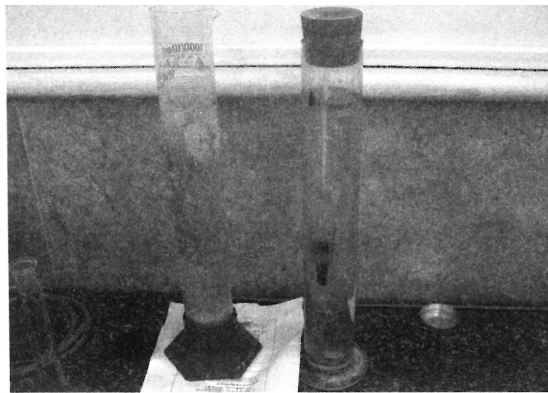


# آزمایش هیدرومتری

(Hydrometer Analysis)

AASHTO T 87-86 & T88-90

ASTM D 421-58 & D 422-63



هدف از این آزمایش، تکمیل بخش ریزدانه (عبوری از الک شماره ۲۰۰) منحنی دانه‌بندی است.

## مقدمه

توزیع دانه‌بندی دانه‌های درشت خاک (بزرگ‌تر از  $0.75\text{mm}$  برابر با اندازه الک ۲۰۰) با استفاده از روش دانه‌بندی با الک تعیین می‌شود، ولی برای تعیین اندازه ذرات ریز خاک باید از روش هیدرومتری استفاده شود.

## ۱-۲ تئوری آزمایش

روش هیدرومتری یکی از متداول‌ترین روش‌هایی است که برای تخمین اندازه ذرات خاک که از الک شماره ۲۰۰ ( $0.75\text{mm}$ ) گذشته‌اند تا حدود ( $0.075\text{mm}$ ) به‌کار می‌رود. داده‌های به‌دست‌آمده روی کاغذ نیمه‌لگاریتمی رسم می‌شوند. ممکن است نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش، در امتداد نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز الک در یک کاغذ

رسم شوند. رفتار خاک مخصوصاً خاک‌های چسبنده، بیشتر به نوع و درصد کانی‌های رس، تاریخچه زمین‌شناسی و درصد آب آن بستگی دارد تا به نحوه توزیع دانه‌بندی خاک. در آنالیز هیدرومتری از رابطه بین سرعت متوسط ذرات کروی در مایع، قطر ذرات، وزن مخصوص ذرات، وزن مخصوص مایع و لزجت مایع که در قانون استوکس به‌کار می‌روند، استفاده می‌شود:

$$V = \frac{2(\gamma_s - \gamma_w)}{9\eta} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (1-7)$$

که در آن،

$V$ : سرعت سقوط ذرات کروی (cm/s)،

$\gamma_s$ : وزن مخصوص ذرات خاک (وزن مخصوص = چگالی  $\times \gamma_w$ ) ( $\text{gr/cm}^3$  در سیستم CGS)،

$\gamma_w$ : وزن مخصوص مایع (معمولاً آب. به جدول ۷-۲ مراجعه کنید)،

$\eta$ : لزجت مطلق یا دینامیکی مایع،

$D$ : قطر ذرات خاک (cm) است.

در رابطه فوق، با قرار دادن  $\gamma_w$  (وزن مخصوص آب) به جای  $\gamma_w$ ، مقدار  $D$  برابر خواهد بود با:

$$D = \sqrt{\frac{18\eta V}{\gamma_s - \gamma_w}} \text{ (cm)} \quad (2-7)$$

محدوده قطر ذرات خاک ( $D$ ) برای این معادله برابر است با:  $0.0002 \text{ mm} \leq D \leq 0.2 \text{ mm}$

در این آزمایش ذرات خیلی بزرگ باعث اغتشاش زیاد در مایع و ذرات خیلی کوچک موجب حرکات براونی می‌شوند. مسلماً برای حل معادله بالا، مقدار سرعت ( $V$ ) و مقادیر صحیح  $\gamma_s$  و  $\gamma_w$  لازم است. از آن‌جا که وزن مخصوص آب و لزجت آن همراه با تغییرات دما متغیر است، بدیهی است که این تغییرات باید در محاسبات منظور شوند. برای به‌دست آوردن سرعت سقوط ذرات، از هیدرومتر استفاده می‌شود. هیدرومتر وسیله‌ای است که در اصل برای به‌دست آوردن وزن مخصوص محلول به‌کار می‌رود، ولی می‌توان با تغییر مقیاس از آن برای پیدا کردن سایر مقادیر نیز استفاده کرد.

با مخلوط کردن مقدار معینی خاک در آب و مقدار کمی ماده پراکنده‌ساز برای به‌دست آوردن  $100^\circ\text{C}$  محلول، به محلولی با وزن مخصوص بیشتر از  $1 \text{ gr/cm}^3$  دست خواهیم یافت.

محلول پراکنده‌ساز معمولاً برای خنثی کردن بارهای مثبت و منفی که اغلب روی ذرات ریز خاک پدید می‌آیند، به‌کار می‌رود. این بارها ممکن است باعث چسبیدن ذرات ریز به یکدیگر و ایجاد ذرات درشت‌تر گردند که با توجه به قانون استوکس این ذرات نسبت به ذرات کوچک‌تر با سرعت بیشتری در مایع سقوط می‌کنند. هگزامتافسفات سدیم که متافسفات سدیم ( $\text{NaPO}_3$ ) نیز نامیده می‌شود و سیلیکات سدیم ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) دو ماده‌ای هستند که غالباً به‌عنوان پراکنده‌ساز استفاده می‌شوند. مقدار دقیق و نوع محلول پراکنده‌ساز موردنیاز، به نوع خاک بستگی دارد و با امتحان کردن خاک تعیین می‌شود.

مقدار  $125 \text{ cc}$  از محلول ۴٪ متافسفات سدیم در  $100^\circ\text{C}$  مخلوط آب و خاک معمولاً مناسب است. متافسفات سدیم یک محلول اسیدی تولید می‌کند (کاغذ تورنسل آبی را قرمز می‌کند) و بنابراین می‌توان انتظار

داشت که یک محلول پراکنده‌ساز مؤثر برای خاک‌های قلیایی باشد و در عوض، سیلیکات سدیم محلولی قلیایی تولید می‌کند (کاغذ تورنسل قرمز را آبی می‌کند). بنابراین برای خاک‌های اسیدی یا به عبارتی خاک‌هایی که pH آن‌ها کمتر از ۷ است، مفید است. باید توجه داشت که بیشتر خاک‌های رُسی، قلیایی هستند و وجود نمک‌ها و ناخالصی‌های دیگر ممکن است خاصیت اسیدی ایجاد کند. بنابراین توصیه می‌شود که نمونهٔ محلول خاک و آب قبل از آزمایش برای تعیین pH آزمایش شود تا محلول پراکنده‌ساز مناسب به‌کار گرفته شود.

در آزمایش هیدرومتری معمولاً از هیدرومتر نوع ۱۵۲H استفاده می‌شود. این هیدرومتر برای قرائت اعداد در واحد گرم با  $G_s = ۲/۶۵$  در  $۱۰۰^{\circ}\text{C}$  مخلوط آب و خاک کالیبره شده است و مقدار خاک محلول نباید از  $۶۰\text{ gI}$  تجاوز کند. قرائت‌ها با وزن مخصوص محلول رابطهٔ مستقیم دارند. کالیبره کردن هیدرومتر به این صورت، همان‌طور که بعداً خواهیم دید، باعث سهولت در محاسبات می‌گردد و به همین دلیل استفاده از این هیدرومتر متداول‌تر است، گرچه هیدرومترهای دیگر را نیز می‌توان برای خواندن وزن مخصوص مخلوط آب و خاک به‌کار برد. در این‌گونه هیدرومترها همواره باید دقت شود که جرم خاک استفاده‌شده در  $۱۰۰^{\circ}\text{C}$  آب، بیشتر از  $۶۰\text{ gI}$  نشود تا از اندرکنش دانه‌های خاک و عدم ته‌نشینی یکنواخت جلوگیری شود. همچنین باید توجه داشت که در صورت استفادهٔ بیش از این مقدار، نتایج ضعیفی از قانون استوکس به‌دست می‌آید.

هیدرومتر مقدار وزن مخصوص مخلوط را در مرکز حباب خود نشان می‌دهد (شکل ۷-۱). ذرات خاک در محلول، که بزرگ‌تر از ذراتی هستند که در ناحیهٔ  $L$  (فاصلهٔ بین مرکز حجم حباب و سطح آب) قرار دارند، به زیر مرکز حباب سقوط می‌کنند و دائماً باعث کاهش وزن مخصوص محلول در مرکز حجم حباب هیدرومتر می‌شوند، زیرا با گذشت زمان و کاهش غلظت مواد معلق در مرکز حباب هیدرومتر، همواره در نیمهٔ پایینی حباب غلظت بیش از نیمهٔ بالایی است (به‌خصوص در کف هیدرومتر). بنابراین با گذشت زمان نیروی ارشمیدس افزایش می‌یابد، هیدرومتر به سمت بالا حرکت می‌کند (نحوهٔ شماره‌گذاری هیدرومتر به‌عکس است) و این با توجه به رابطهٔ  $D = K\sqrt{(L/t)}$  نیز قابل‌تحلیل است. از آن‌جا که با گذشت زمان  $D$  در مرکز حباب کاهش می‌یابد،  $L$  نیز باید کاهش یابد، یعنی فاصلهٔ مرکز هیدرومتر با سطح آب کاهش یابد (هیدرومتر بالا رود).

$$V = \frac{L}{t}$$

$$L = L_1 + \frac{1}{4}\left(L_2 - \frac{V_b}{A}\right)$$

$$L_1 \approx ۱۰/۵\text{cm} \quad \text{برای} \quad R = 0^{\circ}$$

$$L_1 \approx ۲/۳\text{cm} \quad \text{برای} \quad R = 5^{\circ}$$

$$L_2 \approx ۱۴\text{cm} \quad (\text{ASTM})$$

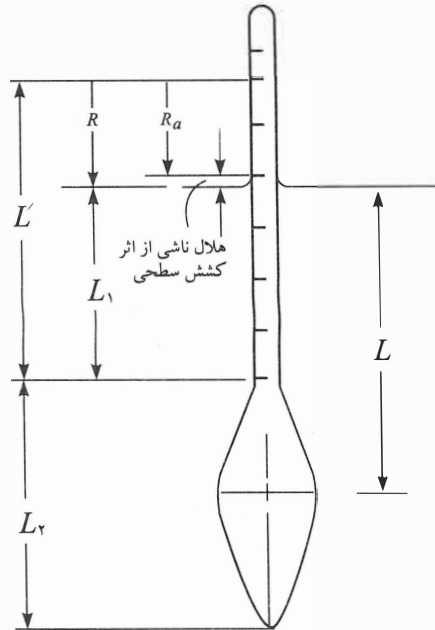
$$V_b \approx ۶۷\text{cm}^3$$

$$A = ۲۷/۸\text{cm}^2 \quad \text{برای استوانهٔ مدرج به حجم } ۱۰۰^{\circ}\text{C}$$

که:

$R_a$ : مقداری که خوانده شده است،

$R$ : مقدار  $R_a$  است که برای اثر کشش سطحی تصحیح شده است.



شکل ۷-۱ ابعاد و قسمت‌های مختلف هیدرومتر.

همچنین به‌خاطر داشته باشید که در آب، مقدار وزن مخصوص (یا چگالی) هنگامی که دما مقداری غیر از  $4^{\circ}\text{C}$  داشته باشد، کاهش می‌یابد که این عامل نیز باعث پایین رفتن بیشتر هیدرومتر در محلول می‌شود. اگر زمانی را که طول می‌کشد تا ذرات فاصله  $L$  را طی کنند،  $t$  در نظر بگیریم، آن‌گاه سرعت سقوط ذرات برابر است با:

$$V = \frac{L}{t}$$

بنابراین لازم است مقدار  $L$  و زمان  $t$  را پیدا کنیم تا مقدار سرعت را برای استفاده در قانون استوکس به‌دست آوریم. آن‌گاه از یک استوانه رسوب‌گذاری مدرج که سطح مقطع ( $A$ ) آن را می‌دانیم استفاده می‌کنیم، هیدرومتر را درون استوانه حاوی آب فرومی‌بریم و تغییرات سطح آب را می‌خوانیم. در این صورت حجم حباب هیدرومتر ( $V_b$ ) را به‌دست می‌آوریم و مقدار  $L$  را نیز برحسب سانتی‌متر محاسبه می‌کنیم. در صورتی که مقادیر  $L_1$  و  $L_2$  برحسب سانتی‌متر و  $V_b$  برحسب سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده باشند:

$$L = L_1 + \frac{1}{4} \left[ L_2 - \frac{V_b}{A} \right] \quad (3-7)$$

با رسم منحنی مربوط به قرائت‌های هیدرومتر (که به مقادیر  $L_1$  مربوط می‌شود)، مقدار  $L$  را برای هر قرائت خواهیم داشت. درحقیقت، از جایی که منحنی به‌صورت خطی درمی‌آید، حدود ۳ نقطه لازم است تا منحنی ( $R$  درمقابل  $L$ ) رسم شود.

از وقتی که هیدرومتر ۱۵۲H به صورت استاندارد واحدگذاری شده است، مقادیر  $L$  با دقت کافی برای تمام کارهای مکانیک خاک، همان طور که در جدول ۶-۷ آمده، قابل محاسبه است و قرائت های هیدرومتر تنها از نظر کشش سطحی باید تصحیح شود؛ زیرا مقدار سرعت سقوط مبهم است و این بدون در نظر گرفتن دما، وزن مخصوص محلول یا سایر مقادیر، به مقدار قرائت  $L$  که در آن ذرات سقوط می کنند بستگی دارد. اگر قطر ذرات و درصد خاک موجود در مخلوط آب و خاک را، که در این مورد درصد ریزدانه است بدانیم، اطلاعات لازم برای رسم منحنی توزیع دانه بندی ذرات خاک موجود خواهد بود.

درصد ریزدانه به طور مستقیم به قرائت هیدرومتر ۱۵۲H بستگی دارد، به شرط آن که وزن مخصوص خاک  $2,765 \text{ gr/cm}^3$  و وزن مخصوص آب  $1 \text{ gr/cm}^3$  باشد.

محلول پراکنده ساز می تواند بر آب مقداری تأثیر داشته باشد و همچنین دمای آزمایش می تواند در حدود  $20^\circ \text{C}$  و  $G_s$  ذرات خاک  $2,765$  نباشد. بنابراین تصحیحاتی برای رسیدن به مقدار واقعی قرائت ها لازم است. دما می تواند با استفاده از حمام آب (اگر موجود باشد) در یک مقدار واحد نگه داشته شود، البته این عمل فقط برای راحتی کار است و ضروری نیست. تأثیرات ناخالصی های آب و محلول پراکنده ساز روی قرائت های هیدرومتر را می توان با به کارگیری یک استوانه رسوب گذاری محتوی همان میزان آب و محلول پراکنده ساز برای درج تصحیحات صفر در نظر گرفت. این ظرف آب باید در همان دمایی که مخلوط آب و خاک قرار دارد، باشد. مقادیر قرائت های کمتر از قرائت ظرف استاندارد حاوی آب، به صورت مقادیر منفی مشخص می گردد و قرائت های بین  $0^\circ$  تا  $60^\circ$  با علامت مثبت مشخص می شود. تمام قرائت ها از بالای قوس ناشی از کشش سطحی، چه در مخلوط و چه در ظرف استاندارد انجام می شود. اگر دما در ظرف استاندارد و ظرف مخلوط زیاد باشد، هیدرومتر بیشتر درون آب فرومی رود. اگر هر دو ظرف دارای دمای یکسانی باشند، تأثیر دما یکسان خواهد بود. بنابراین یک تصحیح واحد دما می تواند برای مخلوط آب و خاک استفاده شود. همان گونه که در جدول ۶-۷ آمده است:

$$R_c = R_a - \text{Zero Correction} + C_T \quad (4-7)$$

$$R_a = R_{\text{actual}} \quad (5-7)$$

$R_c$ : مقدار خاک (gr) در مخلوط آب و خاک در یک زمان مشخص شده  $t$  (این همان است که از رابطه تصحیح شده بالا به دست می آید).

$C_T$ : تصحیح دما.

Zero Correction: تصحیح صفر.

اگر مقدار  $G_s$  برابر  $2,765$  نباشد، می توان از تناسب زیر برای یافتن مقدار  $a$  استفاده کرد:

$$\frac{a}{G_s / (G_s - 1)} = \frac{1}{2,765 / (2,765 - 1)} \quad (6-7)$$

تناسب را برای یافتن  $a$  حل می کنیم:

$$a = \frac{G_s (1,765)}{(G_s - 1)(2,765)} \quad (7-7)$$

درصد ذرات ریزدانه وقتی  $G_s \neq 2,765$ ، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\text{درصد ریزدانه} = \frac{R_c \times a}{W_s} \times 100 \quad (8-7)$$

مقادیر مختلف  $a$  در جدول ۳-۷ داده شده است.  
 $W_s$ : جرم نمونه خاک موجود در مخلوط آب و خاک (gr).  
 برای اهداف محاسباتی، رابطه ۲-۷ دوباره نوشته شده است که در آن  $L$  برحسب سانتی متر و  $t$  برحسب دقیقه به کار رفته تا  $D$  برحسب میلی متر به صورت زیر محاسبه شود:

$$D = \sqrt{\frac{30\eta}{980(G_s - G_w)} \times \frac{L}{t}} \quad (9-7)$$

این رابطه را می توان ساده تر کرد:

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}} \text{ (mm)} \quad (10-7)$$

مقادیر ارزیابی شده  $K = f(T, G_s, \eta)$  برای تمام حالات، در جدول ۵-۷ آمده است [۱].

## ۲-۷ وسایل آزمایش

۱. استوانه رسوب گذاری مدرج با ظرفیت ۱۰۰۰ cc و قطر داخلی ۸۵mm (حداقل ۶۳/۵mm).
۲. هیدرومتر (مدل ۱۵۲H ترجیح داده می شود).
۳. محلول پراکنده ساز (هگزامتافسفات سدیم  $(\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{20})$ ) که اسم تجاری آن کالگون است یا سیلیکات سدیم  $(\text{Na}_2\text{SiO}_3)$ .
۴. حمام ظرف هیدرومتر.
۵. دماسنج مدرج شده تا ۰/۱ درجه که شامل درجات بین ۲+ تا ۴۰+ باشد.
۶. کرنومتر برای اندازه گیری زمان.
۷. ترازو با دقت ۰/۱ gr که ظرفیت آن ۲۰۰ gr باشد.
۸. همزن مکانیکی (mixer).

## ۳-۷ روش انجام آزمایش

(این آزمایش باید گروهی انجام شود).

تذکر: مراحل زیر را هنگامی که حدود ۸۰٪ تا ۹۰٪ ذرات از الک ۲۰۰ عبور کرده، انجام می دهیم.

۱. دقیقاً ۵۰ gr خاک خشک و نرم را با ۱۲۵ cc محلول ۰/۴  $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{20}$  مخلوط می کنیم. یک محلول ۰/۴ متافسفات سدیم می تواند با ۴۰ gr ماده خشک و مقدار کافی آب برای به دست آوردن ۱۰۰۰ cc محلول، حاصل شود. محلول باید به تازگی مخلوط شده و بیش از یک ماه از دست کردن آن نگذشته باشد.
۲. اجازه می دهیم تا مخلوط یک ساعت باقی بماند (استاندارد ASTM مدت ۱۶ ساعت را برای خاک های رسی پیشنهاد می کند، ولی این کار معمولاً لازم نیست). محلول را به ظرف مخلوط کن انتقال می دهیم و مدت ۳ دقیقه مخلوط می کنیم و اگر مخلوط حدود ۱۰ تا ۱۶ ساعت خیس مانده شده است، حدود ۱ دقیقه آن را مخلوط می کنیم. در غیر این صورت ۳ تا ۵ دقیقه مخلوط کردن لازم است.
۳. تمام محتویات ظرف مخلوط کن را به استوانه رسوب گذاری منتقل می کنیم. باید کاملاً مراقب باشیم که هیچ مقداری از مخلوط در مخلوط کن باقی نماند. به آن آب مقطر اضافه می کنیم تا زمانی که حجم کل به ۱۰۰۰ cc برسد.

۴. با استفاده از درپوش لاستیکی یا کف دست، استوانه را واژگون می‌کنیم و دوباره به حال اول برمی‌گردانیم و این عمل را به مدت ۱ دقیقه انجام می‌دهیم تا اختلاط به‌طور کامل انجام شود. پس از پایان ۱ دقیقه استوانه را در محل مناسبی می‌گذاریم و قرائت هیدرومتر را در بازه‌های زمانی زیر (که از آغاز زمان ته‌نشینی خاک محاسبه می‌گردد) یا به تعدادی که مورد نیاز است و بستگی به نمونه و مشخصات مواد مورد آزمایش دارد، انجام می‌دهیم:

۲، ۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۲۵۰، ۱۴۴۰ (دقیقه)

اگر از حمام آب استفاده می‌شود، استوانه رسوب باید در فاصله بین قرائت‌های ۲ و ۵ دقیقه در حمام آب قرار داده شود.

دفعات تکان دادن استوانه در مدت ۱ دقیقه باید در حدود ۶۰ بار باشد که هر واژگونی و سپس به حالت اول بازگرداندن آن ۲ بار محسوب می‌شود. اگر مقداری خاک در کف ظرف باقی مانده باشد، باید هنگام تکان‌های اولیه به وسیله تکان‌های قوی‌تر از استوانه جدا شود.

۵. هنگامی که می‌خواهیم قرائت هیدرومتر را انجام دهیم، ۲۰ تا ۲۵ ثانیه قبل از قرائت، هیدرومتر را درون استوانه رسوب‌گذاری قرار می‌دهیم و پس از قرائت نیز هیدرومتر را خارج می‌کنیم و درون استوانه آب مقطر می‌گذاریم. باید توجه داشت که هیدرومتر را بلافاصله پس از قرائت از محلول خارج کنیم. قرائت‌ها را براساس عدد بالای قوس تشکیل شده در سطح مایع انجام می‌دهیم (در صورتی که قرائت نقطه انتهایی قوس امکان نداشته باشد).

۶. پس از هر قرائت، دمای محلول را با وارد کردن دماسنج در مخلوط آب و نمک اندازه‌گیری می‌کنیم.

## ۴-۷ محاسبات

۱. تصحیحات مربوط به کشش سطحی را روی قرائت‌های هیدرومتر انجام می‌دهیم و برای به‌دست آوردن مقادیر  $L$  از جدول ۶-۷ استفاده می‌کنیم.

اگر مقدار  $G_s$  مشخص نباشد، یک مقدار قابل قبول برای آن از محدوده ۲٫۶۸ تا ۲٫۷۴ فرض می‌کنیم و با داشتن  $G_s$  و دمای آزمایش برای هر قرائت هیدرومتر، از جدول ۵-۷ برای به‌دست آوردن مقدار  $K$  استفاده می‌کنیم. با داشتن مقادیر  $K$ ،  $L$  و زمان در نظر گرفته شده  $t$  برای قرائت‌ها، مقادیر  $D$  را با استفاده از رابطه ۷-۹ محاسبه می‌کنیم (برای راهنمایی بیشتر از جدول ۴-۷ و مثالی که بعداً خواهد آمد، استفاده کنید).

۲. مقدار  $R_c$  تصحیح شده، از رابطه ۴-۷ را در رابطه ۷-۷ می‌گذاریم تا درصد ذرات ریزدانه را که قطر  $D$  مربوط به این ذرات در گام ۱ محاسبه شده، به‌دست آوریم.

۳. داده‌های به‌دست آمده از گام ۱ و ۲ را به‌کار می‌بریم، درصد ذرات ریزدانه را روی همان منحنی به‌دست آمده از آنالیز الک یا روی یک صفحه دیگر رسم می‌کنیم (بستگی به خاک استفاده شده دارد). باید توجه داشت که درصد ریزدانه، مستقل از مقدار خاک استفاده شده در آزمایش است، بنابراین نتایج به‌دست آمده از آنالیز الک را می‌توان با نتایج آنالیز هیدرومتری ترکیب کرد.

۴. روی منحنی، مقادیر  $D_{10}$ ،  $D_{30}$ ،  $D_{60}$ ،  $D_{85}$  را مشخص می‌کنیم (اگر ممکن باشد). برای قسمتی از منحنی که مربوط به هیدرومتری است، درصد رس را مشخص می‌کنیم.

۵. در گزارش:

الف) رابطه ۷-۸ را از رابطه ۲-۷ به‌دست آورید و درستی معادله (۴-۷) را نیز بررسی کنید.

ب) در مورد تأثیری که استفاده  $6^\circ \text{gr}$  یا بیشتر خاک با  $G_s = 2,765$  روی آزمایش می‌گذارد، به جای مقدار تقریبی  $5^\circ \text{gr}$  خاک، نظر دهید.

- ج) تحقیق کنید که چرا هیچ تصحیحی مربوط به کشش سطحی در معادله (۷-۴) انجام نمی‌شود.
- د) استفاده مقدار  $G_s$  اشتباه، مثلاً  $2,768$ ، هنگامی که مقدار صحیح آن  $2,77$  باشد، چه تأثیری دارد؟
- ه) چرا مقادیر  $C_c$  و  $C_u$  هنگامی که بیشتر از  $12\%$  عبوری از الک  $200$  داریم، هیچ مفهومی ندارند؟
- و) دو یا چند کاربرد داده‌های آزمایش هیدرومتری را ذکر کنید.
- ز) چرا وقتی نتایج تجزیه با الک و تجزیه هیدرومتری تلفیق می‌شوند، معمولاً یک عدم پیوستگی در جایی که دو منحنی روی هم قرار می‌گیرند، پیش می‌آید؟

## ۵-۲ بحث در خطا و دقت آزمایش

در آزمایش هیدرومتری عوامل بسیاری وجود دارند که می‌توانند باعث خطا شوند و در عمل نیز هیدرومتری کاربرد کمتری در تعیین منحنی دانه‌بندی دارد و در مجموع دقت چندان بالایی ندارد. برخی از عوامل ایجادکننده خطا در ادامه آورده شده است:

- همان‌طور که گفته شد، این آزمایش برای ذرات با قطر کمتر از  $2\text{mm}$   $0,75^\circ$  دقت کافی ندارد و باید از آزمایش گریز از مرکز استفاده شود [۲].
  - هیدرومتر  $152\text{H}$  برای  $G_s = 2,765$  و دمای  $20^\circ \text{C}$  کالیبره شده است که در صورت عدم استفاده از خاکی با این خصوصیات، باید تصحیحات لازم را انجام دهیم (برخی از جداول تصحیح در پیوست آمده است. البته این جداول از کتاب باولز برای هیدرومتر  $152\text{H}$  است).
  - چون پایه و اساس روش هیدرومتری بر قانون استوکس استوار است، در عمل با مشکلاتی مواجه می‌شویم که برخی از آن‌ها به‌قرار زیر است [۲]:
    - در معادله استوکس باید محیط نیمه‌بی‌نهایت باشد، در صورتی که این جا بدنه غلظت‌سنج کاملاً محیط سیال را محدود کرده است.
    - برخورد و اندرکنش خود ذرات با هم از سرعت واقعی سقوط می‌کاهد.
    - ذرات کروی نیستند.
- خطاهای ۱-۳ و ۲-۳ با محدود کردن ماکزیمم تمرکز خاک در محلول قابل مرتفع شدن هستند. به طوری که تحقیقات نشان می‌دهد، اگر بیش از  $5^\circ \text{gr}$  خاک در  $1000\text{cc}$  محلول استفاده نشود، اثر تقابل ذرات قابل صرف‌نظر کردن است.
- شکل ذرات یا قطر بزرگ‌تر از  $0,5\text{mm}$  را با دقت خوبی می‌توان با کره تقریب زد، اما ذرات ریز غالباً شکل صفحه‌ای دارند و طول یا پهنایشان حدود  $300$  تا  $500$  برابر ضخامت آن‌هاست. در این حالت مقاومت در مقابل سقوط ذره بسیار زیاد است. از طرف دیگر هر ذره‌ای به علت جذب مولکول‌های آب ضخامت بیشتری از ضخامت اصلی‌اش دارد و فیلمی از آب آن را احاطه کرده است (آب جذب سطحی شده، آب مضاعف) و در مجموع  $G_s$  یک ذره با این مشخصات حدود  $1,8$  است در صورتی که  $G_s$  خود خاک  $2,77$  یا  $2,765$



است، درحالی که به دلیل شکل خود ذره، این آب‌های جذب سطحی شده و آب مضاعف سرعت رسوب را بیشتر می‌کنند. در نهایت هیدرومتر قطر ذره را کوچک‌تر از مقدار واقعی اش (پهنا یا طول ذره) نشان می‌دهد. از طرف دیگر Grim نشان داد که کانی مونت‌موریلونیت و تا حدی ایلیت بر اثر جنبش در مخلوط به ذرات ریزتر می‌شکنند. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که اندازه واقعی ذرات در حالت طبیعی را نمی‌توان با روش هیدرومتری یافت [۲].

۴. تقریب ناشی از خطی گرفتن تغییرات  $\gamma_s(h)$  با ارتفاع سقوط نیز یک خطای ناچیز ایجاد می‌کند.

۵. تقریب ناشی از در نظر نگرفتن حجم میله غلظت سنج.

۶. جابه‌جایی غلظت سنج و برخورد ذرات با آن نیز از جمله عوامل ایجاد خطا هستند.

۷. خاک‌های با مواد آلی زیاد یا با اجزای متخلخل مانند زمین‌های جلبکی ممکن است وزن مخصوصی زیر  $20 \text{ kN/m}^3$  و خاک‌های شامل مواد سنگین مانند آن وزن مخصوص بالای  $30 \text{ kN/m}^3$  داشته باشند [۵].

### مثال

(تذکر: این مثال مطابق ASTM نیست.)

آزمایش: آنالیز هیدرومتری

مشخصات خاک مورد آزمایش: رس سیلتی قهوه‌ای

۱۵۲H نوع هیدرومتر

۲٫۷  $G_s$

۰٫۹۹  $a$

NaPO<sub>۳</sub> نوع ماده پراکنده‌ساز

۱۲۵cc مقدار ۴٪ در

۵۰٫۰ gr  $W_s$

+۳٫۰ تصحیح صفر (Zero Correction)

۱٫۰ تصحیح هلالی (کشش سطحی)

مقدار  $C_T$  را از جدول ۷-۴ در دمای  $22^\circ\text{C}$  پیدا می‌کنیم. با استفاده از خط اول جدول ۷-۱:

$$R_c = R_a - \text{Zero Correction} + C_T$$

$$R_c = 49 - 3 + 0.4 = 46.4 \quad a = 0.99$$

$$\text{درصد ریزدانه} = \frac{R_c a}{W_s} \times 100 = \frac{46.4(0.99)(100)}{50.0} = 91.9\%$$

قرائت هیدرومتر را فقط برای کشش سطحی تصحیح می‌کنیم:  $49 + 1 = 50$

$$L = 8.1 \quad (\text{در جدول ۷-۶ برای } R = 50)$$

$$V = \frac{L}{t} = \frac{8.1}{1} = 8.1$$

$$K = 0.0131 \quad (\text{از جدول ۷-۵ با استفاده از } G_s \text{ و } T)$$

$$D = K\sqrt{\frac{L}{T}} = 0,0131\sqrt{\frac{8,1}{1}} = 0,037\text{mm}$$

با استفاده از خط سوم از صفحه داده‌ها:

$$R_c = 43 - 3 + 0,4 = 40,4$$

$$\text{درصد ریزدانه} = \frac{40,4(0,99)(100)}{50,0} = 78,8\%$$

تصحیح قرائت هیدرومتر فقط برای کشش سطحی صورت می‌گیرد:  $43 + 1 = 44$

$$L = 9,1 \quad (\text{با استفاده از جدول ۶-۷})$$

$$K = 0,0131 \quad (\text{با استفاده از جدول ۵-۷})$$

$$D = 0,0131\sqrt{\frac{9,1}{3}} = 0,023\text{mm}$$

جدول ۱-۷

$D$ (mm)	$L$	$\frac{L}{t}$	$L$	قرائت تصحیح شده هیدرومتر فقط برای کشش سطحی $R$	درصد ریزدانه	قرائت تصحیح شده هیدرومتر	$R_c$	قرائت هیدرومتر	دما $^{\circ}\text{C}$	زمان مورد نظر (min)	زمان قرائت	تاریخ
0,037	0,0131	8,1	8,1	50	91,9	46,4	49	22	1	15:30	3,4	
0,027	0,0131	4,2	8,4	48	87,9	44,4	47	22	2	15:30	3,4	
0,023	0,0131	3,03	9,1	44	80,0	40,4	44	22	3	15:30	3,4	
0,020	0,0131	2,3	9,2	43	78,0	39,4	42	22	4	15:30	3,4	
0,015	0,0131	1,26	10,0	38	68,1	34,4	37	22	8	15:30	3,4	
0,011	0,0131	0,69	11,1	32	56,2	28,4	31	22	16	15:30	3,4	
0,0082	0,0131	0,397	11,9	27	46,3	23,4	26	22	30	15:30	3,4	
0,0059	0,0131	0,203	12,2	25	42,4	21,4	24	22	60	16:30	3,4	
0,0042	0,0131	0,102	12,7	22	36,4	18,4	21	22	125	17:35	3,4	
0,0026	0,0129	0,040	13,2	19	31,1	15,7	18	23	330	21:00	3,4	
0,0015	0,0129	0,014	13,5	17	27,1	13,7	16	23	990	8:00	3,5	
0,0013	0,0127	0,0098	13,8	15	23,8	12,0	14	24	1410	15:00	3,5	
0,0009	0,0127	0,0051	14,5	11	15,8	8,0	10	24	2850	15:00	3,6	

جدول ۴-۷ ضرایب تصحیح دما.		جدول ۲-۷ مقادیر آب مقطر.		
$C_T$	دما °C	ویسکوزیته آب (poises)	چگالی آب (gr/cm <sup>3</sup> )	دما °C
-۱,۱°	۱۵	۰,۰۱۵۶۷	۱,۰۰۰۰۰	۴
-۰,۹°	۱۶	۰,۰۱۱۱۱	۰,۹۹۸۹۷	۱۶
-۰,۷°	۱۷	۰,۰۱۰۸۳	۰,۹۹۸۸۰	۱۷
-۰,۵°	۱۸	۰,۰۱۰۵۶	۰,۹۹۸۶۲	۱۸
-۰,۳°	۱۹	۰,۰۱۰۳۰	۰,۹۹۸۴۴	۱۹
۰,۰°	۲۰	۰,۰۱۰۰۵	۰,۹۹۸۲۳	۲۰
+۰,۲°	۲۱	۰,۰۰۹۸۱	۰,۹۹۸۰۲	۲۱
+۰,۴°	۲۲	۰,۰۰۹۵۸	۰,۹۹۷۸۰	۲۲
+۰,۷°	۲۳	۰,۰۰۹۳۶	۰,۹۹۷۵۷	۲۳
+۱,۰°	۲۴	۰,۰۰۹۱۴	۰,۹۹۷۳۳	۲۴
+۱,۳°	۲۵	۰,۰۰۸۹۴	۰,۹۹۷۰۸	۲۵
+۱,۶۵	۲۶	۰,۰۰۸۷۴	۰,۹۹۶۸۲	۲۶
+۲,۰°	۲۷	۰,۰۰۸۵۵	۰,۹۹۶۵۵	۲۷
+۲,۵°	۲۸	۰,۰۰۸۳۰	۰,۹۹۶۲۷	۲۸
+۳,۰۵	۲۹	۰,۰۰۸۱۸	۰,۹۹۵۹۸	۲۹
+۳,۸°	۳۰	۰,۰۰۸۰۱	۰,۹۹۵۶۸	۳۰

$$\text{Poises} = \frac{\text{dynes}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{gr}}{\text{cms}}$$

جدول ۳-۷ مقادیر ضرایب تصحیح  $a$  برای چگالی‌های مختلف خاک.

ضریب تصحیح $a$	وزن واحد مواد جامد خاک (gr/cm <sup>3</sup> )
۰,۹۶	۲,۸۵
۰,۹۷	۲,۸۰
۰,۹۸	۲,۷۵
۰,۹۹	۲,۷۰
۱,۰۰	۲,۶۵
۱,۰۱	۲,۶۰
۱,۰۲	۲,۵۵
۱,۰۴	۲,۵۰

جدول ۵-۷ مقادیر  $K_f$  مورد استفاده در رابطه ۷-۹ برای چگالی‌های مختلف مواد جامد خاک در دماهای مختلف.

مقادیر چگالی‌های مختلف خاک								
۲,۸۵	۲,۸۰	۲,۷۵	۲,۷۰	۲,۶۵	۲,۶۰	۲,۵۵	۲,۵۰	دما (°C)
۰,۰۱۳۶	۰,۰۱۳۷	۰,۰۱۳۹	۰,۰۱۴۱	۰,۰۱۴۴	۰,۰۱۴۶	۰,۰۱۴۸	۰,۰۱۵۱	۱۶
۰,۰۱۳۴	۰,۰۱۳۶	۰,۰۱۳۸	۰,۰۱۴۰	۰,۰۱۴۲	۰,۰۱۴۴	۰,۰۱۴۶	۰,۰۱۴۹	۱۷
۰,۰۱۳۲	۰,۰۱۳۴	۰,۰۱۳۶	۰,۰۱۳۸	۰,۰۱۴۰	۰,۰۱۴۲	۰,۰۱۴۴	۰,۰۱۴۸	۱۸
۰,۰۱۳۱	۰,۰۱۳۲	۰,۰۱۳۴	۰,۰۱۳۶	۰,۰۱۳۸	۰,۰۱۴۰	۰,۰۱۴۳	۰,۰۱۴۵	۱۹
۰,۰۱۲۹	۰,۰۱۳۱	۰,۰۱۳۳	۰,۰۱۳۴	۰,۰۱۳۷	۰,۰۱۳۹	۰,۰۱۴۱	۰,۰۱۴۳	۲۰
۰,۰۱۲۷	۰,۰۱۲۹	۰,۰۱۳۱	۰,۰۱۳۳	۰,۰۱۳۵	۰,۰۱۳۷	۰,۰۱۳۹	۰,۰۱۴۱	۲۱
۰,۰۱۲۶	۰,۰۱۲۸	۰,۰۱۲۹	۰,۰۱۳۱	۰,۰۱۳۳	۰,۰۱۳۵	۰,۰۱۳۷	۰,۰۱۴۰	۲۲
۰,۰۱۲۴	۰,۰۱۲۶	۰,۰۱۲۸	۰,۰۱۳۰	۰,۰۱۳۲	۰,۰۱۳۴	۰,۰۱۳۶	۰,۰۱۳۸	۲۳
۰,۰۱۲۳	۰,۰۱۲۵	۰,۰۱۲۶	۰,۰۱۲۸	۰,۰۱۳۰	۰,۰۱۳۲	۰,۰۱۳۴	۰,۰۱۳۷	۲۴
۰,۰۱۲۲	۰,۰۱۲۳	۰,۰۱۲۵	۰,۰۱۲۷	۰,۰۱۲۹	۰,۰۱۳۱	۰,۰۱۳۳	۰,۰۱۳۵	۲۵
۰,۰۱۲۰	۰,۰۱۲۲	۰,۰۱۲۴	۰,۰۱۲۵	۰,۰۱۲۷	۰,۰۱۲۹	۰,۰۱۳۱	۰,۰۱۳۳	۲۶
۰,۰۱۱۹	۰,۰۱۲۰	۰,۰۱۲۲	۰,۰۱۲۴	۰,۰۱۲۶	۰,۰۱۲۸	۰,۰۱۳۰	۰,۰۱۳۲	۲۷
۰,۰۱۱۷	۰,۰۱۱۹	۰,۰۱۲۱	۰,۰۱۲۳	۰,۰۱۲۴	۰,۰۱۲۶	۰,۰۱۲۸	۰,۰۱۳۰	۲۸
۰,۰۱۱۶	۰,۰۱۱۸	۰,۰۱۲۰	۰,۰۱۲۱	۰,۰۱۲۳	۰,۰۱۲۵	۰,۰۱۲۷	۰,۰۱۲۹	۲۹
۰,۰۱۱۵	۰,۰۱۱۷	۰,۰۱۱۸	۰,۰۱۲۰	۰,۰۱۲۲	۰,۰۱۲۴	۰,۰۱۲۶	۰,۰۱۲۸	۳۰

جدول ۶-۷ مقادیر  $L$  (عمق مؤثر) مورد استفاده در رابطه استوکس (هیدرومتر  $H$  ۱۵۲).

عمق مؤثر $L$ (cm)	قرائت اولیه هیدرومتر (تصحیح شده برای کشش سطحی)	عمق مؤثر $L$ (cm)	قرائت اولیه هیدرومتر (تصحیح شده برای کشش سطحی)	عمق مؤثر $L$ (cm)	قرائت اولیه هیدرومتر (تصحیح شده برای کشش سطحی)
۹٫۴	۴۲	۱۲٫۹	۲۱	۱۶٫۳	۰
۹٫۲	۴۳	۱۲٫۷	۲۲	۱۶٫۱	۱
۹٫۱	۴۴	۱۲٫۵	۲۳	۱۶٫۰	۲
۸٫۹	۴۵	۱۲٫۴	۲۴	۱۵٫۸	۳
۸٫۸	۴۶	۱۲٫۲	۲۵	۱۵٫۶	۴
۸٫۶	۴۷	۱۲٫۰	۲۶	۱۵٫۵	۵
۸٫۴	۴۸	۱۱٫۹	۲۷	۱۵٫۳	۶
۸٫۳	۴۹	۱۱٫۷	۲۸	۱۵٫۲	۷
۸٫۱	۵۰	۱۱٫۵	۲۹	۱۵٫۰	۸
۷٫۹	۵۱	۱۱٫۴	۳۰	۱۴٫۸	۹
۷٫۸	۵۲	۱۱٫۲	۳۱	۱۴٫۷	۱۰
۷٫۶	۵۳	۱۱٫۱	۳۲	۱۴٫۵	۱۱
۷٫۴	۵۴	۱۰٫۹	۳۳	۱۴٫۳	۱۲
۷٫۳	۵۵	۱۰٫۷	۳۴	۱۴٫۲	۱۳
۷٫۱	۵۶	۱۰٫۵	۳۵	۱۴٫۰	۱۴
۷٫۰	۵۷	۱۰٫۴	۳۶	۱۳٫۸	۱۵
۶٫۸	۵۸	۱۰٫۲	۳۷	۱۳٫۷	۱۶
۶٫۶	۵۹	۱۰٫۱	۳۸	۱۳٫۵	۱۷
۶٫۵	۶۰	۹٫۹	۳۹	۱۳٫۳	۱۸
		۹٫۷	۴۰	۱۳٫۲	۱۹
		۹٫۶	۴۱	۱۳٫۰	۲۰