی تنش کرنش شده و صرفاً یک پارامتر یا یک خصوصیت مهندسی حاصل نمی‌شود. ▪ شرایط مرزی به‌خوبی تعریف و کنترل می‌شود. آزمایش در کرنش‌های کوچک و بزرگ انجام می‌شود. ▪ پرسیومتر خودحفرار توانایی ورود در خاک-های مناسب با حداقل دست‌خوردگی و اجتناب از اثرات آزادسازی تنش را دارد. ▪ برای تعیین تنش‌های افقی درجا مناسب است. ▪ استفاده از سیکل‌های بارگذاری- باربرداری باعث کاهش اثرات گمانه و دست‌خوردگی و در نتیجه ارتقای کار تفسیر می‌شود. ▪ روابط برای خصوصیات مهم خاک و کاربردهای طراحی در دسترس می‌باشد.	آزمایش پرسیومتر و پرسیومتر خودحفرار

- برای پرسومتر نوع منارد و بعضی از خاکها احتیاج به گمانه است. - اثرات دستخوردگی و آزادسازی تنش بایستی مورد توجه قرار گرفته و در محاسبات در نظر گرفته شود.		
- برای خاکهای با ذرات بزرگ یا خاکهای خیلی متراکم یا سخت و با نفوذ سخت در حالت بدون گمانه، نامناسب است. - نمونه‌ای فراهم نمی‌شود. - روش‌های مختلف تفسیر، نتایج مختلفی را به دست می‌دهد. - آزمایش زمان‌بر بوده و پیوستگی کمتری نسبت به آزمایش‌هایی مثل CPTu دارد. - در طول آزمایش کرنش‌های محدودی اعمال می‌شود و لذا نتایج برای رفتارهای با کرنش زیاد مناسب نیست.	■ آزمایش استاندارد شده آسان با اساس قوی، با استفاده از تجهیزات آزمایشات دیگر به آسانی قابل انجام است. ■ عموماً نتایج تکرارپذیر هستند. ■ اجتناب از اثرات دستخوردگی گمانه ■ روابط برای خصوصیات مهم خاک و کاربردهای طراحی در دسترس می‌باشد. ■ آزمایش مناسبی برای تفسیر تنش‌های افقی درجا و تغییر شکل‌ها در کرنش‌های کوچک است.	آزمایش دیلاتومتر (DMT)
- عموماً محدود به رس‌هایی است که مقاومت برشی آنها کمتر از ۱۵۰ کیلوپاسکال است.	■ آزمایش استاندارد شده ساده با اساس قوی که به آسانی قابل انجام است. ■ اندازه‌گیری مستقیم مقاومت برشی	

آزمایش برش پره (VST)	▪ تنها آزمایش درجایی که مقاومت پسماند را به صورت مستقیم اندازه گیری می کند. ▪ در بعضی موارد نیازی به گمانه نبوده، لیکن نیاز به اندازه گیری یا حذف اصطکاک میله دارد.	- برای اکثر خاک ها مناسب نیست. - نتایج متأثر از لایه های ماسه-ای/سیلتی و همچنین دانه های شنی است. - عموماً نیاز به اصلاحاتی دارد. - نتایج در بعضی از خاک ها ممکن است گمراه کننده باشد(همانند لای ها). - مقاومت برشی را در جهت افقی ارائه می دهد. - در خاک های درز و ترک دار ممکن است مقاومت واقعی را ارائه نکند. - برای مصالح با ذرات بزرگ که در برابر نفوذ مقاومت می کند، نامناسب است؛ برای خاک های با دانه بندی ریز و یکنواخت مناسب تر است.
-------------------------------------	--	---

۳-۱- روابط تجربی

از آنجائیکه آزمایش های درجا و آزمایش های آزمایشگاهی بر روی نمونه هایی که در طول تحقیقات صحرایی بازیابی می شوند لذا دو روش مرجع برای تعیین پارامترهای طراحی در مهندسی ژئوتکنیکی نتیجه می دهد که هزینه قابل توجهی در این ارتباط وجود دارد. در مراحل مقدماتی همانند مطالعات امکان سنجی، وقتی که بودجه های محدودی برای اکتشاف خاک وجود داشته باشد، روابط تجربی با ارزش خواهند بود. برای مثال می توان با ایده مناسبی و با هزینه کم یا بدون صرف هزینه زیاد به ویژگی های تحکیمی و مقاومتی خاک رس دست یافت.

در مهندسی ژئوتکنیک، روابط تجربی نقش بزرگی را ایفاء می‌کنند. به‌علاوه برای تخمین‌های اولیه، روابط می‌تواند در مقایسه مقادیر به‌دست آمده از آزمایشگاه و آزمایش‌های درجا کمک کند. معادلات تجربی و گراف‌های زیادی در ادبیات تحقیق وجود دارد که بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی یا صحرایی، تجربیات گذشته و قضاوت مناسب به‌دست آمده‌اند و به‌طور منظم و گسترده‌ای در طراحی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

امروزه در ارتش، نیروی دریایی و نیروی هوایی ایالات متحده، فعالیت‌های مهندسی در سطح عالی انجام و سرمایه‌گذاری قابل توجهی در تحقیق و توسعه انجام می‌گیرد. در اکثر دستنامه‌های طراحی از معادلات تجربی و چارت‌هایی که به‌درستی استخراج و آزمایش شده‌اند، استفاده می‌شود. دستنامه‌ها عموماً محافظه‌کارانه بوده که چیز بدی در مهندسی نیست. اکثر این دستنامه‌ها در دسترس بوده و قابل دالود هستند. دستنامه‌ها (به عنوان مثال NAVFAC ۷.۱) در کتاب‌خانه حرفه‌ای شما مراجع با ارزشی هستند.

دستنامه مهندسی پی کانادا، دستنامه طراحی قابل اعتنایی است که در کانادا مورد استفاده قرار می‌گیرد. Kulhawy (۱۹۹۰) and Mayne بر اساس داده‌های زیادی، گزارش خوبی را منتشر کردند که در آن نگاه دقیقی به روابط تجربی مختلف و چارت‌ها داشته است. آنها با ارائه روابط و ساده‌سازی‌ها خودشان را مطرح و در میان مهندسين عملی کاملاً مورد پذیرش قرار گرفتند.

داده‌های آزمایشگاهی فراهم شده از صحرا یا آزمایشگاه می‌توانند کاملاً گران باشند. ما اغلب داده‌های صحرایی محدودی (همانند SPT) را از تعداد کمی گمانه، به‌همراه تعدادی داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده از نمونه‌های فراهم شده از گمانه‌ها و چاهک‌های آزمایشی در دسترس داریم. ما به صورت معقولانه‌ای از روابط تجربی برای استخراج حداکثر اطلاعات ممکن از داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی محدود و هزینه‌بر استفاده می‌کنیم.

۴-۱- مطالب کتاب

اهداف اصلی این کتاب ارائه روابط مرسوم مورد استفاده توسط مهندسان ژئوتکنیکی برای ارزیابی پارامترهای مهم طراحی در فعالیت‌های طراحی ژئوتکنیکی است. مواقعی که هیچ داده‌ای موجود نباشد و یا داده‌های ضعیفی از خاک یا سنگ موجود باشند و یا آزمایش‌های محدودی انجام شده باشد، چنین روابطی ممکن است تنها ابزار در دسترس طراح باشد. در بعضی مواقع به‌دلیل اینکه اهداف بااهمیت نبوده و ریسک‌ها یا فرصت‌ها کم هستند انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی یا درجای پیچیده و گران، به سادگی عملیاتی نیستند. در مواردی، روابط به عنوان ارزیابی منطقی پارامترهای طراحی به دست آمده، لازم می‌باشد. عموماً در مرحله طراحی مفهومی یک پروژه، در صورتی که داده‌های تحقیقات محلی در دسترس نبوده و یا محدود باشند، اکثر دست‌اندرکاران با استفاده از روابط و مقادیر نمونه‌ای فرایند طراحی‌های بویژه اولیه را پیش می‌برند.

فصل دوم نگاه کلی به خصوصیات ژئوتکنیکی رایج مورد استفاده در تحلیل و طراحی‌ها، تعاریف اساسی از اصطلاحات مکانیک خاک و نسبت‌های فازی دارد. در فصل سوم، آزمایش‌های آزمایشگاهی مورد نیاز برای تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها و روابط تجربی مرتبط با پارامترهای مختلف بحث می‌شود.

فصل چهارم به آزمایش نفوذ استاندارد، معروف به آزمایش SPT، اختصاص یافته است، آزمایش SPT آزمایش ساده‌ای بوده لیکن داده‌های بسیار مفیدی از مقاومت خاک که بیانگر استحکام و سختی خاک است را ارائه می‌کند، همچنین پارامترهای ژئوتکنیکی دیگری را ارائه می‌کند.

فصل پنجم آزمایش نفوذسنج مخروط (CPT) را توصیف می‌کند که امروزه به دلیل آسانی و سرعت آزمایش، به طور فزاینده‌ای توسط دست‌اندرکاران استفاده می‌شود. آزمایش CPT، آزمایش روتینی در تحقیقات صحرایی بوده و به طور گسترده‌ای در تعیین مشخصات رس‌ها و ماسه‌ها استفاده می‌شود.

در فصل ششم آزمایش پرسیومتر توصیف شده و به کاربرد آن در تعیین پارامترهای طراحی ژئوتکنیکی با استفاده از روابط استاندارد به دست آمده، می‌پردازد. به دلیل انجام این آزمایش در رس‌های نرم تا سنگ‌های ضعیف، در بین آزمایش‌های درجا منحصر به فرد است. در فصل هفتم آزمایش دیلاتومتر توصیف شده که در آن به اندازه‌گیری‌های آزمایش و روش‌های تعیین پارامترهای طراحی و نوع خاک پرداخته می‌شود. فصل هشتم آزمایش برش پره را پوشش می‌دهد که اکثراً برای خاک‌های رسی نرم تا سخت به کار می‌رود.

فصل نهم یعنی آخرین فصل به سنگ‌ها اختصاص داده شده که در آن به مباحثی از قبیل مفاهیم خصوصیتی سنگ‌ها، آزمایش‌های مختلفی که بر نمونه‌های سنگ بکر انجام می‌شود و روابطی که در تخمین خصوصیتی سنگ بکر و توده سنگ مادر می‌تواند استفاده شود، پرداخته می‌شود.

فصل دوم

روابط همبستگی برای پارامترهای آزمون‌های آزمایشگاهی

این فصل مروری خلاصه بر خصوصیات ژئوتکنیکی، که به‌طور معمول در آزمایش تعیین می‌شوند و رابطه آنها در مکانیک خاک و تست‌های آزمایشگاهی برای تعیین آنها را ارائه می‌دهد. خصوصیات مورد نظر شامل حدود اتربرگ، انواع وزن مخصوص، توزیع اندازه دانه‌ها، نفوذپذیری و پارامترهای مرتبط با تحکیم و مقاومت برشی را شامل می‌شود. آزمایش‌های مورد نیاز برای تعیین این پارامترها نیز بحث شده‌اند. اطلاعات موجود در این فصل، زمینه‌ی لازم برای فهم همبستگی‌های تجربی مربوط به پارامترهای مختلف اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه را فراهم می‌نماید.

کلمات کلیدی: خصوصیات خاک، پارامترهای طراحی، مکانیک خاک، نفوذپذیری، تحکیم، مقاومت برشی

این فصل مروری خلاصه بر خصوصیات ژئوتکنیکی، که به‌طور معمول در آزمایشگاه تعیین می‌شوند و رابطه آنها در مکانیک خاک و تست‌های آزمایشگاهی برای تعیین آنها را ارائه می‌دهد و زمینه لازم برای فصل سوم را که همبستگی‌های تجربی مربوط به پارامترهای مختلف اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه را پوشش می‌دهد. برای فهم عمیق اصول مکانیک خاک، خواننده به مراجع مهندسی ژئوتکنیک ارجاع داده می‌شود. روشهای تست آزمایشگاهی در برخی مراجع تخصصی مانند Das (۲۰۰۹)، Sivakugan (۲۰۱۱) و غیره با جزئیات مناسبی پوشش داده شده است.

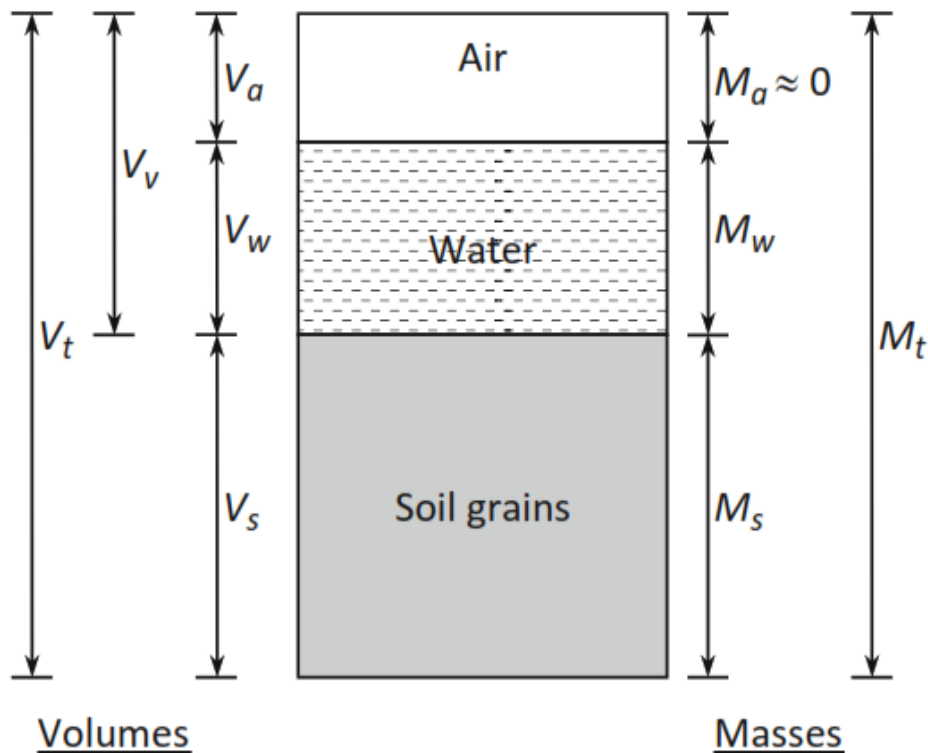
۱-۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی خاک‌ها

آزمایش‌های آزمایشگاهی خاک‌ها بر روی نمونه‌های خاک دست نخورده یا دست‌خورده‌ی تهیه شده از محل انجام می‌شوند. در خاکهای دانه‌ای (غیرچسبنده) تهیه نمونه‌های دست نخورده بسیار دشوار است، بنابراین پارامترهای خاک مربوط به آنها به‌طور غیرمستقیم از طریق آزمایش‌های درجا تعیین می‌شوند. اما درمقابل، آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی خاکهای دانه‌ای به‌صورت بازسازی شده می‌تواند انجام شوند؛ طوریکه وزن مخصوص دانه‌ها متناسب با وزن مخصوص درجای خاک محل باشند. در خاک‌های چسبنده، نمونه‌های دست نخورده عموماً در لوله‌های نمونه‌گیری درپوش‌دار و انتهای موم شده تهیه شده و با کیسه‌های پلی‌اتیلن برای حفظ رطوبت، پوشانده شده تا زمانیکه در آزمایشگاه بیرون آورده و مورد آزمایش قرار گیرند (شکل ۱-۲). لوله‌های نمونه‌گیری به‌طور آشکاری برچسب‌گذاری می‌شوند که در آن شماره پروژ، شماره گمانه، تاریخ نمونه‌گیری و عمق نمونه نمایش داده می‌شود؛ همان‌طور که در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱- نمونه های خاک محل به همراه نمایش اطلاعات نمونه شامل پروژ، تاریخ نمونه برداری، شماره و عمق گمانه

آزمایش های آزمایشگاهی و آزمایش های درجا مکمل یکدیگر می باشند. یکی از آنها به هیچ وجه نمی تواند جایگزین دیگری قرار گیرد. هر کدام از آنها مزایا و اشکالات خود را دارند؛ لذا طراحی مناسب برنامه تحقیقات صحرایی همراه با تعادل خوب بین آزمایش های آزمایشگاهی و درجا می تواند در حصول پارامترهای طراحی بسیار مؤثر باشد. آزمایش های آزمایشگاهی که با شرایط مرزی خوبی تعریف شده اند بر روی نمونه های کوچکی که اغلب همگن می باشند، انجام می شوند. این مسأله، آزمایش های آزمایشگاهی را تکرارپذیر کرده و تفسیر اطلاعات آزمایش ها عموماً با استفاده از اصول مکانیک خاک منطقی انجام می شود. اندازه کوچک نمونه و تلاشی که در آزمایش نمونه ها به کار می رود باعث دشواری آزمایش در احجام بزرگ تر می شود.



شکل ۲-۲- نمودار فازی

۲-۲- روابط فازی

خاک شامل سه فاز می‌شود: دانه‌های خاک (یعنی قسمت جامد)، آب و هوا. نسبت‌های نسبی آنها به‌طور شماتیک در نمودار فازی در شکل ۲-۲ نشان داده شده است که حجم‌ها در سمت چپ و جرم‌ها در سمت راست به ترتیب با علائم V و M نمایش داده شده‌اند. زیرنویس‌های a و w و s و t به ترتیب نشان‌دهنده علائم مربوط به دانه‌های خاک، آب، هوا و فضای خالی می‌باشند. V_t و M_t نشان‌دهنده حجم و جرم کل می‌باشند که دانه‌های خاک، آب و هوا را شامل می‌شوند.

۲-۲-۱- اصطلاحات و تعاریف

میزان آب (w) که عموماً به صورت درصد نمایش داده می‌شود، به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$w(\%) = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (2-1)$$

این پارامتر به‌عنوان درصد رطوبت نیز شناخته می‌شود. خاکهای خشک دارای $w=0\%$ می‌باشند. در رس‌های نرم یا ارگانیک و خاک نباتی میزان رطوبت می‌تواند بیش از ۱۰۰ درصد نیز باشد. میزان آب موجود در خاک در محل طبیعی

آن به عنوان میزان رطوبت طبیعی شناخته می شود (wp). خاکهای نزدیک سطح، به ندرت خشک می باشند و مقداری آب از اتمسفر جذب می کنند و در میزان آب هیدروسکوپ باقی می ماند.

هم نسبت تخلخل (e) و هم پوکی (n)، حجم فضای خالی خاک را اندازه می گیرند. و به صورت ذیل تعریف می شوند:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.2)$$

و

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \quad (2.3)$$

نسبت تخلخل می تواند به میزانی کم ۰/۳ در خاکهای خوب دانه بندی شده یا متراکم (در سنگ ها به میزان قابل توجهی کم) تا مقادیر بسیار بالاتر از ۲ در رس های نرم یا خاکهای آلی مانند خاک نباتی باشد. از دیدگاه نظری پوکی می تواند بازه ی ۰ تا ۱۰۰ درصد را داشته باشد.

درجه اشباع S عبارت است از درصد فضای خالی که با آب پر می شود و به صورت ذیل تعریف می شود:

$$S(\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (2.4)$$

که بین ۰٪ برای خاک های خشک و ۱۰۰٪ برای خاک های اشباع تغییر می کند. میزان هوا a ترمی است که برای خاک های کوبیده شده استفاده می شود. و معیاری برای حجم هوا بوده و به صورت درصدی از حجم کل بیان شده و لذا به صورت ذیل تعریف می شود:

$$a(\%) = \frac{V_a}{V_t} \times 100 \quad (2.5)$$

دانسیته ρ ، عبارت است از جرم واحد حجم، که تعاریف مختلفی برای آن بیان شده مانند دانسیته حجمی، دانسیته خشک، دانسیته اشباع و دانسیته غوطه وری. دانسیته حجمی ρ_m عبارت است از نسبت M_t به V_t طوریکه خاک هر سه فاز را شامل می شود. همچنین به عنوان دانسیته کل و دانسیته خیس یا مرطوب نیز شناخته می شود. زمانیکه خاک با یک نسبت تخلخل یکسان خشک شود یعنی تمام حفرات با هوا جایگزین گردد، دانسیته خشک ρ_d به صورت نسبت M_s به V_t تعریف می شود. زمانیکه خاک با یک نسبت تخلخل یکسان اشباع شود یعنی تمام حفرات با آب جایگزین گردد، خاک حالت دو فاز به خود گرفته و دانسیته حجمی به صورت دانسیته اشباع ρ_{sat} تعریف می شود. دانسیته غوطه وری ρ' نشانگر اثرات شناوری در زیر آب است که به صورت ذیل تعریف می شود:

$$\rho' = \rho_{sat} - \rho_w \quad (2.6)$$

که ρ_w دانسیته آب است و مقدار آن برابر 1 gr/cm^3 ، 1 ton/m^3 ، 1 Mgr/m^3 و یا 1000 kg/m^3 است. در صورت جایگزین شدن وزن به جای جرم، دانسیته تبدیل به وزن مخصوص (γ) می شود. با استفاده از واحدهای مناسب،

کار کردن با هر دو مفهوم دانسیته (و جرم‌ها) و وزن مخصوص (و وزن‌ها) در حین استفاده از روابط فازی ممکن خواهد بود. توجه داشته باشید که در رابطه $\gamma = \rho \cdot g$ ، γ دارای مقدار (9.81 m/S^2) است. وزن مخصوص‌های حجمی، خشک، اشباع و غوطه‌وری به ترتیب با علائم γ_{sat} ، γ_d ، γ_m و γ' نشان داده می‌شوند. وزن مخصوص آب $\gamma_w = 9.81 \text{ kn/m}^3$ است. وزن مخصوص خاک‌های اشباع در محدوده $15-22 \text{ kn/m}^3$ متغیر است که خاک‌های چسبنده در حد پایین و خاک‌های دانه‌ای در حد بالا قرار می‌گیرند. توجه داشته باشید که وزن مخصوص بتن در حدود 24 kn/m^3 است که این مقدار می‌تواند حد بالای وزن مخصوص خاک‌ها در نظر گرفته شود. سنگ‌ها عموماً دارای وزن مخصوص بیشتری نسبت به بتن را دارند.

مقدار آب موجود در خاک مرطوب در آزمایشگاه قابل اندازه‌گیری است که با ثبت وزن مرطوب نمونه و وزن خشک آن بعد از خشک کردن در گرمخانه در دمای 105°C درجه سانتی‌گراد در مدت ۲۴ ساعت به‌دست می‌آید (ASTM D2۲۱۶, BS ۱۳۷۷-۲, AS ۱۲۸۹, ۲, ۱, ۱). با دانستن حجم نمونه، تعیین دانسیته یا وزن مخصوص امکان‌پذیر است.

جدول ۲-۱- مقادیر تیپیک G_s

Mineral	G_s	Mineral	G_s
Quartz ^a	2.65	K-Feldspar ^a	2.55
Na-Ca Feldspar ^a	2.6-2.8	Calcite ^a	2.72
Dolomite ^a	2.85	Muscovite ^a	2.7-3.1
Biotite ^a	2.8-3.2	Chlorite ^a	2.6-2.9
Pyrophyllite ^a	2.84	Serpentine ^a	2.2-2.7
Kaolinite ^a	2.64	Halloysite (2H ₂ O) ^a	2.55
Illite ^a	2.84	Montmorillonite ^a	2.76
Attapulgit ^a	2.30	Loess from central US ^b	2.70
Volcanic ash, Kansas ^b	2.32	Micaceous silt, Alaska ^b	2.76
Gypsum ^c	2.3-2.4	Galena ^c	7.4-7.6
Pyrite ^c	4.9-5.2	Magnetite ^c	4.4-5.2

Adapted from Lambe and Whitman (1979), Handy and Spangler (2007), and Winchell (1942)

^aLambe and Whitman (1979)

^bHandy and Spangler (2007)

^cWinchell (1942)

وزن مخصوص دانه‌های خاک (G_s) معمولاً در محاسبات وزنی و حجمی هر سه فاز لازم است. وزن مخصوص دانه‌های خاک، معیاری برای میزان سنگینی دانه‌های خاک در مقایسه با آب است و به‌صورت ذیل تعریف می‌شود: