دانشگاه سمنان

آزمایش تعیین وزن واحد حجم خشك خاك در محل به روش مخروط ماسه و بالون لاستیکی

(Determination of in-Place Soil Density)

(Rubber Balloon and Sand Cone)

بالون پلاستیکی: ASTM D 2167-84, AASHTO T 205-86

مخروط ماسه: ASTM D 1556-82, AASHTO T 191-86

این آزمایش برای به‌دست آوردن وزن واحد حجم خشک خاک در حالت طبیعی یا یک لایه خاک کوبیده‌شده با استفاده از مخروط ماسه کالیبره‌شده یا بالون لاستیکی است.

آزما یش تعیین وزن واحد حجم خشک خاک در محل، برای ارزیابی میزان تراکم خاکریز صورت می‌گیرد. تراکم مجموعهٔ عملیاتی است که موجب افزایش وزن واحد حجم خاک در محل می‌شود. افزایش وزن واحد حجم خاک براثر به‌هم‌فشرده‌تر شدن دانه‌ها و کاهش فضای خالی میان‌دانه‌ای است. دقت شود که حجم آب موجود در خاک براثر تراکم تغییر نمی‌کند و فقط از حجم هوا کاسته می‌شود. درجهٔ (میزان) کوبیدگی خاک براساس اندازه‌گیری وزن واحد حجم خشک (dry unit weight) آن مشخص می‌شود. اگر وزن واحد حجم ظاهری خاک برابر γ_t و درصد رطوبت آن برابر w فرض شود، با استفاده از روابط $\gamma_d = \frac{G_s}{1+e}\gamma_w$ و $\gamma_t = \frac{G_s(1+w)\gamma_w}{1+e}$، وزن واحد حجم خشک خاک از رابطهٔ $\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1+w}$ به‌دست می‌آید. این وزن واحد حجم خاک کوبیده‌شده تابع جنس خاک، میزان رطوبت و نیروی تراکمی است که برای کوبیدن خاک صرف شده است[۱۱].

آنچه ما را ملزم به انجام‌ا ین آزمایش می‌کند، این است که گاهی در کارگاه‌ها براثر رعایت نکردن دقیق درصد رطوبت لازم برای تراکم یا کافی نبودن انرژی لازم برای این عمل، واحد حجم خشک حاصل کمتر (یا گاهی بیشتر) از وزن واحد حجم خشک حداکثر حاصل از آزمایش تراکم می‌شود. بنابراین با انجام این آزمایش می‌توانیم درستی یا نادرستی تراکم انجام‌شده را بررسی کنیم[۵].

تئوری آزمایش

همان‌طورکه ذکر شد، هدف از این آزمایش محاسبهٔ γ_d خاک است. برای انجامِ این کار روش‌های متعددی وجود دارد، ولی معمول‌ترین آن‌ها که در اکثر پروژه‌های بزرگ و تقریباً همهٔ پروژه‌های کوچک به‌کار گرفته می‌شود، دو روش مخروط ماسه (Sand Cone) و بالون لاستیکی (Rubber Balloon) هستند. البته در بعضی از پروژه‌های بزرگ از روش‌های سریع و کاملاً مستقیمی چون چگالی‌سنج هسته‌ای و دیجیتالی نیز استفاده می‌شود که در این موارد با ارسال تشعشعات رادیواکتیو به‌طور مستقیم وزن واحد حجم خشک را به‌دست می‌آورند. این روش خاص به‌علت سرعت مناسب و سادگی و کم‌خطا بودن آن در بعضی از کشورها کاربرد فراوان دارد، همچنین این روش علاوه بر γ_d، w را نیز به‌دست می‌دهد [۱] (البته این مورد خارج از بحث ماست).

هر دو روش مخروط ماسه و بالون لاستیکی از اصول مشابهی استفاده می‌کنند و آن، به‌دست آوردن وزن مرطوب نمونه‌ای از خاک حفاری‌شده از یک گودال با شکل هندسی نامنظم است که اگر حجم آن گودال را بدانیم، وزن واحد حجم ظاهری یا مرطوب خاک به‌سادگی محاسبه می‌شود:

$$\gamma_t = \frac{\text{وزن خاک مرطوب}}{\text{حجم گودال}}$$

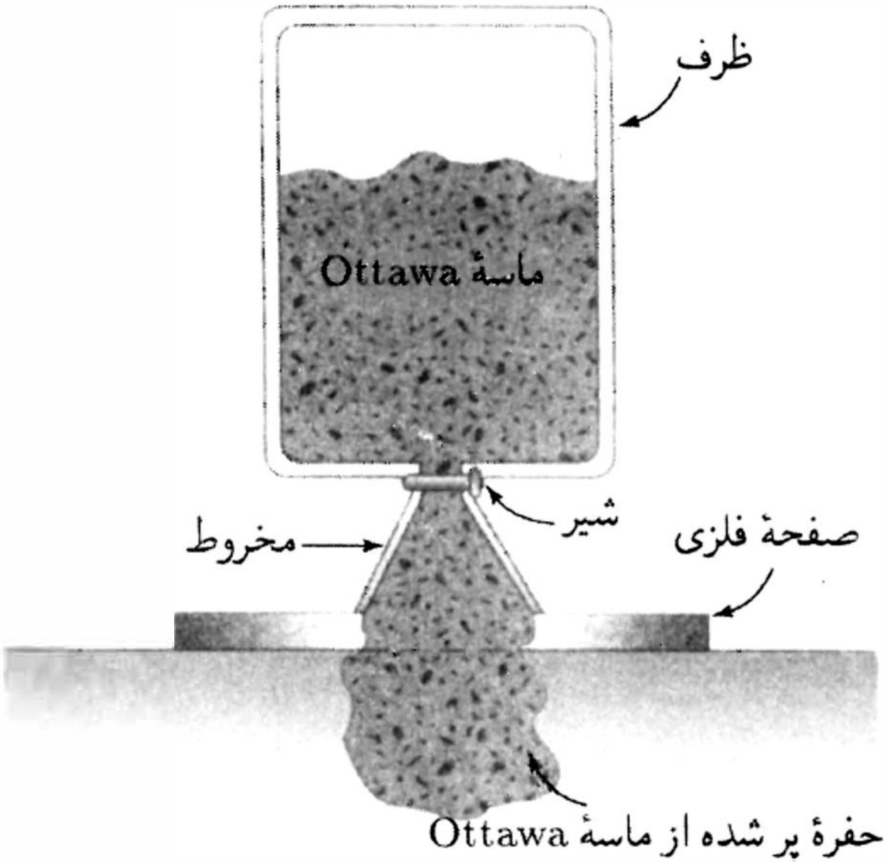
حال با داشتن درصد رطوبت خاک، وزن واحد خشک خاک حفاری‌شده برابر است با:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1 + w}$$

روش مخروط ماسه روشی غیرمستقیم برای به‌دست آوردن حجم گودال است. ماسهٔ مورداستفاده (ماسهٔ اُتاوا درکشورهای غربی و به پیشنهاد آقای دکتر اسکروچی، ماسهٔ خزر در ایران) عموماً مصالحی است که از الک ۲۰ می‌گذرند، ولی روی الک ۳۰ می‌مانند؛ اگرچه مصالح عبوری از الک ۳۰ و مانده روی الک ۴۰ یا عبوری از الک ۳۰ و مانده روی الک ۵۰ نیز قابل‌استفاده هستند. اغلب وجود یک ماسهٔ یکنواخت و هم‌اندازه برای جلوگیری از مسألهٔ جدایی (Segregation) ضروری است (باید توجه داشت که یک حجم از ماسهٔ ریزدانه ممکن است دارای وزنی بیش از ماسهٔ درشت‌دانهٔ هم‌حجمش باشد و این برای ماسهٔ خوب دانه‌بندی‌شده به‌مراتب بیشتر است)[۱].

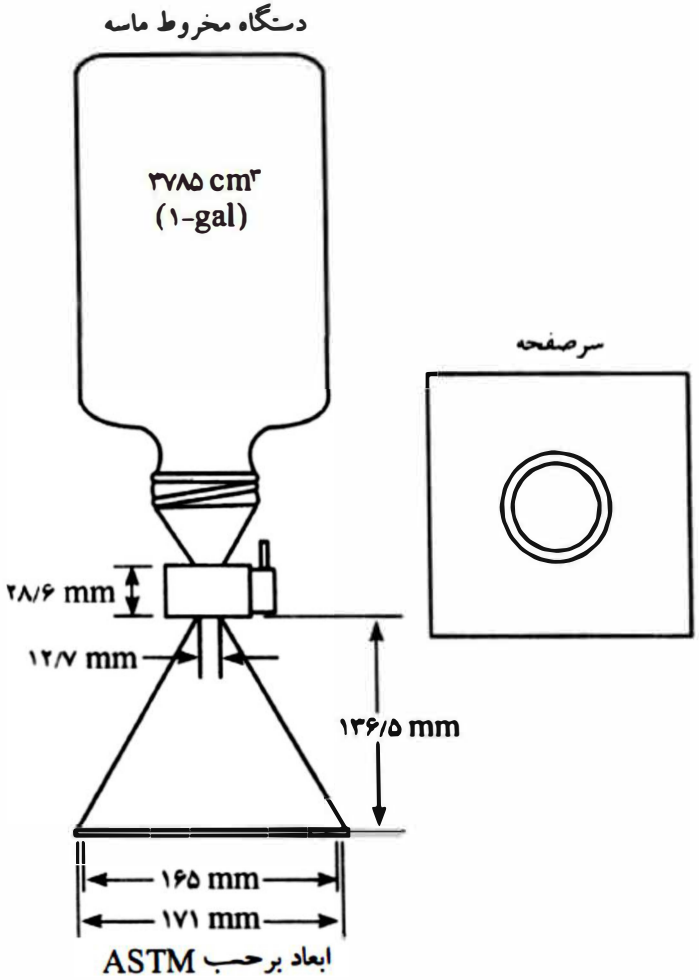
وسایل آزمایش

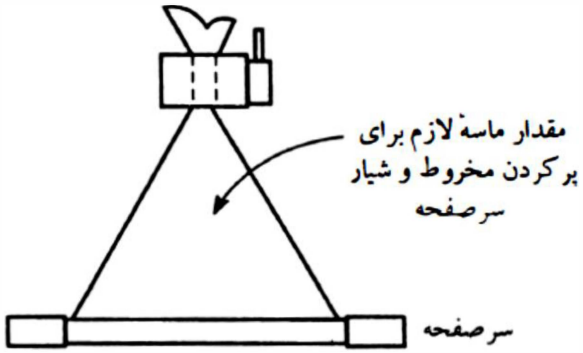
۱. بطری ماسه با قیف و صفحهٔ زیر آن (Template) یا استوانهٔ وزن واحد ـ استوانه، استوانه‌ای است فلزی با ظرفیت ۴ لیتر (یک گالن) و قطر دهانهٔ ۱۰۲mm (۴in) و ۱۰۷mm (۴in) که در انتها دارای یک قسمت قیفی‌شکل است (شکل ۱۰-۲). حدفاصل استوانه و قیف یک قسمت جداشونده مرکب از شیر خروج ماسه با قطر دهانهٔ ۱۲٫۷mm ($\frac{1}{2}$in) است.



توضیح: چنانچه دستگاه وزن واحد حجم پُر از ماسه شود، می‌توان برای اندازه گرفتن چاله‌هایی به حجم $0/003 m^3$ ($0/1 ft^3$) نیز استفاده کرد. استفاده از صفحهٔ زیرین دستگاه اختیاری است، اگرچه وجود صفحهٔ زیرین کار ترازکردن دستگاه را مشکل می‌کند، ولی درعوض به‌کمک آن می‌توان حجم چاله‌هایی با قطر بیشتر را اندازه گرفت و از طرفی از بیرون ریختن و هدر رفتن خاکی که باید از چالهٔ آزمایش به ظرف توزین انتقال داده شود، جلوگیری کرد. همچنین چون سطح آن بهتر از کف خود دستگاه است، ثبات پایه به‌خصوص برای خاک‌های نرم که کوبیدگی آن‌ها کم است، بیشتر است. به‌هرحال وقتی از صفحهٔ زیرین استفاده می‌شود، باید به‌خاطر داشت که ضخامت صفحه، جزئی از قیف به‌حساب آید.

۲. وسایل کندن زمین: قلم فلزی به طول ۲۵cm و چکش به وزن ۱kg برای کندن چالهٔ آزمایش[۱].


دستگاه مخروط ماسه
۳۷۸۵ cm³
(۱-gal)
سرصفحه
۲۸/۶ mm
۱۲/۷ mm
۱۳۶/۵ mm
۱۶۵ mm
۱۷۱ mm
ابعاد برحسب ASTM


مقدار ماسهٔ لازم برای
پر کردن مخروط و شیار
سرصفحه
سرصفحه

۳. قوطی فلزی با درپوش محکم[۱].

۴. کیسهٔ ماسه[۱].

۵. ترازو: ترازویی به ظرفیت ۱۵kg و به دقت ۱gr و ترازویی به ظرفیت ۵۰۰gr و دقت ۰٫۱gr[۵].

۶. گرمخانه (oven)[۱].

توجه: نوع متداول و مرسوم دستگاه مخروط ماسه، $۳۷۸۵\ cm^۳$ حجم دارد و شامل یک بطری شیشه‌ای یا ظرف پلاستیکی با مصالح مناسب برای پُر کردن گودال‌هایی است که بیش از $۳۸۰۰\ cm^۳$ حجم ندارند[۱].

با توجه به حجم‌های فوق مشاهده می‌شود که حفرهٔ ایجادشده دارای ابعاد نسبتاً کوچکی است و کوچک‌ترین خطا در محاسبهٔ درصد رطوبت یا سایر محاسبات به‌نسبت حجم گودال، خطای محسوسی را در نتایج آزمایش به‌بار خواهد آورد، لذا هنگام حفاری باید سعی شود تمام خاک کنده‌شده از حفره جمع‌آوری شود و به‌هیچ‌وجه خاک خارج‌شده از حفره هدر نرود[۱].

استاندارد ASTM برای به‌دست آوردن نتایج قابل‌قبول در دستیابی به وزن واحد حجم خشک خاک، بسته به درشتی دانه‌های خاک (حداکثر اندازهٔ درشت‌دانه) مقادیر حداقل جدول ۱۰-۱ را برای حجم حفره و نمونه توصیه می‌کند که بهتر است به آن توجه شود[۱].

جدول ۱۰-۱ مقادیر حداقل برای حجم حفره و نمونه [۱].

حداقل وزن نمونه برای تعیین درصد رطوبت (gr)	حداقل حجم حفره (cm^3)	حداکثر درشتی دانه‌های خاک (mm)
۱۰۰	۷۱۰	۴٫۷۵
۳۰۰	۱۴۲۰	۱۲٫۵
۵۰۰	۲۱۲۰	۲۵
۱۰۰۰	۲۸۳۰	۵۰

نکته‌ها [۱]:

۱. اگر در آزمایشگاه گرمخانه در دسترس باشد، بهتر است که تمام خاک خارج‌شده از حفره برای تعیین درصد رطوبت به‌کار رود.

۲. عمل حفاری باید خیلی سریع انجام شود و برای نگهداری حجم رطوبت موجود در خاک طبیعی، خاک باید بلافاصله بعد از حفاری در قوطی درپوش‌دار ریخته و قوطی کاملاً حفاظت شود.

۳. هنگام استفاده از روش مخروط ماسه باید از ارتعاش زمین اطراف گودال و خود ظرف پرهیز شود، چراکه این امر منجر به قرارگیری بیشتر ماسه‌ها در گودال و درنهایت، محاسبهٔ حجم بزرگ‌تری برای گودال می‌شود.

روش انجام آزمایش [۱]

در ادامه روش انجام این آزمایش را به‌صورت یک کار گروهی ارائه می‌دهیم. در این‌جا سعی شده است به هر دو روش مخروط ماسه و بالون لاستیکی با هم پرداخته شود.

روش انجام کار

۱. هر گروه باید آزمایش مخروط ماسه را در منطقه‌ای که مسئول آزمایشگاه در اختیارش قرار می‌دهد، انجام دهد.

۲. هر گروه آزمایشی، یک گودال منفرد را با استفاده از دستگاه بالون لاستیکی برای اندازه‌گیری حجم گودال آزمایش می‌کند.

۳. تمام مقادیر خاک جمع‌آوری‌شده از گودال‌های موردآزمایش برای تعیین درصد رطوبت خاک در محل باید در گرمخانه خشک شوند.

کار در محل

کار در محل طبق دستورالعمل زیر انجام می‌شود:

۱. قبل از رفتن به محل،

الف) هر گروهی (ظرف) مخروط ماسه را زمانی که پُر از ماسه است وزن کند و قوطی فلزی و درپوش آن را نیز وزن کند.

ب) هر گروهی دستگاه بالون لاستیکی را روی سرصفحه‌اش که روی یک سطح صاف قرار گرفته، قرار دهد و قرائت صفر را به‌دست آورد و قرائت‌ها را روی تخته‌سیاه بنویسد تا معدل کلاسی محاسبه شود.

۲. سپس هر گروه یک گودال را درحالی‌که سرصفحه را در محل مناسب قرار داده، حفاری کند و با دقت خاک‌های کنده‌شده از گودال را داخل قوطی بریزد و در پایان آن را کاملاً حفاظت کند. قبل از قرار دادن سرصفحه باید مطمئن شد که منطقهٔ حفاری عاری از مصالح و کاملاً صاف است.

۳. درحالی‌که شیر مخروط بسته است، مخروط ماسه را روی سرصفحه واژگون و شیر را باز کنید. هنگامی که ماسه از ریختن بازایستاد، شیر را مجدداً ببندید و ظرف مخروط ماسه را بلند کنید. ماسه‌های ریخته‌شده و اضافی را بازیافت کنید (چون ماسهٔ اُتاوا گران است) و کیسه را برگردانید.

۴. یک گروه با کمک مسئول آزمایشگاه سرصفحهٔ بالون لاستیکی را در جای مناسب قرار دهد و گودال را حفاری کند (مشابه آنچه برای مخروط ماسه انجام شد)، ولی سعی شود حجم گودال زیاد نباشد.

۵. هر گروه سپس دستگاه بالون را روی سرصفحهٔ مربوطه قرار دهد. برای اندازه‌گیری حجم گودال، بالون را در داخل گودال پمپ کند، قرائت نهایی‌اش را روی مخزن آب ثبت کند و اگر دستگاه به گِیجِ فشار مجهز باشد، از فشارهای زیر حد $۰/۲\ kg/cm^۲$ (۳psi) استفاده شود.

۶. کار دانشجو در محل باید به نحوی باشد که چشم‌انداز گودال بعد از انجام آزمایش به همان تمیزی اولیهٔ خود باشد.

توجه شود که محل انجام آزمایش باید به‌نحوی انتخاب شود که در لبهٔ خاکریز و بیرون از حد طراحی نباشد.

عملیات اولیه در آزمایشگاه

۱. هر گروهی قوطی حاوی خاک مرطوب را وزن کند و در برگه‌های اطلاعاتی‌اش در ردیف مربوطه ثبت کند. خاک را درون یک ظرف توزین‌شده بریزد و برای خشک شدن در گرمخانه قرار دهد.

۲. هر گروهی ظرف مخروط ماسه را که خالی شده است، وزن کند و عدد حاصل را در جای مناسب روی برگهٔ اطلاعاتی ثبت کند.

۳. قرائت‌های حجم توسط بالون لاستیکی را روی تخته‌سیاه بنویسید و میانگین بگیرید و از معدل قرائت‌های صفر حجم اولیهٔ کلاسی کم کنید تا معدل حجم در کلاس به‌دست آید. عدد نهایی و قرائت‌های اولیه را به‌همراه معدل حجم در کلاس ثبت کنید.

۴. گروهی که نمونهٔ خاک را از گودال آزمایش بالون گرفته است، وزن مرطوب خاک را روی تخته‌سیاه بنویسد.

عملیات تکمیلی

۱. روز بعد به آزمایشگاه برگردید و نمونه‌های خشک‌شده در گرمخانه را برای پیداکردن وزن خشک خاک به‌دست‌آمده از گودال، وزن کنید و در برگهٔ اطلاعاتی، در جای مناسب ثبت کنید.

۲. اطلاعات را به‌همراه وزن خشک خاک گودال آزمایش بالون روی تخته‌سیاه ثبت کنید.

۳. هر گروهی جداگانه درصد رطوبت و وزن واحد حجم خشک و مرطوب گودال را محاسبه کند.

۴. هر گروهی جداگانه درصد رطوبت و وزن واحد حجم خشک و مرطوب خاک مربوط به آزمایش بالون را به‌دست آورد.

کالیبراسیون تجهیزات

هر گروه باید سه دسته از اطلاعات را تعیین کند:

۱. وزن واحد حجم (gr/cm^3) ماسهٔ استفاده‌شده در آزمایش مخروط ماسه.

۲. وزن ماسهٔ لازم برای پُر کردن مخروط ماسه و شیار سرصفحه.

۳. کالیبراسیون دستگاه بالون لاستیکی.

از دستورالعمل زیر برای محاسبه و تعیین وزن واحد حجم ماسهٔ استفاده‌شده در مخروط ماسه پیروی کنید:

۱. یک قالب استاندارد (cm^3 ۱۰۰۰-۹۴۴) تراکم با صفحهٔ اصلی چسبیده به خودش (Base Plate) را وزن کنید؛ در هر صورت حجم این قالب باید اندازه‌گیری شود. توجه داشته باشید که هر ظرف دیگر با حجم مشخص را می‌توان به‌جای قالب استاندارد تراکم استفاده کرد.

۲. ماسه را با دقت در داخل قالب بریزید. سعی شود از ارتفاعی تقریباً مشابه آنچه ماسه در محل به داخل گودال ریخته شده است، استفاده شود. سر قالب را بعد از پُر شدن با وسیله‌ای لب‌تیز صاف و وزن کنید.

۳. گام دوم را تکرار کنید تا دو قرائت با سازگاری خوب (حدود gr ۱۰ اختلاف) بیابید و آنگاه میانگین این دو قرائت را روی تخته‌سیاه بنویسید.

۴. از مقادیر به‌دست‌آمده توسط همهٔ گروه‌ها معدل بگیرید (توجه داشته باشید که ارقامی را که سازگاری خوبی با مقادیر دیگر ندارند، حذف کنید). مقدار معدل وزن واحد حجم ماسه را برای تعیین حجم گودال در برگهٔ اطلاعاتی ثبت کنید.

تعیین وزن ماسهٔ لازم برای پُرکردن مخروط ماسه (قیف) و شیار سرصفحه

۱. سرصفحه را روی یک سطح صاف قرار دهید و مخروط ماسه را با بطری چسبیده به آن درحالی‌که پُر از ماسه است، وزن کنید و این عدد را ثبت کنید.

۲. مخروط ماسه را درحالی‌که شیرش بسته است، روی سرصفحه برگردانید. شیر را باز کنید و اجازه دهید ظرف ماسه خالی شود. لحظه‌ای که ماسه بازایستاد، شیر را ببندید.

۳. مجدداً بطری ماسه و ماسهٔ باقی‌مانده در آن را وزن کنید. اختلاف وزن به‌دست‌آمده از مرحلهٔ ۱ و ۲، وزن ماسهٔ لازم برای پُرکردن مخروط و شیار سرصفحه است.

۴. معدل کلاسی را درصورتی‌که همه از دستگاه‌های مشابه استفاده کرده باشند، محاسبه کنید و در برگهٔ اطلاعاتی ثبت کنید.

محاسبات [۵]

محاسبهٔ وزن واحد حجم ماسه

$$\gamma_s = \frac{M_1}{V_1}$$

γ_s: وزن واحد حجم ماسه

M_1: وزن ماسهٔ داخل قالب پراکتور

V_1: حجم داخلی قالب پراکتور

محاسبهٔ حجم گودال

$$V = \frac{M_2 - M_3}{\gamma_s}$$

V: حجم گودال (یا سوراخ) حفرشده در زمین

M_2: وزن ماسهٔ لازم برای پُر کردن گودال، قیف و ضخامت صفحهٔ زیرین

M_3: وزن ماسهٔ لازم برای پُر کردن قیف و ضخامت صفحهٔ زیرین

محاسبهٔ وزن واحد حجم مرطوب خاك

$$\gamma_t = \frac{M_۴}{V}$$

γ_t: وزن واحد حجم مرطوب ظاهری

$M_۴$: وزن مرطوب خاکی که از گودال خارج شده است

محاسبهٔ درصد رطوبت خاك

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W - W_s}{W_s}$$

W: وزن اولیهٔ نمونه

W_s: وزن قسمت جامد خاک (وزن بعد از خارج کردن نمونه از گرمخانه)

محاسبهٔ وزن واحد حجم خشك خاك

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{۱ + w}$$

بحث در خطا و دقت آزمایش

این آزمایش به‌رغم سادگی ظاهری، بسیار دقیق است و اگر موارد ذکرشده با دقت انجام شود، خطای حاصل در محاسبهٔ γ_d بسیار ناچیز خواهد بود. با این وصف، توجه به نکات زیر ضروری است:

۱. یکی از اشکالات روش‌های ذکرشده، عدم امکان استفاده از آن‌ها برای سنگ‌های بزرگ‌تر از ۳۵mm یا ۴۲mm است که در این‌گونه موارد، آقای دکتر اسکروچی پیشنهاد می‌کند برای خاک حاوی شن درشت و قلوه‌سنگ، از پلاستیک و آب استفاده شود. در این روش گودالی به اندازهٔ لازم ایجاد می‌شود، پلاستیک را داخل آن قرار می‌دهیم و تا تراز بالای آن آب می‌ریزیم. ازروی وزن آب می‌توان حجم گودال را یافت و با داشتن وزن مصالح، وزن واحد حجم خشک را به‌دست آورد.

۲. حتماً سعی شود در اندازه‌گیری وزن واحد حجم ماسهٔ مصرفی و مقدار ماسهٔ لازم برای پُرکردن قیف و شیار صفحهٔ تحتانی و...به‌صورت تکرار عمل گردد و اعداد خارج از محدوده کنار گذاشته و از مابقی میانگین گرفته شود.

۳. دقت شود که در حین حفر چاله، دیوارهٔ آن خراب نشود و خاک کنده‌شده کاملاً در ظرفی جمع‌آوری شود و هیچ‌گونه مصالحی دور ریخته نشود. درضمن در خاک‌های دانه‌ای (شن و ماسه) باید توجه بیشتری در کندن چاله مبذول گردد [۵].

مثال

روش مخروط ماسه:

الف) محاسبهٔ وزن واحد حجم ماسه

وزن قالب خالی پراکتور:

$$M'_{۱} = ۷۹۵۲\text{gr}$$

وزن قالب پُر از ماسه:

$$M''_{۱} = ۱۲۳۹۰\text{gr}$$

وزن ماسهٔ داخل قالب:

$$M_{۱} = M''_{۱} - M'_{۱} = ۴۴۳۸\text{cm}$$

ابعاد داخلی استوانه.

$$D = ۱۵,۲۳\text{cm}$$

$$h = ۱۷,۸۷\text{cm}$$

حجم استوانهٔ پراکتور:

$$V_{۱} = ۳۲۵۵,۵\text{cm}^{۳}$$

وزن واحد حجم ماسه:

$$\gamma_{۱} = \frac{M_{۱}}{V_{۱}} = \frac{۴۴۳۸}{۳۲۵۵,۵} = ۱,۳۶۳\text{gr/cm}^{۳}$$

ب) محاسبهٔ حجم گودال

وزن مخروط ماسه پُر از ماسه: $M'_۳ = ۵۹۹۷\text{gr}$ وزن مجدد مخروط پُر از ماسه: $M'_۲ = ۶۲۳۵\text{gr}$

وزن مخروط بعد از برگرداندن روی صفحهٔ زیرین: $M''_۳ = ۴۳۶۳/۵\text{gr}$

وزن مخروط بعد از پُر کردن گودال: $M''_۲ = ۳۱۸۲\text{gr}$

وزن ماسهٔ لازم برای پُر کردن قیف و شیار صفحهٔ زیرین: $M_۳ = M'_۳ - M''_۳ = ۱۶۳۳/۵\text{gr}$

وزن ماسهٔ لازم برای پُر کردن گودال: $M_۲ = M'_۲ - M''_۲ - M_۳ = ۱۴۱۹/۵\text{gr}$

$$V = \frac{M_۲}{\gamma_۰} = \frac{۱۴۱۹/۵}{۱/۳۶۳} = ۱۰۴۱/۴۲\text{cm}^۳$$

ج) محاسبهٔ وزن واحد حجم خاک مرطوب (ظاهری)

وزن خاک و قوطی درپوش‌دار: $M'_۴ = ۱۹۰۰\text{gr}$ وزن قوطی خالی: $M''_۴ = ۲۰۲\text{gr}$

وزن خاک مرطوب (وزن کل): $M_۴ = M'_۴ - M''_۴ = ۱۹۰۰ - ۲۰۲ = ۱۶۹۸\text{gr}$

$$\gamma_۱ = \frac{M_۴}{V} = \frac{۱۶۹۸}{۱۰۴۱/۴۲} = ۱/۶۳\text{gr}$$

د) محاسبهٔ درصد رطوبت خاک

وزن خاک خشک با ظرف: $M_5 = ۱۸۱۷\text{gr}$

وزن آب: $W_w = M'_۴ - M_5 = ۸۳\text{gr}$

وزن خاک خشک: $W_s = M_5 - M''_۴ = ۱۸۱۷ - ۲۰۲ = ۱۶۱۵\text{gr}$

$$W = \frac{W_w}{W_s} = \frac{۸۳}{۱۶۱۵} = ۵/۱۴٪$$

ه) محاسبهٔ وزن واحد حجم خشک خاک

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{۱ + w} = \frac{۱/۶۳}{۱ + ۰/۰۵۱۴} = ۱/۵۵\text{gr/cm}^۳$$

جدول تعیین درصد تراکم.

پروژه: تراکم بهینه: تاریخ:

محل: وزن حجمی ماسه: $\frac{۴۴۳۸}{۳۲۵۵/۵} = ۱/۳۶۳ \text{ gr/cm}^۳$

شمارهٔ نمونه						
وزن ماسه	(gr)	W_s	۱۴۱۹/۵			
حجم	($\text{cm}^۳$)	V	۱۰۴۱/۴۵			
وزن خاک مرطوب	(gr)	$W_۱$	۱۶۹۸			
وزن خاک خشک	(gr)	$W_۲$	۱۶۱۵			
وزن حجمی ظاهری	($\text{gr/cm}^۳$)	γ_t	۱/۶۳			
وزن حجمی خشک	($\text{gr/cm}^۳$)	γ_d	۱/۵۵			
درصد تراکم	٪					
شمارهٔ ظرف						
وزن کل مرطوب	(gr)	W_A	۱۹۰۰			
وزن کل خشک	(gr)	W_B	۱۸۱۷			
وزن ظرف	(gr)	W_C	۲۰۲			
وزن خاک خشک	(gr)	$W_B - W_B$	۱۶۱۵			
درصد آب	٪	$\frac{W_A - W_B}{W_B - W_C}$	۵/۱۴			
مقدار متوسط آب		$w_۲$	۸۳			