روش هیدرومتری ASTM D422 (Hydrometer Method)

روش هیدرومتری روشی است که برای تعیین دانه بندی خاک‌های ریزدانه مانند رس، لای و ماسه خیلی ریز دانه که ذرات خاک ریزتر از اندازه الک شماره ۲۰۰ (۰.۰۷۵ میلی متر) هستند، اتخاذ می شود و به عبارتی این آزمایش برای تکمیل کردن آزمایش الک است. حد پایین اندازه ذرات تعیین شده توسط این روش حدود ۰.۰۰۱ میلی متر است.

نکته: برخی مراجع خاک حاوی ذرات ریزتر از اندازه الک شماره ۴۰ را برای آزمایش هیدرومتری و حدود اتربرگ مناسب‌تر می‌دانند چراکه ممکن است مقداری از ذرات ریز به ماسه‌های ریز چسبیده باشند و به این طریق وارد آزمایش می‌شوند.

در تجزیه و تحلیل ذرات خاک با هیدرومتر، ابتدا یک نمونه خاک در آب پراکنده می شود. سپس ذرات خاک به مرور زمان به صورت جداگانه ته نشین می شوند. فرض بر این است که ذرات خاک کروی هستند پس در این آزمایش سرعت ذرات را می توان با قانون استوکس به صورت زیر تعیین کرد:

قانون استوکس برای سرعت سقوط یک کره در سیال :

$$V = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\,\mu} \times D^2$$

$$\mathbf{D = \sqrt{\frac{18\mu V}{\gamma_s - \gamma_w}}} \Longrightarrow \quad \mathbf{D(m) = k(\sqrt{m.s})\sqrt{\frac{l\,(m)}{t\,(s)}}} \quad , \quad k = \sqrt{\frac{18\mu}{(G_s - 1)\,\gamma_w}} \quad ,,,,, \quad v = \frac{l}{t}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

$$\gamma_s = G_s\,\gamma_w,\ \gamma_w = 9810\ N/m^3$$

که در روابط بالا:

L: فاصله سطح آزاد آب درون استوانه تا مرکز ثقل هیدرومتر(طول سقوط ذره یا عمق موثر) که در آزمایش هیدرومتری با گذشت زمان تغییر می‌کند. (m)

t: زمان گذشته از شروع آزمایش (s)

D: قطر ذرات معلق خاک در عمق موثر (m)

k: ضریب ثابتی که بستگی به G_s خاک و لزجت آب دارد

V: سرعت سقوط ذرات

γ_s و γ_w : وزن مخصوص آب و ذره

μ: گران‌روی سیال

فرضیات و محدودیت‌های استوکس :

- ذرات کاملا کروی فرض می‌شوند که دانه های خاک رس صفحه ای هستند.
- مایع یا سیال نامنتاهی فرض میشود که ظرف باعث محدود شدن سیال میشود.
- ممکن است γ_s ذرات کمی با هم متفاوت باشند.
- ذرات با هم برخورد دارند و بر سرعت و جهت حرکت همدیگر اثر میگذارند که در قانون استوکس برای یک ذره تعریف میشود
- قانون استوکس برای ذرات $0.2\ \mu m < d < 0.2\ mm$ کاربردی است.
- قانون استوکس در ذرات کوچک‌تر از $0.002\ mm$ صادق نیست چراکه در این حالت پدیده‌ای به نام حرکت براونی مولکول‌های آب، مانع از سقوط ذرات ریز می‌شود.

نکته: به نوعی از حرکت تصادفی ذرات غوطه‌ور در سیال بر اثر برخورد این ذرات با اتم‌ها یا مولکول‌های سیال، حرکت براونی گفته می‌شود.

محدودیت آزمایش: با توجه به استفاده این آزمایش از قانون استوکس، محدودیات و فرضیات آن بر آزمایش صادق است؛ علاوه بر این موضوع این آزمایش برای خاک های نباتی، خاک های حاوی مقادیر کمتر از ۵ درصد از مصالح ریز دانه و خاک های حاوی ناخالصی‌هایی مانند حلال های آلی ، روغن ، آسفالت، قطعات چوب یا موارد مشابه مجاز نیست.

تذکر: در صورتی که ناخالصی ماده ای باشد که به آسانی جدا شود استفاده از این مصالح مجاز است. با این حال اگر ناخالصی به عنوان بخشی از مصالح باشد در این صورت نباید ناخالصی از مصالح جدا گردد.

کاربرد و اهمیت:

۱. تجزیه و تحلیل هیدرومتر برای به دست آوردن توزیع اندازه ذرات کامل خاک های دارای ذرات ریزدانه ضروری است.
۲. توزیع اندازه ذرات به‌دست‌آمده از آزمایش دانه‌بندی با الک ممکن است با داده‌های آزمایش هیدرومتری ترکیب شوند تا یک منحنی دانه بندی کامل ایجاد شود.
۳. می‌توان درصد ذرات سیلت و رس موجود در یک نمونه خاک را از تجزیه و تحلیل هیدرومتر تخمین زد.
۴. اندازه ذرات یکی از معیارهایی است که برای تعیین مناسب بودن خاک برای ساخت جاده، خاکریز، سد و غیره استفاده می‌شود.
۵. اطلاعات به دست آمده از تجزیه و تحلیل اندازه ذرات را می توان برای پیش بینی حرکت خاک-آب در صورتی که آزمایش نفوذپذیری در دسترس نباشد استفاده کرد.

وسایل آزمایش:

- ✓ هیدرومتر: یک وسیله شیشه‌ای شامل دو بخش ساق درجه بندی شده و حباب محتوی هوا و فلزهای بسیار چگال و ریز دانه بوده که دو نوع زیر وجود دارد.
  - **151H** : با این ابزار می‌توان جرم مخصوص مایع را در بازه ۱.۰۳۸ تا ۰.۹۹۵ gr/cm^3 اندازه گیری کرد.
  - **152H** : این نوع هیدرومتر بر مبنای gr/lit می‌باشد و از ۵- تا ۶۰+ درجه بندی شده است. برای مثال اگر در یک ۱ لیتر آب ۶۰gr خاک وجود داشته باشد، عددی که هیدرومتر نشان میدهد ۶۰+ است.

  تذکر: از لحاظ ظاهری این دو هیدرومتر تفاوتی ندارند منتهی فرق اصلی آن‌ها در درجه بندی آن ها می‌باشد.
- ✓ مخلوط کن (یا هر وسیله‌ای و حتی تکان دادن یکنواخت استوانه با دست در صورت نبود مخلوط کن)
- ✓ درپوش لاستیکی (در صورت تکان دادن استوانه با دست)
- ✓ دو استوانه مدرج 1000-cc
- ✓ دماسنج
- ✓ ماده پراکنده‌ساز(جداکننده) ذرات مانند هگزامتا فسفات سدیم
- ✓ کرونومتر(یا هر وسیله اندازه‌گیری زمان)
- ✓ ترازو با دقت ۰.۰۱ گرم
- ✓ آب مقطر (در صورت نبود آب مقطر بایستی مشخصات همان آب مورد استفاده در محاسبات لحاظ شود)

شرح آزمایش :

۵۰ تا ۱۰۰ گرم از خاک رس یا لای (عبوری از الک ۲۰۰ یا ۱۰۰ یا ۴۰) انتخاب می‌کنیم و آن را در ۲۰۰ تا ۳۰۰ سی‌سی آب همراه با غلظت مناسبی از ماده هگزامتا فسفات سدیم ، به‌مدت ۱ الی ۵ دقیقه با مخلوط کن مخلوط می‌کنیم.

بعد از گذشت ۲۴ ساعت، ماده جداساز باعث خنثی شدن بار الکتریکی ذرات رس می‌شود؛ سپس حجم مخلوط را به ۱ لیتر می‌رسانیم و بعد از آن محلول را به کمک مخلوط کن یا با دست به صورت رفت و برگشتی تکان می‌دهیم(۹۰ بار به صورت رفت و برگشتی) و وقتی آن را خوب هم زدیم، بر روی میز قرار می‌دهیم. در همین لحظه دکمه استارت کرنومتر را فشار می‌دهیم و همان لحظه یکی از هیدرومتر ها را به آرامی داخل مخلوط قرار می‌دهیم و رها می‌کنیم.

سپس هیدرومتر را در لحظه ابتدایی ساکن شدن و همین طور در بازه زمانی‌های مختلف(تا ۲۴ ساعت و یا بیشتر) قرائت می‌کنیم و آن را Ra می‌نامیم؛ لازم به ذکر است که در هر بار قرائت زمان کرنومتر و دما را ثبت می‌کنیم.

تصحیحات قرائت با هیدرومتر: موارد قرائت شده با هیدرومتر به روش گفته، برای حالتی که وزن مخصوص خاک ۲.۶۵ و وزن مخصوص آب ۱ و در حرارت ۲۰ درجه سانتیگراد (۶۸ فارنهایت) باشد صحیح است. در غیر اینصورت باید اعداد قرائت شده برحسب وضعیت به روش‌های زیراصلاح شوند:

۱. **تصحیح درجه حرارت (C_t)** : اگر دما ۲۰ درجه نباشد، باید تصحیح انجام شود. مقادیر اصلاحی برای دو نوع هیدرومتر 151H (SG) و ۱۵۲H (Brix) از طریق محاسبگرهای آنلاین می‌توان استفاده نمود که برای نمونه لینک زیر آورده شده است.

https://www.vinolab.hr/calculator/hydrometer-temperature-correction-en۳۱

لازم به ذکر است که علاوه بر محاسبگرهای آنلاین می‌توان از روابطی که از رگرسیون غیر خطی (همچون رابطه پایین) به دست آمده نیز استفاده نمود؛ هر چند ممکن است در مراجع دیگر به صورت دیگری باشد:

$$152H : C_t = -7.6338851+T^\circ \times(1.51062059 + T^\circ \times(- 0.06923056 + T^\circ \times 0.00122483))$$

۲. **تصحیح خاصیت موئینگی یا ساق (C_m)** : به علت خاصیت موئینگی آب، مقدار رویتی کمی بالاتر از مقدار واقعی است بنابراین باید مقدار رویتی را اصلاح کرد. $R_{c1} = R_a + C_m$

۳. **تصحیح ماده جداساز یا تصحیح صفر (C_d)** : علاوه بر هگزامتافسفات سدیم می‌توان از مواد جداساز دیگر نیز استفاده کرد که همگی نیاز به اصلاح دارند. برای تعیین C_d می‌توان محلولی از آب مقطر و هگزامتافسفات به میزان یک لیتر در استوانه مندرج تهیه نمود و اختلاف قرائت هیدرومتر در آب و هگزا و آب خالص همان C_d است. توجه شود که در تمام زمان‌هایی که مخلوط آب، خاک و هگزا قرائت می‌شود نیاز است قرائت‌های آب و هگزا و همین طور آب خالص انجام شود.این روش برای تعیین ضریب اصلاح صفر کاملا دقیق نیست.

$C_d =$ قرائت هیدرومتر در آب خالص − قرائت هیدرومتر در آب با محلول جداساز

۴. **تصحیح چگالی خاک(a)** : اگر چگالی دانه‌های جامد خاک، G_s، برابر با ۲.۶۵ نباشد نیاز به اصلاح دارد که از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$a = \frac{2.65-1}{2.65} \times \frac{G_s}{G_s-G_w} \quad ,,,,, \quad G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

سایر محاسبات

۱. **چگونگی تعیین طول سقوطی یا فرو رفته‌ی هیدرومتر(L)**: برای محاسبه عمق موثر با توجه به نوع هیدرومتر از روابط زیر استفاده می‌کنیم:

$$151H: L = 280.85 - 264.55R_{cl}\ (cm)$$

$$152H: L = 16.295 - 0.164R_{cl}\ (cm)$$

۲. **محاسبه R_{c2}**:

$$151H ,152H : \quad R_{c2} = R_a + C_t - C_d$$

۳. **درصد عبوری اصلاحی برای دو نوع هیدرومتر:**

$$151H: \quad p.p\% = \frac{1606(R_{c2}-1)a}{W_s} \times 100$$

152H: $p.p\% = \frac{R_{c2}\, a}{W_s} \times 100$

۴. **فعالیت خاک رس، A (clay activity) و پتانسیل تورم S:** فعالیت خاک رس تابعی از خاصیت خمیری خاک رس است که خود وابسته به نوع کانی و مقدار درصد وزنی ذرات ریزتر از ۰.۰۰۲ میلی‌تر (C) در خاک است.

- برای محاسبه C بایستی بعد از آنکه PP% را بر حسب D، برای ذرات ریزدانه که از آزمایش هیدرومتری به دست می‌آید ترسیم کردیم، درون یابی انجام داده تا مقدار آن را محاسبه نماییم.
- لازم است در جهت تکمیل آزمایش هیدرومتری، آزمایش حد روانی و خمیری را انجام داده تا بتوانیم نشانه روانی(PI) را محاسبه کرده و آنگاه داریم:

$$A = \frac{PI}{C} \quad \text{(رابطه تجربی)}$$

$$S\left(\frac{lb}{ft^2}\right) = 3.6 \times 10^{-5} \times A^{2.44} \times C^{3.44} \quad \text{(رابطه تجربی)}$$

مثال	میزان فعالیت	A
کائولینیت	غیر فعال	A < 0.75
ایلیت	فعال عادی	0.75 <A <1.25
مونت موریونیت	فعال	A > 1.25

درجه تورم	S
کم	۰-۱.۵
متوسط	۱.۵-۵
زیاد	۵-۲۵
خیلی زیاد	>۲۵

جدول پیشنهادی گزارش کار دانه بندی به روش هیدرومتری:

γ_s	ρ_s	V	W_s

t	Ra	T(C)	C_t	C_m	C_d	γ_w	μ	G_s	$k(\sqrt{ms})$	a	R_{c1}	R_{c2}	L(cm)	D(mm)	p.p%
15 sec															
30															
1 min															
2															
4															
8															
15															
30															
1 hr															
2															
4															
8															
....															
48															

نکات:

۱. هر چقدر زمان بگذرد، چگالی یا وزن مخصوص مخلوط با ته نشین شدن ذرات کاهش و در نتیجه هیدرومتر با گذشت زمان به سمت پایین حرکت می‌کند و از طرفی هم مطابق با رابطه استوکس هرچقدر قطر دانه بزرگتر باشد، سرعت ته نشین شدن آن بیشتر است؛ بنابراین به همین جهت است که می‌توان از این قانون جهت دانه‌بندی ریزدانه ها استفاده کرد.

$$\mathbf{mg = F_b} \Rightarrow \mathbf{mg = \gamma_w v_{\text{فرورفته}}} \Rightarrow \mathbf{mg = \gamma_w A\, h_{\text{فرورفته}}}$$

$$\rho_{\text{جسم}}\, \mathbf{A\, h_{\text{کل}}\, g} = \rho_w\, \mathbf{g\, A\, h_{\text{فرورفته}}} \Rightarrow \frac{h_{\text{فرورفته}}}{h_{\text{کل}}} = \frac{\rho_{\text{جسم}}}{\rho_{\text{سیال}}}$$

۲. با توجه به اینکه در لحظات ابتدایی میزان نشست ذرات خاک بیشتر است توصیه بر آن است که بازه زمانی های نزدیک لحظات اولیه بعد از ساکن شدن استوانه، به هم دیگر نزدیک بوده و به مرور فاصله بازه ها افزایش یابند.

۳. قرائت هیدرومتر، عددی روی آن که با سطح آب هم تراز است باید قرائت شود؛ باید دقت شود که برای جلوگیری از خطا لازم است خواننده عدد هیدرومتر، در موقعیتی خود را قرار دهد تا دقیقا چشمانش در راستای سطح آب عمود باشد به عبارتی به صورت اریب نگاه نکند.

۴. به جای ماده هگزامتافسفات می‌توان از محلول استوکس استفاده کرد که مقدار آن بسته به غلظت آن متغیر است و مقدار مصرفی آن بر روی قوطی آن درج شده است.

۵. با توجه به اینکه جرم مخصوص جیوه ۱۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب است لذا هیدرومتر نمی‌تواند چگالی جیوه را اندازه بگیرد بلکه اندازه‌گیری چگالی‌های اطراف آب خالص امکان پذیر است.

۶. دلیل استفاده از ماده جداساز آن است که در صورت عدم استفاده، ممکن است دو یا چند ذره خاک به هم چسبیده و نسبت به حالت جدا از هم، ذرات زودتر سقوط کرده و در نتیجه نتایج آزمایش هیدرومتری دچار خطا در شناخت وضعیت خاک می‌شود.