

# دستورالعمل آزمایشهای تراوایی

معاونت امور فنی  
دفتر امور فنی و تدوین معیارها



نشریه شماره ۱۸۸

جمهوری اسلامی ایران  
سازمان برنامه و بودجه - وزارت نیرو

# دستورالعمل آزمایشهای تراوایی

نشریه شماره ۱۸۸

معاونت امور فنی  
دفتر امور فنی و تدوین معیارها

۱۳۷۸



انتشارات سازمان برنامه و بودجه ۷۸/۰۰/۵۰

omoorepeyman.ir

## فهرستبرگه

سازمان برنامه و بودجه . دفتر امور فنی و تدوین معیارها  
دستورالعمل آزمایشهای تراوایی/سازمان برنامه و بودجه، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و  
تدوین معیارها؛ وزارت نیرو، [طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور].- تهران: سازمان  
برنامه و بودجه ، مرکز مدارک اقتصادی - اجتماعی و انتشارات، ۱۳۷۸.  
۵۰ ص.: مصور، جدول، نمونه، نمودار.- (سازمان برنامه و بودجه. دفتر امور فنی و تدوین  
معیارها؛ نشریه شماره ۱۸۸

ISBN 964-425-164-4

فهرستنویسی بر اساس اطلاعات فیبا.

کتابنامه: ص. ۴۹-۵۰

۱. آب - مهندسی - استانداردها. ۲. خاک - مکانیک. ۳. آب - منابع. الف. ایران. وزارت نیرو.  
طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور. ب. سازمان برنامه و بودجه. مرکز مدارک اقتصادی -  
اجتماعی و انتشارات. ج. عنوان.

۶۲۷/۰۲۱۸

TC ۱۴۵/س۲د۵

[TA ۳۶۸]

۷۸-۱۶۹۶۵ م

کتابخانه ملی ایران

ISBN 964-425-164-4

شابک ۹۶۴-۴۲۵-۱۶۴-۴

### دستورالعمل آزمایشهای تراوایی

تهیه کننده: معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها

ناشر: سازمان برنامه و بودجه. مرکز مدارک اقتصادی - اجتماعی و انتشارات

چاپ اول: ۵۰۰ نسخه، ۱۳۷۸

قیمت: ۳۵۰۰ ریال

چاپ و صحافی: موسسه زحل چاپ

همه حقوق برای ناشر محفوظ است.



omoorepeyman.ir



جمهوری اسلامی ایران  
سازمان برنامه و بودجه  
دفترتربس

تاریخ: .....  
شماره: .....  
پیوست: .....

بسمه تعالی

شماره: ۱۰۲/۴۹۴۳-۵۴/۴۳۰۳	به: تمامی دستگاههای اجرایی و مهندسان مشاور
تاریخ: ۱۳۷۸/۸/۱۶	
موضوع: دستورالعمل آزمایش های تراوایی	
<p>به استناد ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه کشور و آئین نامه استانداردهای اجرایی طرحهای عمرانی این دستورالعمل از نوع گروه <b>دوم</b> مذکور در ماده هفت آئین نامه در <b>یک</b> صفحه صادر می گردد.</p> <p>تاریخ مندرج در ماده ۸ آئین نامه در مورد این دستورالعمل <b>۱۳۷۸/۱۱/۱</b> می باشد.</p> <p>به پیوست نشریه شماره ۱۸۸ دفترا مورفنی و تدوین معیارهای این سازمان با عنوان "دستورالعمل آزمایش های تراوایی" ابلاغ می گردد.</p> <p>دستگاههای اجرایی و مهندسان مشاور می توانند مفاد نشریه مذکور و دستورالعمل های مندرج در آن را ضمن تطبیق با شرایط کار خود در طرح های عمرانی مورد استفاده قرار دهند.</p>	
<p>محمدعلی نجفی معاون رئیس جمهور و رئیس سازمان برنامه و بودجه</p>	



شماره تماس: ۰۲۱۶۱۰۳۰۳۰۳، فاکس: ۰۲۱۶۱۰۳۰۳۰۳

کد پستی: ۱۱۴۹۴۱، آدرس: تهران، تهران بنابر

omoorepeyman.ir

## پیشگفتار

استفاده از ضوابط، معیارها و استانداردها در مراحل تهیه (مطالعات امکان سنجی) مطالعه و طراحی، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری طرح‌های عمرانی بلحاظ توجیه فنی و اقتصادی طرح‌ها، کیفیت طراحی و اجرا (عمر مفید) و هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

نظام فنی و اجرایی طرح‌های عمرانی کشور (مصوبه جلسه مورخ ۱۳۷۵/۳/۲۳ هیأت محترم وزیران) بکارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری در قیمت تمام‌شده طرح‌ها را مورد تأکید جدی قرار داده است. با توجه به مراتب یاد شده و شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، امور آب وزارت نیرو (طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور) با همکاری معاونت امور فنی سازمان برنامه‌بودجه (دفتر امور فنی و تدوین معیارها) براساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه اقدام به تهیه استانداردهای مهندسی آب نموده است.

استانداردهای مهندسی آب با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین شده است:

- استفاده از تخصصها و تجربه‌های کارشناسان و صاحب‌نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاههای اجرایی، سازمانها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره‌برداری و ارزشیابی طرح‌ها.
- پرهیز از دوباره‌کاریها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات تهیه‌کننده استاندارد

ضمن تشکر از اساتید محترم دانشگاه صنعتی اصفهان، برای بررسی و اظهار نظر در مورد این استاندارد، امید است مجریان و دست‌اندرکاران بخش آب، با بکارگیری استانداردهای یاد شده، برای پیشرفت و خودکفایی این بخش از فعالیتهای کشور تلاش نموده و صاحب‌نظران و متخصصان نیز با اظهار نظرهای سازنده در تکامل این استانداردها مشارکت کنند.

دفتر امور فنی و تدوین معیارها

پاییز ۱۳۷۸



## ترکیب اعضای کمیته

نام اعضای کمیته تخصصی زمین‌شناسی مهندسی طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور که در تهیه این استاندارد مشارکت داشته‌اند به ترتیب حروف الفبا به شرح زیر است:

خانم فیروزه امامی	طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور	فوق لیسانس زمین‌شناسی
آقای رسول بنی‌هاشمی	شرکت مهندسین مشاور مهاب‌قدس	فوق لیسانس مهندسی معدن
آقای فریدون بهرامی سامانی	شرکت مهندسین مشاور تماوان	فوق لیسانس زمین‌شناسی مهندسی
آقای عباس رادمان	سازمان مدیریت منابع آب ایران	فوق لیسانس مهندسی معدن
آقای حسن عباسی	کارشناس آزاد	لیسانس زمین‌شناسی
آقای حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	فوق لیسانس مهندسی معدن
آقای حسین معماریان	دانشگاه تهران	دکترای زمین‌شناسی مهندسی



## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	مقدمه
۲	۱- اندازه‌گیری ضریب تراوایی کلی در آزمایشگاه ( $K_s$ )
۲	۱-۱- آشنایی
۲	۲-۱- تعیین ضریب تراوایی در خاکهای دانه‌ای تحت بار آبی ثابت
۱۴	۳-۱- تعیین ضریب تراوایی تحت سطح آب متغیر (بار آبی افتان)
۱۸	۲- اندازه‌گیری ضریب تراوایی در صحرا با آزمایش لوژون
۱۸	۱-۲- آشنایی
۱۹	۲-۲- وسایل مورد نیاز آزمایش
۲۲	۳-۲- آماده‌سازی
۲۴	۴-۲- روش آزمایش
۲۵	۵-۲- ثبت نتایج آزمایش
۲۵	۶-۲- محاسبه ضریب تراوایی
۲۸	۷-۲- دقت آزمایش
۲۹	۸-۲- ارائه نتایج آزمایش لوژون
۳۲	۹-۲- انتخاب عدد لوژون
۳۵	۳- آزمایش تعیین ضریب تراوایی رسوبات ناپیوسته در صحرا با آزمایش لوفران
۳۵	۱-۳- آشنایی
۳۵	۲-۳- وسایل مورد نیاز آزمایش
۳۵	۳-۳- آماده‌سازی
۳۶	۴-۳- روش آزمایش
۴۰	۵-۳- ثبت نتایج آزمایش
۴۲	۶-۳- محاسبه ضریب تراوایی در حالت‌های مختلف
۴۴	- پیوستها، نمودارها و جدولهای نمونه
۴۹	۴- منابع و مآخذ



شناخت مشخصات فیزیکی و مکانیکی پی ساختگاهها برای طراحی یک سازه بهینه از دیدگاه فنی و اقتصادی اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از مهمترین پارامترهای مورد نیاز طراحی در سازه‌های بزرگ به‌ویژه سازه‌های آبی، تراوایی (نفوذپذیری) زمین ساختگاه است.

به زبان ساده تراوایی را می‌توان به معنی قابلیت عبور آب در نظر گرفت. تراوایی یکی از مهمترین پارامترهای تعیین‌کننده ویژگیهای زمین ساختگاه است. بالا رفتن آب در خاک (اثر موینگی) در جهت خلاف نیروی گرانی شسته‌شدن رسوبات ریزدانه (رگاب)، کاهش مقاومت برخی از خاکها در اثر پدیده روانگرایی، نشت آب از مخازن و پی سدها همه در ارتباط با تراوایی زمین ساختگاهها است.

در سنگ بکر، تراوایی به ابعاد فضاهای موجود در سنگ و نحوه ارتباط آنها و میزان اشباع سنگ وابسته است. در توده سنگ، تراوایی بیش از همه متأثر از ناپیوستگیهای سنگ، میزان درجه اشباع و طبیعت تنش اعمال شده است. در خاکها و رسوبات ناپیوسته، تراوایی به عواملی مانند دانه‌بندی، تراکم، تخلخل، پوکی، میزان اشباع و لایه‌بندی وابسته است.

ضریب تراوایی (K) را می‌توان با استفاده از جدول، نمودار یا آزمونهای آزمایشگاهی و صحرایی تعیین کرد. در آزمایشگاه، تراوایی خاک توسط آزمایشهای بار افتان و بار ثابت تعیین می‌شود. در صحرا نیز تراوایی به کمک آزمونهای نشت آب (بار آبی ثابت، بار آبی افتان و بار آبی خیزان<sup>۱</sup>) و یا توسط آزمایش پمپاژ (در چاههای ثقلی یا چاههای آرتزین) انجام می‌شود. در آزمایش پمپاژ میانگین تراوایی مصالح به دست می‌آید. رایج‌ترین آزمایش صحرایی تعیین تراوایی در سنگ، آزمایش لوژون و در خاک، آزمایش لوفران است.



## ۱- اندازه‌گیری ضریب تراوایی کلی در آزمایشگاه ( $K_s$ )

### ۱-۱- آشنایی

برای تعیین ضریب تراوایی آزمایشگاهی، روشهای مختلفی وجود دارد که در تمامی آنها نمونه کوچکی از محیط موردنظر را تحت آزمایش قرار می‌دهند. بدیهی است از آنجا که شرایط محیط آزمایش با شرایط واقعی محدوده مورد مطالعه یکی نیست، لذا ممکن است نتیجه حاصله تا حدودی با تراوایی واقعی متفاوت باشد. از سوی دیگر، مشخصات خود نمونه از قبیل تخلخل، توزیع دانه‌ها و ... نیز ممکن است در طول ارسال نمونه به آزمایشگاه تغییر کند و به این ترتیب نمونه‌های مختلفی که از محیط گرفته می‌شود، غالباً نتایج متفاوتی را به دست می‌دهند. ضریب تراوایی در آزمایشگاه با دوروش سطح آب ثابت (بار آبی ثابت) و سطح آب متغیر (بار آبی افتان) تعیین می‌شود.

### ۲-۱- تعیین ضریب تراوایی در خاکهای دانه‌ای تحت بار آبی ثابت

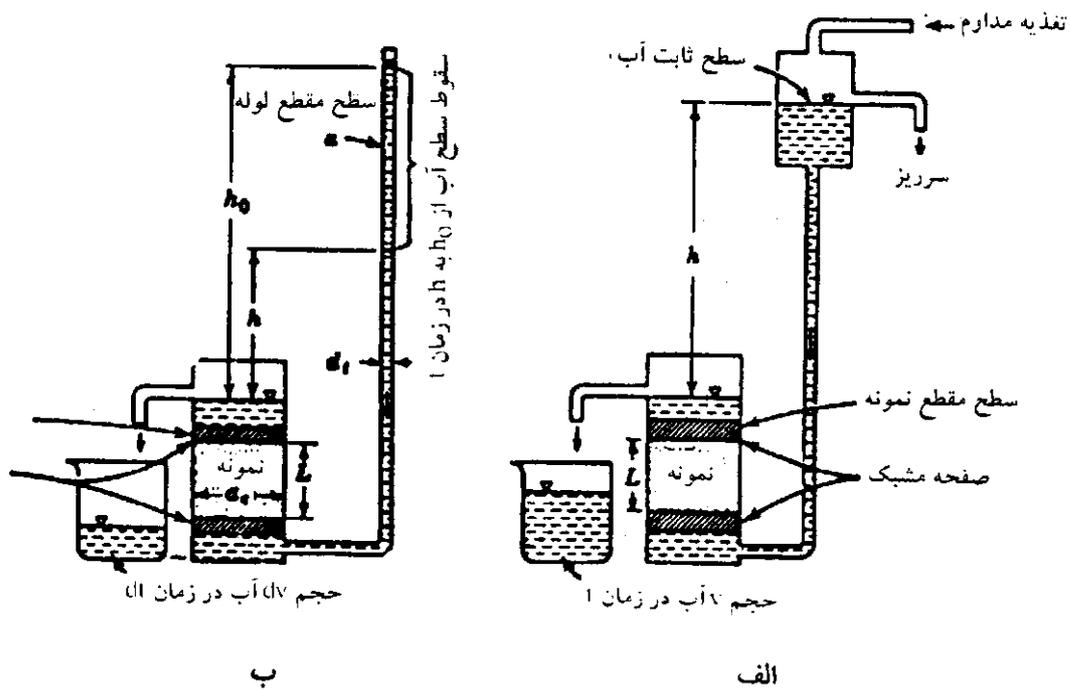
#### ۱-۲-۱- هدف

این آزمایش به منظور تعیین ضریب تراوایی آب در خاکهای دانه‌ای تحت جریان آرام (لایه‌ای یا خطی) انجام می‌گیرد. با این روش مقادیری که برای ضریب تراوایی به دست می‌آید، شاخصی از ضریب تراوایی واقعی در رسوبات طبیعی، خاکریز سدهای خاکی و یا خاکهای دانه‌ای است که در احداث لایه‌های جسم راه به کار می‌روند. لازم به ذکر است برای محدود کردن اثر تحکیم بر روی نمونه به هنگام آزمایش در مورد خاکهایی که بیش از ۱۰ درصد دانه‌های رد شده از الک نمره ۲۰۰ نداشته باشند، بهم خوردگی نمونه خاک جایز است.

#### ۲-۲-۱- مبانی تئوری

یک نمونه از دستگاههایی که برای اندازه‌گیری تراوایی در آزمایشگاه به کار می‌رود، در شکل شماره ۱-الف نشان داده شده است.





شکل ۱- وسایل اندازه‌گیری ضریب تراوایی در آزمایشگاه

به طوری که دیده می‌شود، نمونه مورد آزمایش را پس از اشباع کامل در آب، داخل استوانه‌ای قرار داده و تحت تاثیر فشار ثابت آب قرار می‌دهند. اگر حجم آبی باشد که در زمان  $t$  از نمونه عبور می‌کند، براساس رابطه داری، ضریب تراوایی نمونه از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$Q = \frac{V}{t} = KA \frac{h}{L}$$

و یا

$$K = \frac{VL}{Ath} \quad (1-1)$$

که در آن :

$K$  = ضریب تراوایی

$L$  = طول نمونه

$A$  = سطح مقطع نمونه

$t$  = زمان آزمایش

$h$  = ارتفاع سطح ثابت آب نسبت به سطح آب بالای نمونه

$V$  = حجم آبی که در زمان  $t$  در ظرف جمع شده است



### ۱-۲-۳ اصول آزمایش

برای اینکه آب با حرکت آرام (لایه‌ای) و تحت بار آبی ثابت در خاک حرکت کند، ایجاد شرایط زیر لازم است:

- الف - تداوم جریان آب در خاک بدون تغییر حجم نمونه در طول مدت آزمایش
- ب - جریان آب در خاک، به حالت صد درصد اشباع و بدون خارج شدن حبابهای هوا
- ج - برقراری شرایط جریان دائم و ثابت نگهداشتن شیب هیدرولیکی در طول آزمایش
- د - برقراری نسبت مستقیم بین سرعت جریان و شیب هیدرولیکی تا حد رسیدن به سرعت حد (شروع جریان مغشوش<sup>۱</sup>).

انواع دیگر جریانها از قبیل جریان آب در خاکی که صد درصد اشباع نیست، جریانهای مغشوش و جریانهای غیردائم ماهیت متغیری دارند و ضریب تراوایی متغیر و وابسته به زمان به دست می‌دهند. بنابراین مستلزم آزمایشهای ویژه‌ای هستند.

### ۱-۲-۴ وسایل مورد نیاز

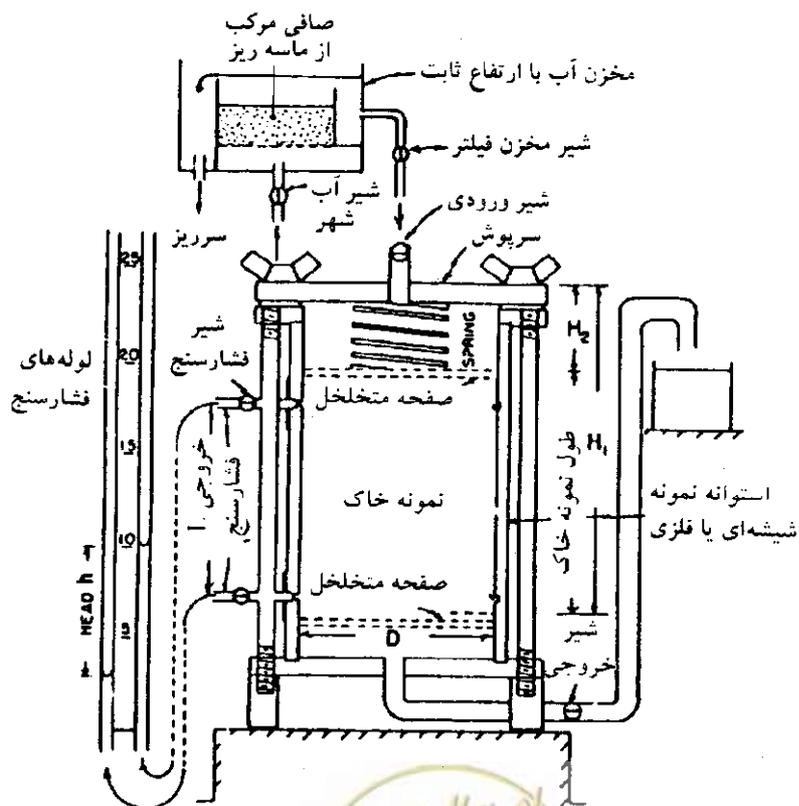
الف - استوانه دستگاه تراوایی سنج - همانطوری که در شکل شماره ۲ نشان داده شده است، استوانه‌ای است به قطر حداقل ۸ تا ۱۲ برابر حداکثر قطر دانه خاک که در جدول شماره ۱ داده شده است. دهانه پائینی استوانه با یک صفحه سنگی متخلخل مسدود می‌شود. به جای صفحه متخلخل می‌توان از یک توری فلزی استفاده کرد. قطر سوراخهای توری فلزی باید آنقدر کوچک باشد که از حرکت دانه‌های ریز خاک جلوگیری کند (معمولاً از قطر ۱۰ درصد دانه‌های ریز نمونه بزرگتر نباشد). در بدنه استوانه تراوایی سنج، دو منفذ خروجی وجود دارد. این منفذها برای اندازه‌گیری افت بار (h) در طول نمونه (L) به کار می‌روند (L طول نمونه و برابر فاصله بین دو مرکز منافذ خروجی است). دهانه بالایی استوانه نیز با یک صفحه سنگی متخلخل مسدود می‌شود (به جای آن می‌توان از توری فلزی که قبلاً ذکر شد، استفاده کرد). بین صفحه متخلخل بالایی و درپوش استوانه یک فنر قرار دارد که به هنگام بسته‌شدن درپوش، نیرویی معادل ۲۲ تا ۵۴ نیوتن به نمونه وارد می‌کند. فشار حاصل از فنر باعث می‌شود که نمونه خاک تا وقتی که به حالت اشباع در می‌آید، تغییر حجم ندهد و در نتیجه وزن مخصوص آن در طول مدت آزمایش تغییر نکند.



جدول شماره ۱- قطر استوانه تراوایی سنج

حداقل قطر استوانه				حداکثر اندازه دانه‌های خاک که بین دو الک قرار می‌گیرند.
بیشتر از ۳۵ درصد تمام خاک مانده روی الک		کمتر از ۳۵ درصد تمام خاک مانده روی الک		
۲ میلی‌متر (شماره ۱۰)	۹/۵ میلی‌متر (شماره ۳)	۲ میلی‌متر (شماره ۱۰)	۹/۵ میلی‌متر (شماره ۳)	۲ میلی‌متر (شماره ۱۰) و ۹/۵ میلی‌متر (شماره ۳)
۱۱۴ میلی‌متر (شماره ۴/۵)	...	۷۶ میلی‌متر (شماره ۳)	...	۹/۵ میلی‌متر (شماره ۳) و ۱۹ میلی‌متر (شماره ۴)
...	۲۲۹ میلی‌متر (شماره ۹)	۱۵۲ میلی‌متر (شماره ۶)	...	...

اخذ شده از استاندارد ASTM-D ۲۴۳۴ (صفحه ۱۹۳)



شکل ۲- دستگاه اندازه‌گیری تراوایی با بار آبی ثابت

ب- مخزن آب با سطح ثابت - ظرفی است با صافی ماسه‌ای و شیرهای کنترل آب که به لوله‌کشی شهر وصل می‌شود. سطح آب در این مخزن در طول آزمایش ثابت است و هوای اضافی موجود در آب نیز خارج می‌شود.

ج- قیف پایه بلند - قیفهای پایه بلند و بزرگ با قطر پایه ۲۵ میلی‌متر (اینچ ۱) برای خاک با دانه‌بندی حداکثر ۹/۵ میلی‌متر (الک ۳/۸ اینچ) و قیفهایی از همان نوع به قطر پایه ۱۳ میلی‌متر (اینچ ۱/۴) برای خاک با دانه‌بندی حداکثر ۲ میلی‌متر (الک نمرة ۱۰) به کار می‌رود. طول پایه قیف باید از حداکثر طول محفظه نمونه خاک بلندتر باشد (حداقل ۱۵۰ میلی‌متر یا ۶ اینچ).

د- وسایل تراکم خاک - وسایلی که در این مورد به کار می‌رود عبارتند از:

کوبنده لرزان و کوبنده لغزان که قطر وزنه سر آنها ۵۱ میلی‌متر (۲ اینچ) است.

میله‌ای با وزنه‌های لغزان ۱۰۰ گرمی (۲۵/۰ پوندی) که از ارتفاع ۱۰۲ میلی‌متر (۴ اینچ) سقوط می‌کند برای کوبیدن خاکهای ماسه‌ای و وزنه‌های ۱۰۰۰ گرمی (۲/۲ پوندی) با ارتفاع سقوط ۲۰۳ میلی‌متر (۸ اینچ) برای کوبیدن خاکهای شنی به کار می‌رود. ارتفاع سقوط برای استفاده در هر دو مورد، قابل تنظیم است.

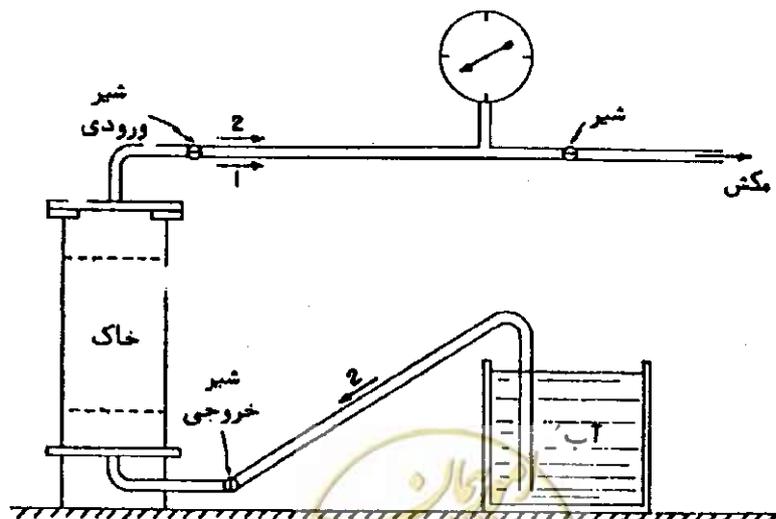
ه- دستگاه مکش - برای تخلیه هوای موجود در خاک و اشباع آن از دستگاه مکش مطابق شکل شماره ۳ استفاده می‌شود.

و- فشارسنج - فشارسنجهای لوله‌ای با مقیاس متریک برای اندازه‌گیری فشار آب به کار می‌روند. این فشارسنجها به بدنه استوانه تراوایی سنج وصل می‌شوند (شکل ۱-۲)

ز- ترازو - ترازو با ظرفیت ۲ کیلوگرم (۴/۴ پوند) و حساسیت ۱ گرم (۰/۰۰۲ پوند)

ح - ملاقه - با ظرفیت ۱۰۰۰ گرم (۲/۲ پوند)

ت - وسایل متفرقه - شامل دماسنج، کرومومتر، بشر ۲۵۰ سانتیمتر مکعبی و سینی فلزی



شکل ۳- دستگاه مکش و اشباع خاک

## ۵-۲-۱ نمونه معرف خاک

نمونه‌ای معرف<sup>۱</sup> از مقداری خاک دانه‌ای که قبلاً در هوا خشک شده است و کمتر از ۱۰ درصد مصالح رد شده از الک ۷۵ میکرونی (نمره ۲۰۰) دارد، با روش چهارقسمتی برای انجام آزمایش تراوایی آماده می‌شود. قبل از آزمایش تراوایی باید نمونه معرف و خشک خاک دقیقاً با روش ASTM D-۴۲۲, AASHTO T-۲۷-۷۴ دانه‌سنجی شود. سپس دانه‌های بزرگتر از ۱۹ میلی‌متر یا باقیمانده روی الک  $\frac{3}{4}$  اینچ نسبت به کل نمونه تعیین و دور ریخته شوند. از مصالح رد شده از الک یادشده با روش استاندارد چهارقسمتی AASHTO T-۲۴۸-۷۴ مقداری نمونه که تقریباً به اندازه دوبرابر حجم استوانه تراوایی است انتخاب می‌شود.

توضیح - اگر منظور به دست آوردن محدوده تغییرات ضریب تراوایی برای خاکهای با دانه‌بندی موجود باشد، باید نمونه‌های معرف با دانه‌بندی ریز، متوسط و درشت از همان خاک تهیه شود.

## ۶-۲-۱ طرز تهیه نمونه خاک

الف - اندازه استوانه دستگاه تراوایی باید با توجه به اندازه دانه‌های خاک و مطابق آنچه که در جدول شماره ۱ داده شده است انتخاب شود.

ب- ابعاد زیر باید دقیقاً به سانتیمتر و یا سانتیمترمربع اندازه‌گیری و در برگ گزارش یادداشت شوند:

- قطر داخلی استوانه تراوایی (D) برای تعیین سطح مقطع آن (A)

- فاصله بین دو منفذ خروجی روی استوانه تراوایی (L) که از مرکز دو منفذ اندازه‌گیری می‌شود.

- فاصله از لبه بالایی درپوش فلزی تا لبه بالایی سنگ متخلخل زیرین ( $H_1$ )

- فاصله از لبه بالایی درپوش فلزی استوانه تا لبه زیرین سنگ متخلخل بالایی ( $H_2$ )

بهتر است فواصل  $H_1$  و  $H_2$  از چهار سوراخ درپوش فلزی استوانه اندازه‌گیری و سپس میانگین گرفته شود.

بدین ترتیب از اختلاف  $H_1$  و  $H_2$  طول نمونه و از حاصلضرب آن در سطح مقطع (A)، حجم خاک داخل استوانه به دست می‌آید.

ج- مقداری از نمونه تهیه شده در قسمت ۵-۲-۱ برای تعیین درصد رطوبت و باقیمانده آن به وزن  $W_1$  برای انجام آزمایش تراوایی به کار می‌رود.

د- نمونه خاک را در استوانه تراوایی در لایه‌های نازک و یکنواخت به یکی از روشهای زیر بریزید به طوری که ضخامت هر لایه تقریباً برابر اندازه بزرگترین قطر دانه خاک شود و یا حداقل به ۱۵ میلی‌متر ( $\frac{10}{6}$  اینچ) برسد.

1 - representative sample



روش ۱- چنانچه اندازه درشتترین قطر دانه خاک، ۹/۵ میلیمتر (۳/۸ اینچ) یا کمتر باشد، قیف پایه بلند متناسب با قطر دانه خاک را اختیار و برای تشکیل اولین لایه، ته لوله آن را روی صفحه سنگ متخلخل زیرین (یا توری فلزی) قرار دهید. برای تشکیل یک لایه قیف را به اندازه کافی از خاک پر کنید (هر بار برای پر کردن قیف از قسمتهای مختلف خاک داخل سینی برداشت شود و باقیمانده خاک نیز مجدداً کاملاً مخلوط شود تا مانع جدایی دانه‌های خاک بر اثر برداشتن نمونه شود). قیف را در استوانه به اندازه ۱۵ میلیمتر یا کمی بیشتر بالا بکشید و با حرکت آرام و دایره‌ای از پیرامون استوانه به طرف مرکز حرکت دهید، تا خاک به طور یکنواخت در یک سطح پخش شود.

روش ۲- چنانچه اندازه درشتترین قطر دانه خاک بزرگتر از ۹/۵ میلیمتر باشد، برای ریختن نمونه از ملاقه استفاده می‌شود. به این ترتیب که ملاقه را از خاک پر کرده و به طور آرام و چسبیده به جدار وارد استوانه می‌کنند و با کج کردن آن می‌توان نمونه را در یک لایه یکنواخت در استوانه تراوایی سنج ریخت.

ه- هر لایه را در استوانه به روشهای زیر متراکم می‌کنند تا وزن مخصوص مورد نظر به دست آید و ارتفاع نهایی نمونه نیز به حدود ۲ سانتیمتر (۰/۸ اینچ) بالاتر از منفذ خروجی بالایی روی استوانه برسد.

روش ۱- با حداقل وزن مخصوص (وزن مخصوص نسبی صفر درصد) که در آن لایه‌های خاک به طریقی که در روشهای ۱ و ۲ در قسمت (د) گفته شد، ریخته می‌شود و احتیاجی به متراکم کردن ندارد.

روش ۲- حداکثر وزن مخصوص (وزن مخصوص نسبی صد درصد) با استفاده از کوبنده لرزان، که در آن هر لایه خاک به طور دقیق با کوبنده لرزنده متراکم می‌شود. باید دقت کرد که انرژی تراکم در تمام سطح لایه به طور یکنواخت وارد شود.

نحوه تماس کوبنده با خاک و زمان بین لرزشهای متوالی در هر نقطه لایه نباید طوری باشد که باعث فرار دانه‌های خاک از زیر کوبنده شده و در نتیجه باعث شل شدن خاک آن لایه شود، بلکه باید تعداد لرزه‌های وارده به خاک به اندازه‌ای باشد که حداکثر وزن مخصوص به دست آید و این در صورتی است که به هنگام لرزش کوبنده، از اطراف آن دانه‌های خاک حرکت پرتابی نداشته باشند.

روش ۳- حداکثر وزن مخصوص با استفاده از کوبنده لغزان - هر لایه را به طور دقیق با تعداد ضربه‌های معینی که به طور یکنواخت در تمام سطح لایه وارد می‌شود، متراکم سازید. ارتفاع سقوط باید با توجه به درشتی دانه‌ها و مقدار شن موجود در نمونه تنظیم شود، تا حداکثر وزن مخصوص به دست آید.

روش ۴- می‌توانید حداکثر وزن مخصوص را با استفاده از سایر روشهای تراکم مثل لرزاننده‌های فشاری به دست آورید. باید دقت شود که نمونه به طور یکنواخت و بدون جدایی دانه‌ها از هم آماده شود.



روش ۵- وزن مخصوص نسبی متوسط بین صفر تا صد درصد - برای به دست آوردن درصد وزن مخصوص نسبی دلخواه نمونه خاک باید در استوانه‌ای کاملاً مشابه استوانه تراوایی و در شرایط یکسان با یکی از روشهای تراکم، تراکم شود و سپس با همان شرایط نمونه در استوانه تراوایی قرار داده شود.

توضیح: برای مقایسه همانندی وزن مخصوص نسبی در لایه‌های رسوبات طبیعی و خاکریزهای تراکم شده (در جسم راهها و سدهای خاکی) باید یک سری آزمایش تراوایی به عمل آید تا حدود درصد وزن مخصوص نسبی در دو نوع خاک با تراکم طبیعی و مصنوعی به دست آید.

### ۷-۲-۱ آماده کردن نمونه برای آزمایش تراوایی

الف- صفحه متخلخل بالایی را در جای خود قرار دهید و با حرکت آرام و چرخشی سطح نمونه را صاف و مسطح کنید.

ب- فتر روی صفحه متخلخل و واشر آب‌بندی لبه استوانه را در جای خود قرار دهید و درپوش فلزی استوانه تراوایی را با فشار آوردن روی آن محکم ببندید. ارتفاع نمونه  $(H_1 - H_2)$  را دقیقاً با اندازه‌گیری  $H_1$  و  $H_2$  به دست آورید. (یادآوری می‌شود که ارتفاعهای  $H_1$  و  $H_2$  از چهارنقطه اندازه‌گیری و سپس میانگین گرفته می‌شود). وزن نهایی نمونه خشک در استوانه از تفریق وزن اولیه خاک  $W_1$  و وزن باقیمانده در سینی  $W_2$  به دست می‌آید و به این ترتیب وزن مخصوص، ضریب تخلخل و درصد وزن مخصوص نسبی اولیه محاسبه و در برگ گزارش یادداشت می‌شود.

ج- استوانه تراوایی را به دستگاه مکش وصل کنید و به مدت حداقل ۱۵ دقیقه تحت فشار ۵۰ سانتیمتر (۱۲۰ اینچ) جیوه هوای داخل خلل و فرج نمونه و چسبیده به دانه‌های خاک را از آن خارج کنید. به دنبال عمل تخلیه هوا استوانه را از پایین به مخزن آب وصل کنید و بگذارید تا نمونه به آرامی کاملاً اشباع شود (مطابق شکل شماره ۳). عمل اشباع نمونه را می‌توان با استفاده از آب بدون هوا و یا آبی که دمای نسبتاً بالایی دارد کاملتر انجام داد که در حالت اخیر آب گرم ضمن عبور از نمونه با از دست دادن حرارت اختلاف بار حرارتی ایجاد می‌کند و هوای داخل خاک را کاملاً خارج می‌کند. آب شهر که برای آزمایش تراوایی به کار می‌رود معمولاً حاوی مقدار کمی کانیها و یا املاح محلول است. به هر صورت خصوصیات آب مصرفی باید در برگ گزارش ذکر شود.

د- وقتی که نمونه خاک کاملاً اشباع شد (مقدار خروج آب در واحد زمان ثابت شد) و استوانه تراوایی از آب پرشد، شیر ته استوانه را که مربوط به خروج آب است ببندید (از این شیر آب در ابتدا به منظور اشباع خاک استفاده می‌شود). همچنین دستگاه مکش را جدا کنید. در این مرحله باید دقت شود که به هنگام وصل استوانه تراوایی به مخزن آب که به وسیله شیر ورودی صورت می‌گیرد، لوله‌های پیژومتر خالی از هوا باشند و به خوبی کار کنند. به این ترتیب بهتر است ابتدا شیر ورودی آب را کمی باز کنید تا لوله اتصال بین مخزن آب و استوانه از آب پر شود سپس آن را به استوانه وصل کنید و آنگاه شیر ورودی را به آرامی کاملاً باز کنید. شیرهای دومنفذ

خروجی روی استوانه را نیز به آهستگی باز کنید تا آب جریان یابد و هیچگونه حباب هوا در آنها باقی نماند. لوله‌های پیزومتر را پر از آب کرده و به دو منفذ خروجی روی استوانه وصل کنید. سپس شیر ورود آب را ببندید و شیر خروج آب را که در ته استوانه است باز کنید و منتظر شوید تا آب در دو لوله پیزومتر به یک سطح پایدار با اختلاف بار صفر (بارآبی صفر) برسد (شکل شماره ۲).

### ۸-۲-۱ روش آزمایش

الف - شیر آب ورودی (متصل به مخزن آب با سطح ثابت) را آهسته باز کنید. برای اندازه‌گیری شدت جریان آب مدتی صبر کنید تا آب جریان یابد و به حالت پایدار درآید و سطح آب در پیزومترها نیز ثابت بماند و تغییرات قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد. سپس با شروع از زمانی معین (توسط کرومومتر) زمانهای منقضى (t) که در طول آن زمان مقدار (v) لیتر آب در نمونه جریان یافته است، بارآبی h (اختلاف ارتفاع آب در دو پیزومتر)، شدت جریان آب (Q) و دمای آب (T) را اندازه بگیرید و در برگ گزارش ثبت کنید.

ب - آزمایش را بار دیگر با افزایش بارآبی  $h=0.5$  سانتیمتر تکرار کنید تا دقیقاً بتوان حدود تغییرات جریان آرام یا پایدار آب را با سرعت V،  $(V = \frac{Q}{At})$  که نسبت مستقیم با شیب هیدرولیکی  $(i = \frac{h}{L})$  دارد، مشخص کرد. وقتی که نسبت خطی بین V و  $(V=ki)$  به تدریج از بین رفت، نشانگر ابتدای تشکیل جریان غیرخطی یا مغشوش است. با اختلاف بارآبی ۱ سانتیمتر ممکن است آزمایش ادامه پیدا کند تا اینکه محدوده جریان مغشوش مشخص شود.

توضیح: برای تامین و برقراری جریان آرام (خطی) آب در خاک، شیب هیدرولیکی  $h/L$  باید خیلی کم باشد. در این مورد مقادیر زیر برای شیب هیدرولیکی پیشنهاد می‌شوند:

خاک شل یا متراکم نشده ۰/۲ تا ۰/۳

خاک متراکم ۰/۳ تا ۰/۵

مقادیر کمتر شیب هیدرولیکی برای خاکهای دانه درشت و مقادیر بیشتر در محدوده فوق برای خاکهای دانه‌ریز قابل قبول است.

ج - برای تکمیل آزمایش تراوایی نمونه را زهکشی کرده و تحقیق کنید که خاک داخل استوانه همگن و ایزوتروپ بوده است یا خیر، تشکیل لایه‌های متناوب روشن و تاریک در طول نمونه گواه بر تفکیک دانه‌های درشت و ریز است که باعث ناهمگنی خاک می‌شود.

### ۹-۲-۱ محاسبه

الف - همانطوری که گفته شد ضریب تراوایی تحت بارآبی ثابت (k) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K = \frac{VL}{Aht}$$



که در آن

$$K = \text{ضریب تراوایی بر حسب سانتیمتر بر ثانیه}$$

$$V = \text{حجم آبی که در خاک جریان یافته بر حسب سانتیمتر مکعب}$$

$$L = \text{فاصله مراکز دو منفذ خروجی روی استوانه بر حسب سانتیمتر}$$

$$A = \text{سطح مقطع نمونه بر حسب سانتیمتر مربع}$$

$$t = \text{زمان بر حسب ثانیه}$$

$$h = \text{اختلاف سطح آب در دو پیزومتر (اختلاف بار آبی) بر حسب سانتیمتر}$$

ب - ضریب تراوایی که در دمای آزمایشگاه به دست می آید باید در ضریب تصحیح حرارتی ضرب شود تا ضریب تراوایی در دمای استاندارد ۲۰ درجه سانتیگراد (۶۸ فارنهایت) به دست آید. ضریب تصحیح حرارتی عبارت است از نسبت ضریب گرانروی آب در دمای آزمایش بر ضریب گرانروی آن در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد (جدول شماره ۲).

رابطه ضریب تراوایی با ضریب گرانروی به صورت زیر تعریف می شود:

$$K = \frac{\gamma}{\eta} K' \quad (2-1)$$

که در آن:

$$K = \text{ضریب تراوایی}$$

$$\gamma = \text{وزن مخصوص آب}$$

$$\eta = \text{ضریب گرانروی}$$

$$K' = \text{ضریب مطلق است که به ساختمان خاک بستگی دارد}$$

## ۱-۲-۱۰ گزارش

به طور خلاصه مطابق آنچه که گفته شد در گزارش آزمایش تراوایی تحت بار آبی ثابت، درج اطلاعات زیر ضروری است (جدول شماره ۳ و فرم پیوست شماره ۱):

الف - نام پروژه، تاریخ انجام آزمایش، شماره نمونه، محل نمونه برداری، عمق نمونه و اطلاعات مناسب دیگر

ب - منحنی های دانه بندی و طبقه بندی خاک، حداکثر قطر دانه های خاک و درصد مصالحی که در آزمایش به کار نمی روند

ج - وزن مخصوص خشک، ضریب تخلخل، درصد وزن مخصوص نسبی، حداقل و حداکثر وزن مخصوص

د - محاسبات براساس اطلاعات و اعداد به دست آمده روی برگ آزمایش

جدول ۲- ضریب گرانروی آب در دماهای مختلف بر حسب سانتی پواز

دما، درجه سانتیگراد	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹
۱۰	۱/۳۰۱۲	۱/۲۹۷۶	۱/۲۹۴۰	۱/۲۹۰۳	۱/۲۸۶۷	۱/۲۸۳۱	۱/۲۷۹۵	۱/۲۷۵۹	۱/۲۷۲۲	۱/۲۶۸۶
۱۱	۱/۲۶۵۰	۱/۲۶۱۵	۱/۲۵۸۰	۱/۲۵۴۵	۱/۲۵۱۰	۱/۲۴۷۶	۱/۲۴۴۱	۱/۲۴۰۶	۱/۲۳۷۱	۱/۲۳۳۶
۱۲	۱/۲۳۰۱	۱/۲۲۶۸	۱/۲۲۳۴	۱/۲۲۰۱	۱/۲۱۶۸	۱/۲۱۳۵	۱/۲۱۰۱	۱/۲۰۶۸	۱/۲۰۳۵	۱/۲۰۰۱
۱۳	۱/۱۹۶۸	۱/۱۹۳۶	۱/۱۹۰۵	۱/۱۸۷۳	۱/۱۸۴۱	۱/۱۸۱۰	۱/۱۷۷۷	۱/۱۷۴۶	۱/۱۷۱۴	۱/۱۶۸۳
۱۴	۱/۱۶۵۱	۱/۱۶۲۱	۱/۱۵۹۰	۱/۱۵۶۰	۱/۱۵۲۹	۱/۱۴۹۹	۱/۱۴۶۹	۱/۱۴۳۸	۱/۱۴۰۸	۱/۱۳۷۷
۱۵	۱/۱۳۴۷	۱/۱۳۱۸	۱/۱۲۸۹	۱/۱۲۶۰	۱/۱۲۳۱	۱/۱۲۰۲	۱/۱۱۷۲	۱/۱۱۴۳	۱/۱۱۱۴	۱/۱۰۸۵
۱۶	۱/۱۰۵۶	۱/۱۰۲۸	۱/۰۹۹۹	۱/۰۹۷۱	۱/۰۹۴۳	۱/۰۹۱۵	۱/۰۸۸۷	۱/۰۸۵۹	۱/۰۸۰۳	۱/۰۸۰۲
۱۷	۱/۰۷۴۴	۱/۰۷۴۷	۱/۰۷۲۰	۱/۰۶۹۳	۱/۰۶۶۷	۱/۰۶۴۰	۱/۰۶۱۳	۱/۰۵۸۶	۱/۰۵۶۰	۱/۰۵۳۳
۱۸	۱/۰۵۰۷	۱/۰۴۸۰	۱/۰۴۵۴	۱/۰۴۲۹	۱/۰۴۰۳	۱/۰۳۷۷	۱/۰۳۵۱	۱/۰۳۲۵	۱/۰۳۰۰	۱/۰۲۷۴
۱۹	۱/۰۲۴۸	۱/۰۲۲۴	۱/۰۱۹۸	۱/۰۱۷۴	۱/۰۱۴۹	۱/۰۱۲۴	۱/۰۰۹۹	۱/۰۰۷۴	۱/۰۰۵۰	۱/۰۰۲۵
۲۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۷۶	۰/۹۹۵۲	۰/۹۹۲۸	۰/۹۹۰۴	۰/۹۸۸۱	۰/۹۸۵۷	۰/۹۸۳۳	۰/۹۸۰۹	۰/۹۷۸۵
۲۱	۰/۹۷۶۱	۰/۹۷۳۸	۰/۹۷۱۵	۰/۹۶۹۲	۰/۹۶۶۹	۰/۹۶۴۶	۰/۹۶۲۳	۰/۹۶۰۰	۰/۹۵۷۷	۰/۹۵۵۴
۲۲	۰/۹۵۳۱	۰/۹۵۰۹	۰/۹۴۸۷	۰/۹۴۶۵	۰/۹۴۴۳	۰/۹۴۲۱	۰/۹۳۹۹	۰/۹۳۷۷	۰/۹۳۵۵	۰/۹۳۳۳
۲۳	۰/۹۳۱۱	۰/۹۲۹۰	۰/۹۲۶۸	۰/۹۲۴۷	۰/۹۲۲۵	۰/۹۲۰۴	۰/۹۱۸۳	۰/۹۱۶۱	۰/۹۱۴۰	۰/۹۱۱۸
۲۴	۰/۹۰۹۷	۰/۹۰۷۷	۰/۹۰۵۶	۰/۹۰۳۶	۰/۹۰۱۵	۰/۸۹۹۵	۰/۸۹۷۵	۰/۸۹۵۴	۰/۸۹۳۴	۰/۸۹۱۳
۲۵	۰/۸۸۹۳	۰/۸۸۷۳	۰/۸۸۵۳	۰/۸۸۳۳	۰/۸۸۱۳	۰/۸۷۹۴	۰/۸۷۷۴	۰/۸۷۵۴	۰/۸۷۳۴	۰/۸۷۱۴
۲۶	۰/۸۶۹۴	۰/۸۶۷۵	۰/۸۶۵۶	۰/۸۶۳۶	۰/۸۶۱۷	۰/۸۵۹۸	۰/۸۵۷۹	۰/۸۵۶۰	۰/۸۵۴۰	۰/۸۵۲۱
۲۷	۰/۸۵۰۲	۰/۸۴۸۴	۰/۸۴۶۵	۰/۸۴۴۷	۰/۸۴۲۸	۰/۸۴۱۰	۰/۸۳۹۱	۰/۸۳۷۳	۰/۸۳۵۵	۰/۸۳۳۶
۲۸	۰/۸۳۱۸	۰/۸۳۰۰	۰/۸۲۸۲	۰/۸۲۶۴	۰/۸۲۴۶	۰/۸۲۲۹	۰/۸۲۱۱	۰/۸۱۹۳	۰/۸۱۷۵	۰/۸۱۵۷
۲۹	۰/۸۱۳۹	۰/۸۱۲۲	۰/۸۱۰۵	۰/۸۰۸۷	۰/۸۰۷۰	۰/۸۰۵۳	۰/۸۰۳۶	۰/۸۰۱۹	۰/۸۰۰۱	۰/۷۹۸۴
۳۰	۰/۷۹۶۷	۰/۷۹۵۰	۰/۷۹۳۴	۰/۷۹۱۷	۰/۷۹۰۱	۰/۷۸۸۴	۰/۷۸۶۷	۰/۷۸۵۱	۰/۷۸۳۴	۰/۷۸۱۸
۳۱	۰/۷۸۰۱	۰/۷۷۸۵	۰/۷۷۶۹	۰/۷۷۵۳	۰/۷۷۳۷	۰/۷۷۲۱	۰/۷۷۰۵	۰/۷۶۸۹	۰/۷۶۷۴	۰/۷۶۵۷
۳۲	۰/۷۶۴۱	۰/۷۶۲۶	۰/۷۶۱۰	۰/۷۵۹۵	۰/۷۵۷۹	۰/۷۵۶۴	۰/۷۵۴۸	۰/۷۵۳۳	۰/۷۵۱۷	۰/۷۵۰۲
۳۳	۰/۷۴۸۶	۰/۷۴۷۱	۰/۷۴۵۶	۰/۷۴۴۰	۰/۷۴۲۵	۰/۷۴۱۰	۰/۷۳۹۵	۰/۷۳۸۰	۰/۷۳۶۴	۰/۷۳۴۹
۳۴	۰/۷۳۳۴	۰/۷۳۲۰	۰/۷۳۰۵	۰/۷۲۹۱	۰/۷۲۷۶	۰/۷۲۶۲	۰/۷۲۴۸	۰/۷۲۳۳	۰/۷۲۱۸	۰/۷۲۰۴
۳۵	۰/۷۱۸۹	۰/۷۱۷۵	۰/۷۱۶۱	۰/۷۱۴۷	۰/۷۱۳۳	۰/۷۱۲۰	۰/۷۱۰۶	۰/۷۰۹۲	۰/۷۰۷۸	۰/۷۰۶۴

جدول ۳- نمونه‌ای از گزارش آزمایش تراوایی

آزمایش تراوایی آزمایشگاهی (روش آزمایش .....

شماره کار: ۱۰۳/۳	شماره نمونه: ۳	شماره گمانه: ۱	عمق نمونه: ۳ متر																																																																																																				
طول قطعه: $L = ۸/۶$ cm	قطر قطعه: $D = ۱۰/۴۵$ cm	سطح مقطع قطعه $A = ۸۵/۷۲$ cm <sup>۲</sup>	سطح مقطع لوله: $a = ۱۰/۵۴$																																																																																																				
پروژه			توصیف خاک: رس سیلیت‌دار با کمی ماسه ریز																																																																																																				
بار افتان		نمودار دبی - زمان																																																																																																					
بار ثابت		نمودار دبی - زمان																																																																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">بعد از اشباع</th> <th colspan="2">قبل از اشباع</th> </tr> <tr> <th>Δh cm</th> <th>t دقیقه</th> <th>W لیتر</th> <th>t دقیقه</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>۱۰۰</td><td>۱۸</td><td>۰</td><td>۰</td></tr> <tr><td>۵۰</td><td>۴۸</td><td>۰/۰۵</td><td>۱</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۰۸</td><td>۲</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۱۲</td><td>۳</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۱۵</td><td>۴</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۱۸</td><td>۵</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۲۱</td><td>۶</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۲۵</td><td>۷</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۲۷</td><td>۸</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۳۰</td><td>۹</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۳۲</td><td>۱۰</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۳۵</td><td>۱۱</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۳۸</td><td>۱۲</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۴۱</td><td>۱۳</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۴۴</td><td>۱۴</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۴۷</td><td>۱۵</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۴۹</td><td>۱۶</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۵۰</td><td>۱۷</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۵۰</td><td>۱۸</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۵۰</td><td>۱۹</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۵۰</td><td>۲۰</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۵۰</td><td>۲۱</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>۰/۵۰</td><td>۲۲</td></tr> </tbody> </table>		بعد از اشباع		قبل از اشباع		Δh cm	t دقیقه	W لیتر	t دقیقه	۱۰۰	۱۸	۰	۰	۵۰	۴۸	۰/۰۵	۱			۰/۰۸	۲			۰/۱۲	۳			۰/۱۵	۴			۰/۱۸	۵			۰/۲۱	۶			۰/۲۵	۷			۰/۲۷	۸			۰/۳۰	۹			۰/۳۲	۱۰			۰/۳۵	۱۱			۰/۳۸	۱۲			۰/۴۱	۱۳			۰/۴۴	۱۴			۰/۴۷	۱۵			۰/۴۹	۱۶			۰/۵۰	۱۷			۰/۵۰	۱۸			۰/۵۰	۱۹			۰/۵۰	۲۰			۰/۵۰	۲۱			۰/۵۰	۲۲		
بعد از اشباع		قبل از اشباع																																																																																																					
Δh cm	t دقیقه	W لیتر	t دقیقه																																																																																																				
۱۰۰	۱۸	۰	۰																																																																																																				
۵۰	۴۸	۰/۰۵	۱																																																																																																				
		۰/۰۸	۲																																																																																																				
		۰/۱۲	۳																																																																																																				
		۰/۱۵	۴																																																																																																				
		۰/۱۸	۵																																																																																																				
		۰/۲۱	۶																																																																																																				
		۰/۲۵	۷																																																																																																				
		۰/۲۷	۸																																																																																																				
		۰/۳۰	۹																																																																																																				
		۰/۳۲	۱۰																																																																																																				
		۰/۳۵	۱۱																																																																																																				
		۰/۳۸	۱۲																																																																																																				
		۰/۴۱	۱۳																																																																																																				
		۰/۴۴	۱۴																																																																																																				
		۰/۴۷	۱۵																																																																																																				
		۰/۴۹	۱۶																																																																																																				
		۰/۵۰	۱۷																																																																																																				
		۰/۵۰	۱۸																																																																																																				
		۰/۵۰	۱۹																																																																																																				
		۰/۵۰	۲۰																																																																																																				
		۰/۵۰	۲۱																																																																																																				
		۰/۵۰	۲۲																																																																																																				
محاسبه ضریب تراوایی تحت بار آبی افتان		محاسبه ضریب تراوایی تحت بار آبی ثابت																																																																																																					
$K = \frac{aL}{At} \times 2.3026 \log \frac{h_0}{h_1}$ $h_0 = ۱۰۰ \text{ cm}, \quad h_1 = ۵۰ \text{ cm}$ $K = \frac{۱۰/۵۴ \times ۸/۶}{۸۵/۷۲ \times ۳۰ \times ۶۰} \times 2.3026 \log \frac{۱۰۰}{۵۰} = ۴/۱ \times ۱۰^{-۲} \text{ cm/sec}$		$K = \frac{vL}{Aht}$ $h = ۵۹۰ \text{ cm}$ $K = \frac{۵۰۰ \times ۸/۶}{۸۵/۷۲ \times ۵۹۰ \times ۶۰} = ۱/۴ \times ۱۰^{-۳} \text{ cm/sec}$																																																																																																					

تاریخ و امضای آزمایش‌کننده:

### ۳-۱ تعیین ضریب تراوایی تحت سطح آب متغیر (بار آبی افتان)

#### ۱-۳-۱ هدف

این آزمایش به صورت استاندارد در ASTM و AASHTO شرح داده نشده است. بحث عمومی راجع به آزمایش تراوایی تحت بار آبی ثابت در مورد این آزمایش با اختلاف جزئی در دستگاه و وسایل مورد استفاده قابل قبول است. محدودیتهایی که درباره آزمایش تراوایی تحت بار آبی ثابت وجود دارد مثل طولانی بودن زمان آزمایش به خصوص در خاکهای ریزدانه که خود مشکل کنترل تبخیر آب در مخزن و لوله‌های مسیر آب را به وجود می‌آورد، همچنین مقدار آب زیادی که مصرف می‌شود تا سطح آب در طول مدت آزمایش در مخزن ثابت بماند، باعث می‌شود که بعضی مواقع روش با سطح آب متغیر ترجیح داده شود. در این آزمایش از روش بولز<sup>۱</sup> (۱۹۸۱) استفاده می‌شود. این آزمایش برای تعیین تراوایی در خاکهای ریزدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

#### ۲-۳-۱ مبانی تئوری

وسیله‌ای که برای تعیین تراوایی با این روش به کار می‌رود در شکل ۱-ب نشان داده شده است. در این روش، نمونه تحت فشار متغیر آب واقع می‌شود. برای این کار، لوله را تا درجه معینی ( $h_0$ ) از آب پر می‌کنند و زمان لازم برای رسیدن آن به ارتفاع معین ( $h_1$ ) را اندازه می‌گیرند. اگر  $dv$  حجم آبی باشد که در زمان کوچک  $dt$  از نمونه عبور می‌کند (تحت فشار  $h$ )، طبق رابطه داری خواهیم داشت:

$$Q = \frac{dv}{dt} = KA \frac{h}{L} \quad \text{یا} \quad dv = \frac{KhAdt}{L} \quad (3-1)$$

اگر  $a$  سطح مقطع لوله باشد، حجم  $dv$  در عین حال برابر سطح مقطع  $a$  در تغییر ارتفاع آب در لوله ( $dh$ ) خواهد بود. یعنی:

$$dv = -adh \quad (4-1)$$

علامت منفی به خاطر آن است که تغییرات دیفرانسیلهای  $v$  و  $h$  در خلاف جهت یکدیگر است. اگر در رابطه ۳-۱ به جای  $dv$  از رابطه ۴-۱ مقدار قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$-adh = \frac{KhAdt}{L}$$



این رابطه را می توان به صورت زیر مرتب کرد:

$$\frac{dh}{h} = \frac{KAdt}{aL} = \frac{Kd_c^\gamma dt}{d_c^\gamma L} \quad (5-1)$$

در این رابطه  $d_t$  و  $d_c$  به ترتیب قطر استوانه و لوله است. اگر رابطه ۵-۱ را در حدود  $\frac{t=0}{h=h_0}$  و  $\frac{t=t_1}{h=h_1}$  انتگرال گیری کنیم، خواهیم داشت:

$$[\ln h]_{h_1}^{h_0} = \frac{-Kd_c^\gamma}{Ld_t^\gamma} [t]_{t_1} \quad (6-1)$$

که در آن:

$t_1$  = مدت زمان لازم برای کاهش سطح آب در لوله از  $h_0$  به  $h_1$  است.

و یا

$$\ln \frac{h_0}{h_1} = \frac{Kd_c^\gamma}{Ld_t^\gamma} t \quad (7-1)$$

اگر رابطه ۶-۱ را بر حسب  $K$  حل کنیم، خواهیم داشت:

$$K = \frac{d_t^\gamma L}{d_c^\gamma t_1} \ln \frac{h_0}{h_1} \quad \text{یا} \quad K = \frac{al}{At} \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (8-1)$$

و بر حسب لگاریتم اعشاری خواهیم داشت:

$$K = 2.30 \frac{d_t^\gamma + L}{d_c^\gamma t_1} \log \frac{h_0}{h_1}$$

به کمک دستگاههای یاد شده می توان انواع نمونه های متراکم یا نامتراکم را مورد آزمایش قرار داد.

در این آزمایش نیز درجه اشباع باید به ۱۰۰٪ نزدیک باشد و برای قطرهای مختلف لوله و یا مقادیر مختلف  $h_0$  و  $h_1$  آزمایش تکرار شود.



### ۳-۳-۱ وسایل مورد نیاز

- الف - استوانه تراوایی - همانطوری که در شکل شماره ۴ دیده می‌شود، استوانه‌ای است که قطر آن متناسب با درشتی دانه‌های خاک انتخاب می‌شود (مانند آنچه که در قسمت ۱-۲-۳ گفته شد).
- ب - بورت: لوله‌ای است شیشه‌ای باریک مدرج یا غیرمدرج
- ج - وسایل دیگر مانند آنچه که در قسمت ۱-۲-۳ به آن اشاره شد.

### ۴-۳-۱ نمونه خاک، طرز تهیه و آماده کردن آن برای آزمایش تراوایی

انتخاب نمونه خاک، طرز تهیه و آماده کردن آن برای آزمایش به همان صورتی است که در آزمایش تحت بار آبی ثابت گفته شد.

### ۵-۳-۱ روش آزمایش

- الف - وقتی که نمونه خاک کاملاً اشباع و استوانه تراوایی از آب پرشد، شیر ته استوانه را که مربوط به خروج آب است ببندید و همچنین دستگاه مکش را جدا کنید. مطابق شکل شماره ۳ در این مرحله باید سعی شود که به هنگام وصل کردن استوانه به بورت و یا لوله مدرج دیگر (بورت در این آزمایش به جای مخزن آب با سطح ثابت است) که توسط یک لوله رابط پلاستیکی انجام می‌گیرد، لوله دبورت خالی از هوا باشند. به این ترتیب بورت و لوله رابط را پراز آب کرده و سپس به استوانه وصل کنید. آب در نمونه خاک به جریان در خواهد آمد. وقتی که آب در بورت به سطح مشخصی (به نشانه روی بورت) رسید سریعاً ارتفاع آب یا بار آبی روی نمونه،  $h_0$  را اندازه بگیرید و در همان لحظه زمان شروع آزمایش را نیز یادداشت کنید (مراجعه به شکل شماره ۴).
- ب - همانطوری که آب در نمونه جریان می‌یابد و مرتباً بار آبی کاهش پیدا می‌کند، انقضای زمانهای مختلف آزمایش را طبق استاندارد آزمایش قبلی ثبت کنید. آزمایش را آنقدر ادامه دهید تا آب بورت کاملاً خالی شود و یا به پایین‌ترین نشانه برسد. در این حال، ارتفاع یا بار آبی  $h_1$  را اندازه بگیرید و همزمان با آن زمان توقف آزمایش را یادداشت کنید. دمای آب در شرایط آزمایش باید اندازه‌گیری و یادداشت شود.
- ج - آزمایش را حداقل سه بار تکرار کنید و هر دفعه دقیقاً ارتفاعهای  $h_0$  و  $h_1$  و زمانهای منقضی مربوط به آنها را یادداشت و سعی کنید که هر بار در همان ارتفاعهای اولیه آزمایش تکرار شود. اگر چنانچه از بورت بدون درجه‌بندی استفاده شود، برای به دست آوردن سطح مقطع آن مقدار آب خارج شده از نمونه را در یک ظرف مدرج جمع‌آوری کنید. حجم آب را بر طول بورت  $h_0-h_1$  تقسیم کنید تا سطح مقطع به دست آید. بهتر است از آب جمع‌آوری شده حاصل از سه آزمایش میانگین گرفته شود تا سطح مقطع دقیقتر به دست آید.
- د - با اندازه‌گیری دمای آزمایش، ضریب تراوایی در استاندارد ۲۰ درجه سانتیگراد و با استفاده از جدول شماره ۳ به دست خواهد آمد (مانند آنچه که در آزمایش تحت بار آبی ثابت بیان شد).

همانگونه که دیدیم ضریب تراوایی K در این حالت از رابطه زیر به دست می آید:

$$K = \frac{d_{i_1}^2 L}{d_c^2 t_1} \ln \frac{h_0}{h_1}$$

و یا

$$K = \frac{al}{At_1} \ln \frac{h_0}{h_1} = \frac{al}{At_1} 2.3026 \log \frac{h_0}{h_1}$$

که در آن :

a = سطح مقطع بورت یا هر لوله باریک دیگر که مورد استفاده قرار گرفته است (بر حسب سانتیمتر مربع)

L = طول نمونه در استوانه تراوایی (بر حسب سانتیمتر)

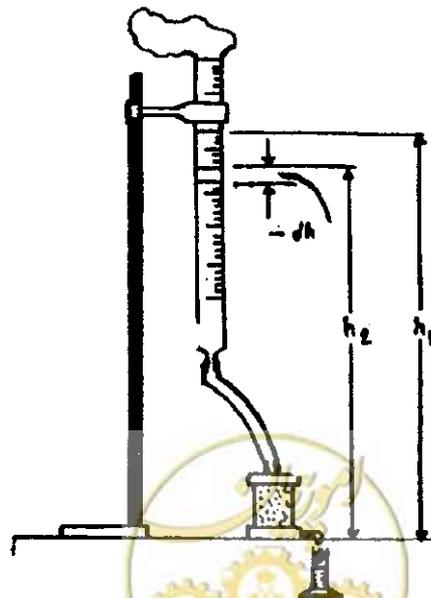
A = سطح مقطع نمونه (بر حسب سانتیمتر مربع)

t<sub>1</sub> = انقضای زمان (بر حسب ثانیه)

h<sub>0</sub> = بار آبی یا ارتفاع آب روی نمونه قبل از شروع آزمایش یا در زمان t = 0 بر حسب سانتیمتر

h<sub>1</sub> = بار آبی یا ارتفاع آب روی نمونه در پایان آزمایش یا در زمان t بر حسب سانتیمتر

مبنای اندازه گیری h<sub>0</sub> و h<sub>1</sub> سطح آب در سطح ایستابی مقطع خروجی آب از نمونه است.



شکل ۴- دستگاه اندازه گیری تراوایی با بار افتان

## ۲- اندازه‌گیری ضریب تراوایی در صحرا با آزمایش لوژون

### ۱-۲ آشنایی

در بررسیهای ژئوتکنیکی ضریب تراوایی برجا (ضریب تراوایی توده سنگی در محل) برای رسیدن به اهداف زیر تعیین می‌شود:

- تعیین میزان نشت آب
- برآورد فرسایش‌پذیری توده سنگ
- برآورد فشار برکنش
- برآورد تزریق‌پذیری توده سنگ
- تعیین میزان آب ورودی به گودبردارها
- طراحی سیستم زهکشی
- ارزیابی و کنترل کیفی تزریق انجام شده

مناسبت‌ترین روش برای تعیین ضریب تراوایی سنگ‌های درزه‌دار، انجام آزمونهای صحرائی است. جریان آب در توده سنگ عمدتاً به ویژگیهای سیستم ناپیوستگیهای آن بستگی دارد (بند ۲-۳-۵ استاندارد ۱۲۴-الف طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور). در توده سنگی که جریان آب در دسته درزه‌های منظم تمرکز دارد، تراوایی به شدت جهت‌دار خواهد بود. چنانچه بتوان بازشدگی درزه‌ها (میزان ارتباط آنها با یکدیگر) را به صورت "برجا" اندازه‌گیری کرد، می‌توان تراوایی را محاسبه کرد. متأسفانه چنین اندازه‌گیری‌هایی تحت شرایط "برجا" امکان‌پذیر نیست، در نتیجه تراوایی به صورت غیرمستقیم تعیین می‌شود. یکی از رایج‌ترین روشها، آزمایش فشارآب موسوم به لوژون است که در سال ۱۹۳۳ میلادی توسط آقای موریس لوژون معرفی شد.

در این روش ضریب تراوایی توده‌سنگ با واحد لوژون بیان می‌شود. یک واحد لوژون عبارت از تراوایی سنگی است که از یک متر طول گمانه اکتشافی حفر شده در آن، تحت فشار ۱۰ بار، یک لیتر بر دقیقه آب عبور کند<sup>۱</sup>.



۱- یک لوژون = ۱۰ ATM / ۱ m / ۱ Min / ۱ Lit

## ۲-۲ وسایل مورد نیاز آزمایش

### ۱-۲-۲ پمپ آب

برای انجام آزمایش لوژون به کارگیری پمپهای گریز از مرکز (سانتریفوژ) ارجح است. در صورت استفاده از پمپهای پیستونی برای جلوگیری از اثرات منفی ضربه قوچ باید موارد زیر مورد توجه قرار گیرد:

ضربه قوچ در پمپهای پیستونی می تواند فشار اضافی (تا یک یا دو پله بیش از فشار موردنظر) ایجاد کند. این فشار ممکن است نوساناتی شدید در عقربه فشارسنج به وجود آورد و در مواردی حتی شکست هیدرولیکی زودهنگام سنگ را باعث شود.

در صورت استفاده از پمپهای پیستونی پیشنهاد می شود تا در حد فاصل بین فشارسنج و پمپ، فشارشکن نصب شود. بنابراین قویاً توصیه می شود از پمپهای «گریز از مرکز» با ظرفیت ۲۰۰ لیتر در دقیقه استفاده شود.

### ۲-۲-۲ مسدودکننده ها

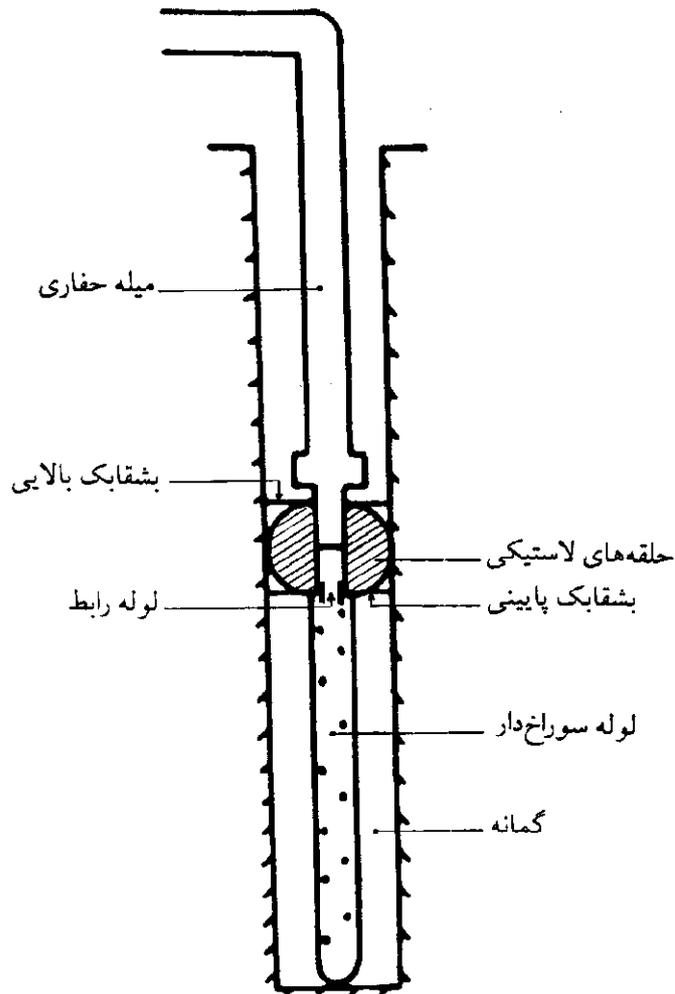
به طور کلی مسدودکننده ها به دو گروه مکانیکی و بادکنکی<sup>۱</sup> تقسیم می شوند.

#### الف) مسدودکننده مکانیکی

معمول ترین مسدودکننده مکانیکی که در ایران بیشترین کاربرد را دارد از قسمت های زیر تشکیل شده است (شکل شماره ۵):

- لوله سوراخ دار به قطر ۲ اینچ که انتهای آن بسته است و طول آن بر حسب طول قطعه مورد آزمایش تغییر می کند و تا ۵ متر می رسد.
- دو بشقابک که یکی متصل به لوله سوراخ دار است و دیگری به وسیله لوله رابط آب به میله حفاری متصل می شود.
- یک یا دو حلقه لاستیکی فشرده (می توان تعداد آنها را افزایش داد)
- لوله رابط آب به قطر ۱/۵ اینچ که طول این لوله بین ۸۰ سانتی متر تا ۱ متر است. این لوله از سمت پایین به وسیله مادگی در درون لوله سوراخ دار حرکت کرده و در قسمت وسط از درون حلقه های لاستیکی عبور می کند و در قسمت بالا به بشقابک بالایی و میله حفاری متصل می شود.

1- Inflated



شکل ۵- شمای کلی مسدودکننده مکانیکی

- دستگاه حفاری از طریق قسمت دوکی شکل میله حفاری (اسپیندل<sup>۱</sup>) به بشقابک بالایی که متصل به میله حفاری است فشار وارد می‌کند و باعث فرورفتن لوله رابط آب در لوله سوراخ‌دار و در نتیجه فشرده شدن لاستیکهای بین دو بشقابک می‌شود. این فشرده شدن باعث افزایش حجم لاستیکها و چسبیدن آنها به دیواره گمانه می‌شود.
- آب از طریق میله حفاری و لوله رابط آب به لوله سوراخ‌دار و از طریق سوراخهای لوله مذکور به درون قطعه تحت فشار تزریق می‌شود.

نوع دیگر مسدودکننده‌های مکانیکی به نام یوس پکر<sup>۱</sup> است که به علت افت شدید هیدرولیکی در آبخوریهای بالا، دیگر کاربردی در ایران ندارند. نوع دیگر مسدودکننده مکانیکی در شکل شماره ۶-ج نمایش داده شده است.

## ب) مسدودکننده‌های بادکنکی

مسدودکننده‌های بادکنکی نیز به دو نوع آبی و بادی تقسیم می‌شوند.

مسدودکننده‌های بادکنکی از اجزای زیر تشکیل شده‌اند:

- لوله فلزی داخلی که از سمت بالا به میله حفاری متصل می‌شود
- لوله لاستیکی نرم که در دو انتها به لوله داخلی متصل است
- شیلنگ پلاستیکی هدایت‌کننده آب یا هوا به مسدودکننده
- کپسول هوا

شمای کلی مسدودکننده‌های بادکنکی در شکل شماره ۶-د نشان داده شده است.

برخی از انواع مسدودکننده‌های بادکنکی که اخیراً در اغلب مطالعات ژئوتکنیک از آنها استفاده می‌شود با آنچه که در شکل شماره ۶-د نشان داده شده، متفاوت هستند. این مسدودکننده‌ها مرکب از بخش‌های زیر هستند:

- لوله فلزی داخلی که از سمت بالا به شیلنگ فشار قوی هدایت‌کننده آب به قطعه مورد آزمایش، متصل است.
- لوله لاستیکی نرم که در دو انتها به لوله داخلی متصل است.
- شیلنگ پلاستیکی باریک هدایت‌کننده آب یا هوا به مسدودکننده که به صورت حلزونی در درون شیلنگ هدایت‌کننده آب به قطعه مورد آزمایش، قرار دارد.
- قرقره‌ای که شیلنگ هدایت‌کننده آب آزمایش به دور آن پیچیده است.
- کپسول هوا

وضعیت یاد شده منجر به افت شدید هیدرولیکی در سیستم آزمایش می‌شود. بنابراین، مسدودکننده بادکنکی نشان داده شده در شکل شماره ۶-د به انواع اخیر ترجیح داده می‌شود.

در صورت استفاده از سیستم مسدودکننده اخیر، باید افت فشار در طول سیستم اندازه‌گیری شده و به صورت منحنی شکل ۶-ب رسم شود و در محاسبات مورد استفاده قرار گیرد.



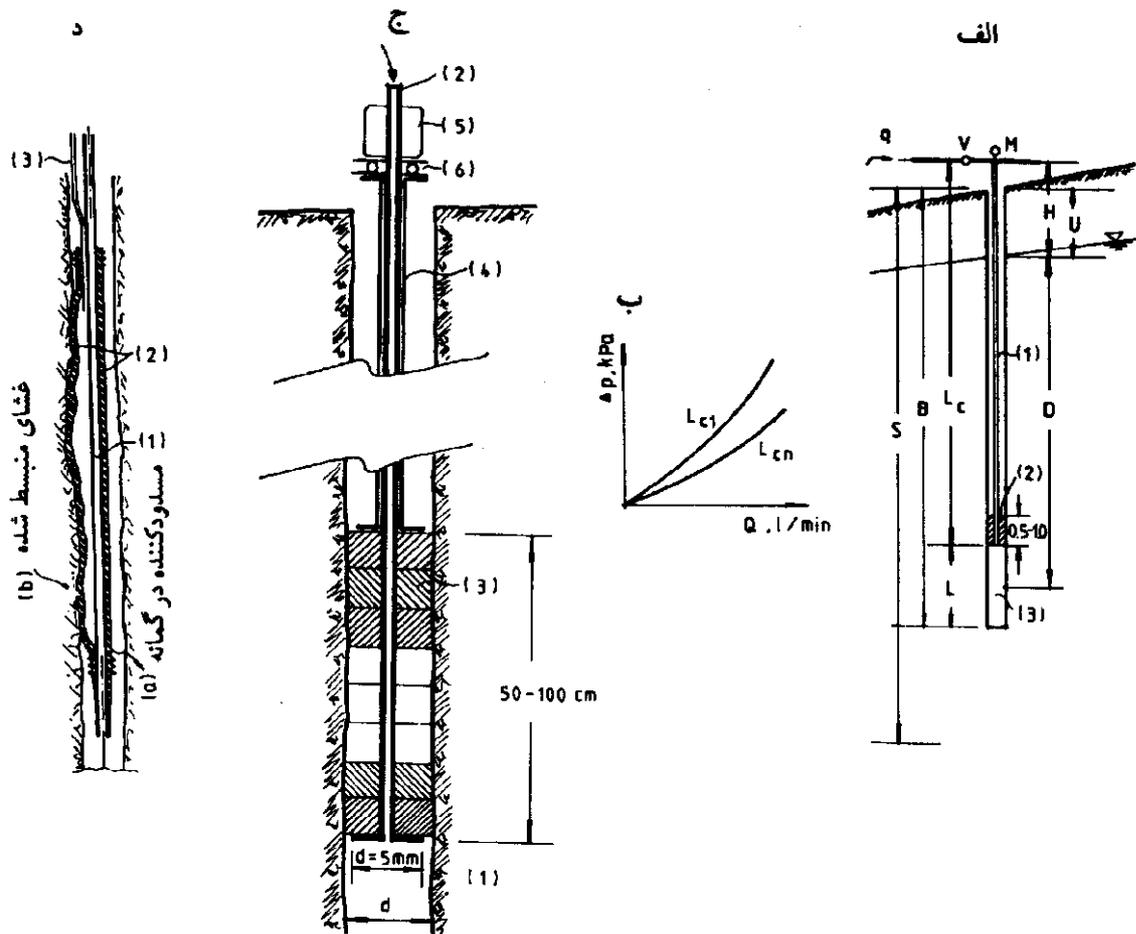
توضیح: به طور کلی مسدودکننده‌های مکانیکی برای سنگهای مقاوم و درگمانه‌هایی که دیواره صاف دارند، مناسبتر هستند. در سنگهای ضعیف، دیواره گمانه ممکن است ناصاف باشد و در مقاطعی ریزش کند. در چنین شرایطی، استفاده از مسدودکننده بادکنکی با طول بیشتر توصیه می‌شود. به علاوه مسدودکننده‌های بادکنکی به لحاظ طول بیشتری که دارند، در سنگهای مقاوم و به شدت درزه‌دار به سهولت قابل استفاده‌اند. مسدودکننده‌های بادکنکی ممکن است مشکل آفرین نیز باشند. برای مثال امکان پاره شدن آنها در تماس با دیواره‌های ناصاف و خشن وجود دارد.

## ۳-۲-۲ سایر وسایل مورد نیاز

- الف - کتور آب برای اندازه‌گیری دبی آب در حین آزمایش با دقت  $0.1\%$  لیتر
- ب - سوندالکتریکی برای اندازه‌گیری سطح آب
- ج - فشارسنج با دقت یک بار
- د - زمان‌سنج دقیق (کرونومتر)
- ه - منبع تأمین‌کننده آب

## ۳-۲ آماده‌سازی

- برای آماده‌سازی قطعه مورد آزمایش باید عملیات زیر صورت گیرد:
- ابتدا قطعه مورد آزمایش به طول حداکثر تا ۵ متر حفاری شود.
- قطعه حفاری شده تحت فشار آب به‌طور کامل شستشو شود به‌طوری‌که آب خارج شده از گمانه کاملاً زلال باشد (شستشوی قطعه مورد آزمایش به منظور خارج کردن خرده‌های حفاری از گمانه و خارج کردن خاک و سایر مصالح سست از درز و ترکهای توده سنگ مجاور گمانه انجام می‌گیرد).
- لوازم درون چاهی حفاری قطعه از گمانه خارج شود.
- لوازم آزمایش فشار آب به ترتیب زیر نصب و جایگذاری شوند:
- محل نصب مسدودکننده (پکر)<sup>۱</sup> در بالای قطعه به دقت انتخاب شود (چنانچه ابتدا تمام طول گمانه حفاری شده باشد از دو مسدودکننده که در بالا و پایین قطعه موردنظر قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود).
- مسدودکننده به درون گمانه فرستاده شده و در بالای به دقت نصب و جایگذاری شود.
- میله‌های حفاری متصل به مسدودکننده، در بالای گمانه، به ترتیب به فشارسنج، کتور آب، پمپ آب متصل شوند.
- شمای کلی آماده‌سازی قطعه مورد آزمایش در شکل شماره ۶-الف نشان داده شده است.



الف: شمای نصب، (q) جریان آب پمپ، (V) کنتور آب، (M) فشارسنج؛ ۱ لوله مسدودکننده، ۲ مسدودکننده، ۳ مقطع مورد آزمایش.

ب: منحنی افت فشار در سیستم مسدودکننده.

ج: شمای مسدودکننده مکانیکی، (۱) دیواره گمانه، (۲) لوله مسدودکننده، (۳) حلقه‌های لاستیکی نرم، (۴) لوله خارجی، (۵) مهره برای بهم فشردن لوله و حلقه‌های لاستیکی.

د: مسدودکننده بادکنکی، (۱) لوله مسدود کننده، (۲) لوله لاستیکی نرم با انتهای ثابت شده به لوله مسدودکننده، (۳) شیلنگ هوا

شکل ۶- آزمایش فشار آب (لوژون)



بعد از آماده شدن قطعه مورد آزمایش و نصب مسدودکننده، آزمایش لوژون انجام می‌گیرد که معمولاً ۵ یا ۷ پله دارد و هر پله با حروف a, b, c, d, e, f, g مشخص می‌شود. پله‌های مختلف فشار به شرح زیر است:

P <sub>1</sub> _____	a = ۲/۵ اتمسفر
P <sub>2</sub> _____	b = ۵ اتمسفر
P <sub>3</sub> _____	c = ۷/۵ اتمسفر
P <sub>4</sub> _____	d = ۱۰ اتمسفر
P <sub>5</sub> _____	e = c = ۷/۵ اتمسفر
P <sub>6</sub> _____	f = b = ۵ اتمسفر
P <sub>7</sub> _____	g = a = ۲/۵ اتمسفر

- الف - برای اشیاع قطعه مورد آزمایش ابتدا آب بدون فشار مانومتری به مدت ده دقیقه تزریق می‌شود.
- ب - فشار به آرامی تا رسیدن به اولین پله فشار (مثلاً ۲/۵ اتمسفر) افزایش می‌یابد. حجم آب تزریقی در این پله فشار در فواصل زمانی ۵ دقیقه‌ای قرائت و ثبت می‌شود. وقتی که اختلاف بین دو قرائت برابر یا کمتر از ۱۰ درصد شود، آزمایش در این پله فشار پایان می‌یابد.
- ج - پس از اتمام آزمایش در اولین پله فشار با افزایش فشار تا حد یک پله (۲/۵ اتمسفر)، عملیات بند (ب) برای پله‌های فشار دوم، سوم و چهارم (۵ و ۷/۵ و ۱۰ اتمسفر) نیز تکرار می‌شود.
- د - پس از پایان چهارمین پله فشار (فشار حداکثر آزمایش)، فشار به آرامی تا رسیدن به پله پنجم [معادل پله سوم در مرحله رفت (۷/۵ اتمسفر)] کاهش می‌یابد و سپس نظیر بند (ب) قرائت انجام می‌شود.
- ه - عملیات نظیر بند (د) برای پله‌های فشار ششم و هفتم با فشارهای معادل دومین و اولین پله فشار (۵ و ۲/۵ اتمسفر)، انجام می‌شود.
- و - قرائت‌ها و فشارهای اعمال شده در فرم ثبت داده‌ها به دقت ثبت می‌شود.

#### توضیح :

- الف - قبل از آماده سازی و شروع آزمایش، رقوم سطح ایستایی باید به دقت اندازه‌گیری و ثبت شود.
- ب - به هنگام آزمایش ممکن است به علت عدم انسداد کامل مسدودکننده و یا وضعیت محل نصب آن، آب از کناره مسدود کننده به قطعات بالا راه یابد. در این صورت آزمایش با خطا همراه خواهد بود. به طوری که اگر قطعات بالایی تراوایی پایینی داشته باشند، آب به دهانه گمانه نیز خواهد رسید. در غیر این صورت آب وارد طبقات بالای قطعه می‌شود.

در حین آزمایش برای کنترل سطح ایستایی در گمانه باید از سوند الکتریکی استفاده کرد.

- ج- چنانچه در حین آزمایش، دفعتهً میزان جذب آب افزایش و فشار کاهش یابد، باید بلافاصله فشار آزمایش را کاهش داد.
- د- چنانچه با توجه به وضعیت زمین‌شناختی قطعه مورد آزمایش میزان جذب آب زیاد به نظر برسد، ممکن است آب از کناره مسدودکننده فرار کند و وارد قطعه بالای آن شود. برای کنترل این امر می‌توان نظیر بند(الف) عمل کرد.
- ه- شرایطی که آزمایش تحت آن انجام می‌گیرد باید به وضوح ثبت شود. این شرایط شامل رقوم سطح ایستابی، حجم و فشار آرتزین، قطر گمانه، قطر داخلی و خارجی لوله‌های حفاری، محل نصب فشارسنج‌ها و نظایر آن است. در صورت وجود آب تحت فشار، شدت جریان این آب نیز باید درج شود.
- و- در مواردی که آبگذری در قطعه مورد آزمایش زیاد باشد، باید افت فشار در مجموعه ابزار آزمایش بعد از فشارسنج محاسبه شود.

## ۵-۲ ثبت نتایج آزمایش

نتایج آزمایش فشار آب (لوژون) در فرم پیوست شماره ۲ ثبت می‌شود. یک نمونه از نتایج آزمایش که در توده سنگ کنگلومرایی در عمق ۴۷-۵۲ متری از دهانه گمانه انجام شده نیز در جدول شماره ۶ ارائه شده است.

## ۶-۲ محاسبه ضریب تراوایی

تراوایی توده سنگ با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$L_u = 10 \cdot Q/P_e L \quad (1-2)$$

که در آن:

$$L_u = \text{واحد لوژون}$$

$$Q = \text{حجم آب جذب شده در قطعه مورد آزمایش در هر دقیقه (لیتر بر دقیقه)}$$

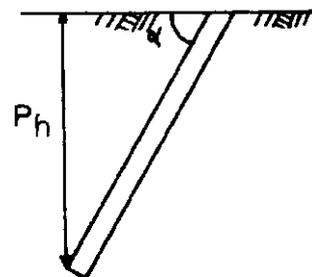
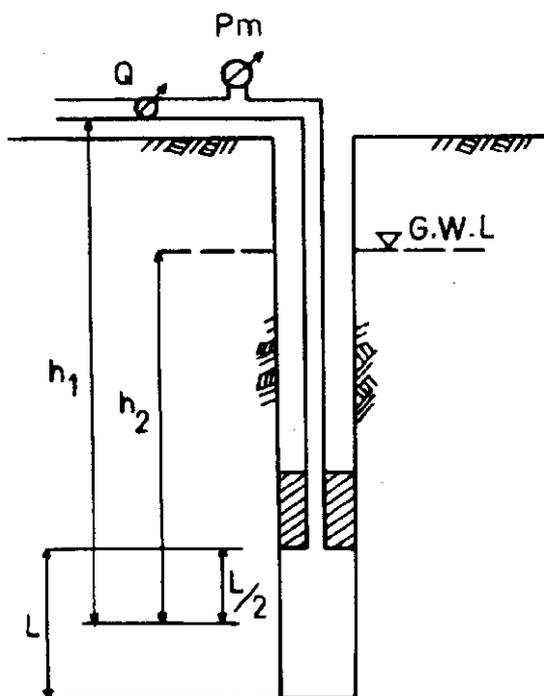
$$P_e = \text{فشار موثر در وسط قطعه مورد آزمایش (بر حسب اتمسفر) که با توجه به شکل شماره ۷ محاسبه می‌شود.}$$

$$L = \text{طول قطعه مورد آزمایش (بر حسب متر)}$$



جدول ۶- یک نمونه از ثبت نتایج آزمایش فشار آب (لوژون) که در توده سنگ کنگلومرای در عمق ۴۷-۵۲ متری از دهانه گمانه انجام شده است.

آزمایش فشار آب		شماره گمانه BH ۱۵		صفحه از صفحه			
دستگاه نظارت:		قطعه آزمایش از ۴۷ تا ۵۲ متر		عمق سطح آب زیرزمینی: ۲۵ متر			
پروژه:		عمق تا وسط قطعه یا سطح آب زیرزمینی (هرکدام کمتر است) (H): ۲۵ متر					
محل:		قطر داخلی لوله: ۳۸ میلیمتر		سنگ: کنگلومرا			
پیمانکار: شرکت		نظارت توسط:		محاسبه توسط:			
زمان دقیقه	فشار (آتمسفر)		تفاوت	Q لیتر در دقیقه در متر	فشار (آتمسفر)	لوژون	ملاحظات
	اولیه	نهایی					
۱۰	۰	۰	۴۳	۰/۸۶	۱۶۷۹۰	۱۶۸۳۳	فشار سنج ۳۰ سانتیمتر بالاتر از سطح زمین
۵	۰	۲/۵	۱۳	۰/۵۲	۱۶۸۳۳	۱۶۸۴۶	
۵	۲/۵	۲/۵	۱۲	۰/۴۸	۱۶۸۴۶	۱۶۸۵۸	
۵	۲/۵	۵	۳۰	۱/۲	۱۶۸۵۸	۱۶۸۸۸	
۵	۵	۵	۳۳	۱/۳	۱۶۸۸۸	۱۶۹۲۱	
۵	۵	۷/۵	۵۵	۲/۲۰	۱۶۹۲۱	۱۶۹۷۶	
۵	۷/۵	۷/۵	۵۸	۲/۳۰	۱۶۹۷۶	۱۷۰۳۴	
۵	۷/۵	۱۰	۸۳	۳/۳۰	۱۷۰۳۴	۱۷۱۱۷	
۵	۱۰	۱۰	۸۰	۳/۲۰	۱۷۱۱۷	۱۷۱۷۹	
۵	۱۰	۷/۵	۶۸	۲/۷۰	۱۷۱۷۹	۱۷۲۴۷	
۵	۷/۵	۷/۵	۷۰	۲/۸۰	۱۷۲۴۷	۱۷۳۱۷	
۵	۷/۵	۵	۵۵	۲/۲۰	۱۷۳۱۷	۱۷۳۷۲	
۵	۵	۵	۵۸	۲/۳۰	۱۷۳۷۲	۱۷۴۳۰	
۵	۵	۲/۵	۳۷	۱/۴۸	۱۷۴۳۰	۱۷۴۶۷	
۵	۲/۵	۲/۵	۱۸	۰/۷	۱۷۴۶۷	۱۷۴۸۵	
۵	۲/۵	۲/۵	۲۳	۰/۹	۱۷۴۸۵	۱۷۵۰۸	



نحوه محاسبه  $P_h$  در گمانه‌های مایل

(۱) برای حالتی که سطح ایستابی وجود ندارد

$$P_e = P_m + P_h - \Delta P$$

$$P_h = \gamma_w h_1$$

(۲) برای حالتی که سطح ایستابی وجود دارد

$$P_e = P_m + P_h - \Delta P$$

$$P_h = \gamma_w (h_1 - h_2)$$

که در آن :

$P_e$  = فشار مؤثر در وسط قطعه (برحسب اتمسفر)

$P_m$  = فشار مانومتر (برحسب اتمسفر)

$P_h$  = فشار هیدرواستاتیک (برحسب اتمسفر)

$\gamma_w$  = وزن مخصوص آب

$\Delta P$  = افت فشار در سیستم آزمایش

$h_1, h_2$  = طولهای نشان داده شده در شکل

G.W.L. = سطح ایستابی

شکل ۷- نحوه محاسبه  $P_e$  در آزمایش لوزون



تطابق مستقیم مقدار لوژون اندازه‌گیری شده با ضریب تراوایی K به سادگی میسر نیست. در شرایطی که توده سنگ درزه‌های نامنظم و حفرات نداشته باشد، مقادیر تقریبی K را می‌توان از روابط زیر به دست آورد:

$$K = \frac{Q}{2\pi Lh} \ln \frac{L}{r} \quad L \geq 10r \quad (2-2)$$

$$K = \frac{Q}{2\pi Lh} \sinh^{-1} \frac{L}{2r} \quad 10r > L \geq r \quad (3-2)$$

که در آن:

K = ضریب تراوایی بر حسب سانتیمتر بر ثانیه

Q = شدت جریان ثابت آب در قطعه مورد آزمایش (بر حسب سانتیمتر مکعب بر ثانیه)

L = طول قطعه مورد آزمایش (بر حسب سانتی‌متر)

r = شعاع قطعه مورد آزمایش (بر حسب سانتی‌متر)

h = فاصله سطح آب زیرزمینی تا مانومتر به اضافه فشار مانومتر و چنانچه قطعه مورد آزمایش بالای سطح ایستایی باشد برابر است با فاصله مانومتر تا وسط قطعه مورد آزمایش به اضافه فشار مانومتر (بر حسب سانتیمتر)

از شکل شماره ۸ نیز می‌توان برای تبدیل مقادیر لوژون به K استفاده کرد.

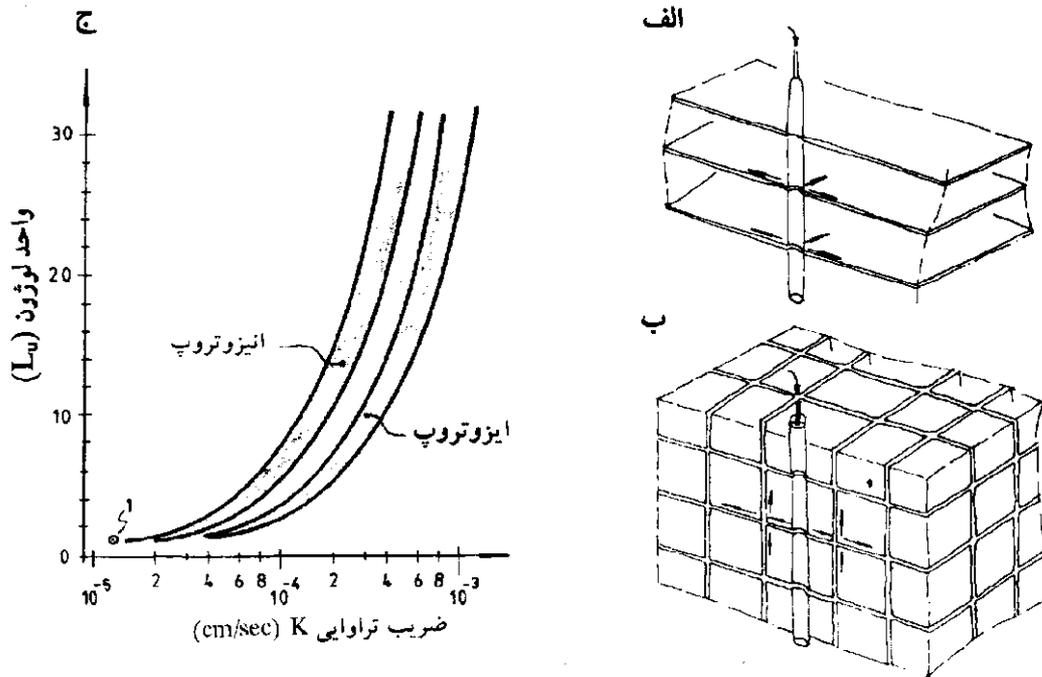
## ۷-۲ دقت آزمایش

آزمایش لوژون در مورد سنگهای باتراوایی پایین بیشترین دقت را دارد بنابراین در مورد توده‌های سنگی با تراوایی بالا که نیاز به تزریق دارند باید دقت بیشتری را در مورد این آزمایش به کار برد. تقریب قابل قبول (رواداری) عدد لوژون در مورد محیطهای با سطوح مختلف تراوایی به شرح جدول شماره ۷ است.

جدول ۷- تقریب عدد لوژون برای سطوح مختلف تراوایی (Houlsby، ۱۹۸۵)

تقریب قابل قبول (رواداری) دامنه (واحد لوژون)	دامنه تغییرات تراوایی واحدلوزون
۱	۱ تا ۵
۲	۵ تا ۱۰
۵	۱۰ تا ۱۵
۱۰	۱۵ تا ۵۰
۳۰	۵۰ تا ۱۰۰

تراوایی اندازه‌گیری شده ممکن است بیش از ۱۰۰ واحد لوژون باشد. در چنین مواردی پیشنهاد می‌شود که تراوایی به صورت  $Lu > 100$  نشان داده شود. مقادیر لوژون هیچوقت نباید به صورت اعشاری ارائه شود و همیشه باید آن را به عدد صحیح گرد کرد. مقدار لوژون بین صفر تا یک را معادل یک واحد لوژون در نظر می‌گیرند.



الف - مدل با تراوایی شدیداً ایزوتروپ، ب - مدل با تراوایی ایزوتروپ، ج - رابطه بین لوژون Lu و K

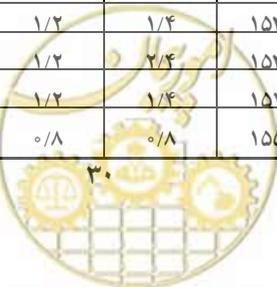
شکل ۸- رابطه بین مقادیر لوژون و ضریب تراوایی (K) برای محیط درزه‌دار

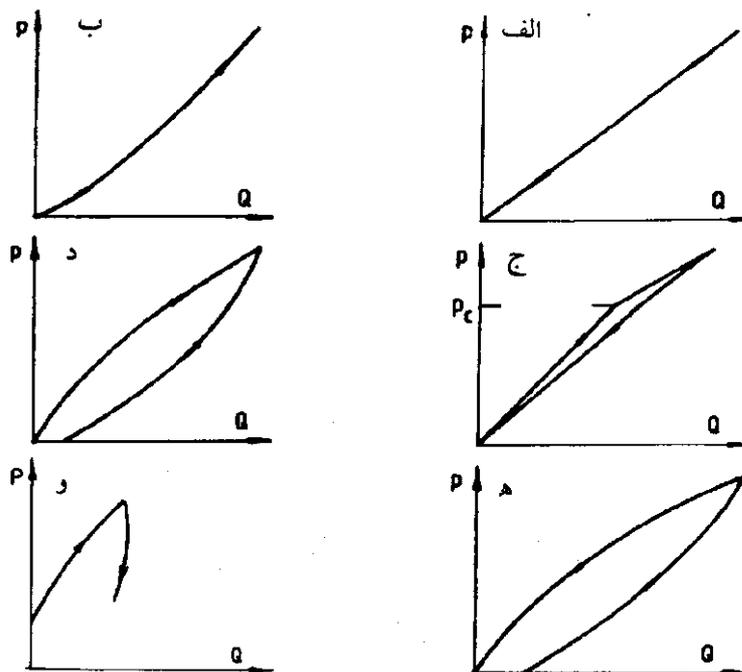
## ۸-۲ ارائه نتایج آزمایش لوژون

در اغلب موارد مقدار لوژون از نمودار P-Q استخراج می‌شود. البته در این مورد نظرات موافق و مخالفی وجود دارد. تجربه نشان داده است که در سنگهای ضعیف، در بیشتر موارد، فشارهای اعمال شده بیش از توان توده سنگ بوده و باعث شکست هیدرولیکی سنگ شده و به طور کاذب سبب افزایش جذب آب شده است. در نتیجه پیشنهاد این است که نتایج به هردو صورت نموداری و عددی ارائه شود تا بتوان مناسبترین واحد لوژون را انتخاب کرد. نمودار P-Q حتماً باید همراه نمودار گمانه باشد زیرا مقدار لوژون رابطه تنگاتنگی با ساختار و جنس توده سنگ دارد. نمونه‌ای از ارائه نتایج به صورت عددی در جدول شماره ۸ و به صورت نمودار در شکل شماره ۹ نشان داده شده است.

جدول ۸- نمونه‌ای از نتایج آزمایش فشار آب همراه با تحلیل رفتار توده سنگ به روش هالسیبی

گروه	مقادیر لوژون		میزان آب تزریق شده در طی انجام آزمایش، قرائت شده از کنتور آب (لیتر)	فشار مانومتر (بار)		زمان آزمایش (دقیقه)				قطعه مورد آزمایش (متر)	تاریخ
	مقادیر انتخاب شده برای هر قطعه آزمایشی	برای هر پله فشار		واقعی	مورد نیاز	قرائت ساعت		واقعی	مورد نیاز		
						تا	از				
A خطی	۲	۲	۲۹	۲/۸	۲/۸	۰۸۳۰	۰۸۲۰	۱۰	۱۰	از ۲۷/۶۷ به ۳۳/۸۷	
		۱	۴۶	۵/۰	۵/۰	۰۸۴۰	۰۸۳۰	۱۰	۱۰		
		۲	۸۱	۷/۸	۷/۸	۰۸۵۰	۰۸۴۰	۱۰	۱۰		
		۲	۵۴	۲/۸	۲/۸	۰۹۰۰	۰۸۵۰	۱۰	۱۰		
		۱	۲۵	۲/۸	۲/۸	۰۹۱۰	۰۹۰۰	۱۰	۱۰		
B آشفته	۵	۷	۱۲۰	۲/۸	۲/۸	۱۲۴۰	۱۲۳۰	۱۰	۱۰	از ۲۴/۰۸ به ۳۰/۲۶	
		۶	۱۸۰	۴/۵	۴/۵	۱۲۵۰	۱۲۴۰	۱۰	۱۰		
		۵	۱۹۸	۶/۸	۶/۸	۱۳۰۰	۱۲۵۰	۱۰	۱۰		
		۶	۱۷۸	۴/۵	۴/۵	۱۳۱۰	۱۳۰۰	۱۰	۱۰		
		۹	۱۵۰	۲/۸	۲/۸	۱۳۲۰	۱۳۱۰	۱۰	۱۰		
C انبساط	۵	۵	۲۰	۰/۷	۰/۷	۰۹۰۵	۰۸۵۵	۱۰	۱۰	از ۶/۲۰ به ۲/۲۰	
		۶	۵۷	۱/۷	۱/۷	۰۹۱۵	۰۹۰۵	۱۰	۱۰		
		۸	۱۲۲	۲/۷	۲/۷	۰۹۲۵	۰۹۱۵	۱۰	۱۰		
		۷	۷۶	۱/۷	۱/۷	۰۹۳۵	۰۹۲۵	۱۰	۱۰		
		۵	۲۰	۰/۷	۰/۷	۰۹۴۵	۰۹۳۵	۱۰	۱۰		
D فرسایش و شستشو	۱۰	۵	۶۲	۲/۰	۲/۰	۱۳۲۵	۱۳۱۵	۱۰	۱۰	از ۱۵/۱۶ به ۱۲/۲۹	
		۶	۱۱۴	۳/۰	۳/۰	۱۳۳۵	۱۳۲۵	۱۰	۱۰		
		۷	۱۹۸	۴/۸	۴/۸	۱۳۴۵	۱۳۳۵	۱۰	۱۰		
		۸	۱۵۳	۳/۰	۳/۰	۱۳۵۵	۱۳۴۵	۱۰	۱۰		
		۱۰	۱۱۹	۲/۰	۲/۰	۱۴۰۵	۱۳۵۵	۱۰	۱۰		
E آب بندی خودبخودی	۳ یا ۱	۵	۱۱۸	۲/۸	۲/۸	۱۱۵۰	۱۱۴۰	۱۰	۱۰	از ۲۲/۵۷ به ۳۰/۴۲	
		۴	۱۵۱	۴/۵	۴/۵	۱۲۰۰	۱۱۵۰	۱۰	۱۰		
		۴	۲۰۸	۶/۸	۶/۸	۱۲۱۰	۱۲۰۰	۱۰	۱۰		
		۳	۹۴	۴/۵	۴/۵	۱۲۲۰	۱۲۱۰	۱۰	۱۰		
		۱	۲۸	۲/۸	۲/۸	۱۲۳۰	۱۲۲۰	۱۰	۱۰		
#	۶۰	۵۶	۲۶۹	۰/۸	۰/۸	۱۵۲۲	۱۵۱۲	۱۰	۱۰	از ۳/۶۰ به ۹/۶۰	
		۶۰	۴۳۲	۱/۲	۱/۴	۱۵۳۲	۱۵۲۲	۱۰	۱۰		
		۶۰	۴۳۲	۱/۲	۲/۴	۱۵۳۸	۱۵۳۲	۶	۱۰		
		۶۰	۴۳۲	۱/۲	۱/۴	۱۵۴۸	۱۵۳۸	۱۰	۱۰		
		۵۸	۲۷۹	۰/۸	۰/۸	۱۵۵۸	۱۵۴۸	۱۰	۱۰		



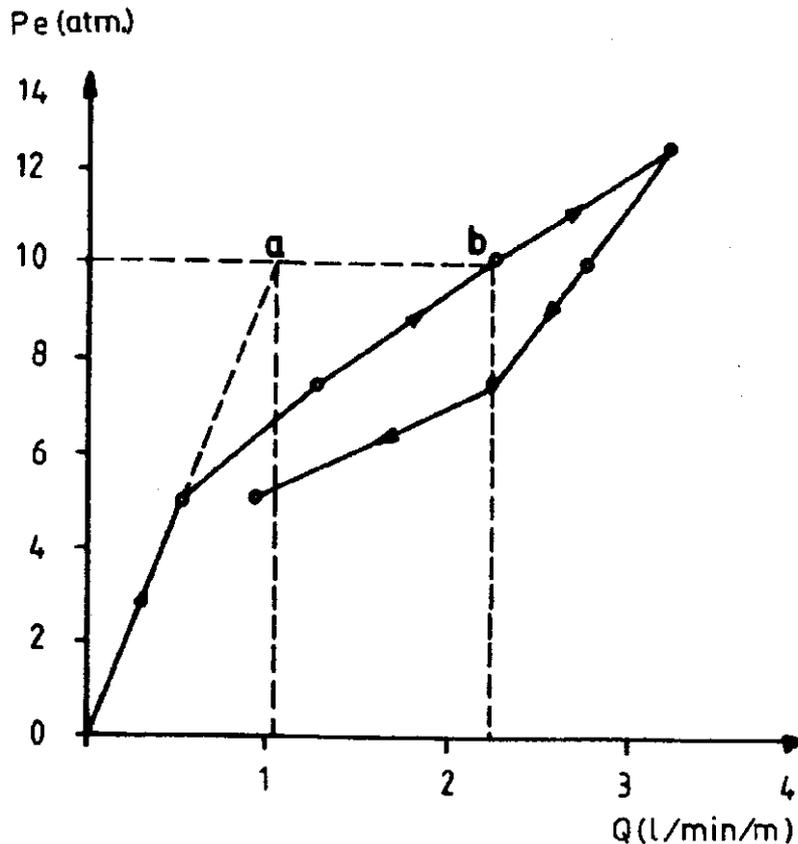


شکل ۹- نمودار نتایج آزمایش فشار آب (به صورت نمونه)

در شکل شماره ۹ حالت‌های مختلف رفتار توده سنگ به صورت نمودار  $p$ - $Q$  نمایش داده شده است. شکل شماره ۹-الف معرف حالتی است که جریان آب در ناپیوستگیهای توده سنگ در محدوده مقطع مورد آزمایش حالتی غیرمغشوش دارد. در چنین شرایطی مواد موجود در شکافها فرسایش نمی‌یابد و رابطه بین  $Q$  و  $p$  خطی است. مقادیر  $Lu$  برای کلیه فشارهای ( $p$ ) اعمال شده در طول آزمایش، ثابت است. در شکل ۹-ب جریان در ناپیوستگیها احتمالاً مغشوش (آشفته) است. در این حالت آهنگ افزایش  $Q$  با افزایش فشار به تدریج کاهش می‌یابد. در شکل شماره ۹-ج درزه‌های توده سنگ در اثر فشار آب باز شده است. در فشار  $P_c$  شکافهای موجود در سنگ باز شده و حتی شکستگیهای جدیدی ایجاد می‌شود. همچنین تنش اصلی حداقل منفی شده و تراوایی به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. در بیشتر سازه‌های آبی فشار ستون آب نمی‌تواند موجب شکست هیدرولیکی در پی شود، بنابراین فشار مجاز برای محاسبه تراوایی، باید کمتر از فشار بحرانی، در محاسبات نشت مدنظر قرار گیرد.

شکل شماره ۹-د حالتی را نشان می‌دهد که در آن مواد پرکننده درزه‌ها در حین آزمایش شسته شده است. تراوایی به طور نمایی با افزایش فشار بالا می‌رود، ولی با کاهش فشار، همچنان در مقادیر بالا باقی می‌ماند. شکل شماره ۹-ه موردی را نشان می‌دهد که توده سنگ دچار شکست هیدرولیکی شده است. شکل شماره ۹-و موردی را نشان می‌دهد که در آن مواد پرکننده در حین آزمایش فشار آب جابه‌جا شده و کمی دورتر از مقطع آزمایش نهشته می‌شوند. در چنین شرایطی انتخاب عدد تراوایی کوچکترین عدد ناشی از آزمایش است.

تعبیر و تفسیر نادرست نتایج آزمایش فشار آب ممکن است به نتیجه‌گیری غلط منجر شود. برای ارزیابی مشخصات تزریق‌پذیری توده سنگ، عدد لوژون باید برای فشار حداکثر اعمال شده در آزمایش، محاسبه شود.



شکل ۱۰- نحوه محاسبه تراوایی و تزریق‌پذیری

برای مثال در شکل‌های شماره ۹-ج و شماره ۹-د برای تحلیل نشت آب، تراوایی باید براساس خط مماس بر بخش ابتدایی منحنی P-Q محاسبه شود. ولی برای ارزیابی وضعیت تزریق‌پذیری توده سنگ و جذب دوغاب، باید شدت جریان آب در حداکثر فشار اعمال شده در آزمایش را به کار برد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد:

- تراوایی حاصل از آزمایش لوژون در ۱۰ اتمسفر فشار (طول نقطه b در شکل شماره ۱۰) نباید برای تحلیل نشت آب از پی سدها به کار رود، بلکه باید طول نقطه تلاقی خط مماس بر اولین پله فشار در منحنی P-Q و خط atm.  $P = 10$  به کار رود (طول نقطه a در شکل شماره ۱۰).

- برای برآورد وضعیت تزریق‌پذیری و جذب دوغاب سنگ باید از طول نقطه تلاقی منحنی P-Q در فشار تزریق

موردنظر و خط  $P = 10 \text{ atm}$  استفاده کرد (طول نقطه b در شکل شماره ۱۰). در شرایطی که آبخوری گمانه به گونه‌ای باشد که فشار موردنظر تامین نشود، نتایج آزمایش به صورت کیفی و تحت عنوان تراوایی بسیار زیاد، (یا تراوایی نامشخص و یا نامحدود) ارائه می‌شود. در چنین شرایطی، مقادیر P و Q در فشارهای پایین ممکن است برای ارزیابی مقادیر لوژون به کار رود. چنانچه در حداکثر ظرفیت پمپ به فشارهای پایین هم نرسد و به عبارت دیگر فشاری گرفته نشود، در این صورت آزمایش لوفران انجام می‌شود.

در حین آزمایش، عبور جریان آب از درون توده سنگ باعث تغییر وضعیت تنش‌های موثر بر سنگ می‌شود که با وضعیت طبیعی تنش در اطراف مقطع مورد آزمایش در گمانه و نیز وضعیت پی سنگ متفاوت است.

در مقطع مورد آزمایش، فشار آب وارد بر دیواره گمانه باعث ایجاد تنش‌های کششی و در نتیجه موجب بازشدن شکافها و افزایش تراوایی آن می‌شود.

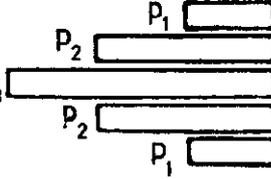
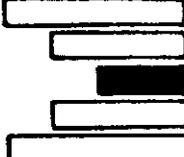
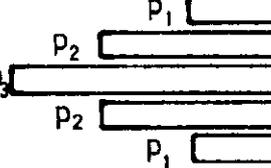
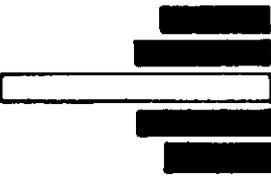
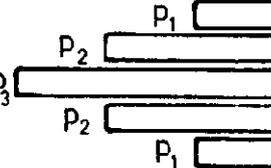
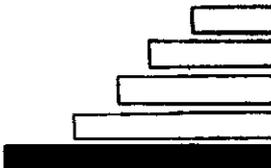
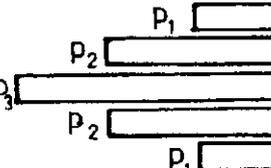
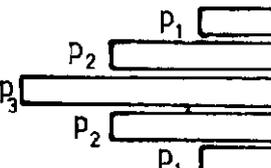
در پی سد احداث شده وضعیت، عکس آنچه ذکر شد، است زیرا وزن سد باعث افزایش تنش‌های فشاری و بسته شدن درزه‌ها می‌شود و در نتیجه تا اندازه‌ای تراوایی را کاهش می‌دهد.

به طور محافظه کارانه می‌توان فرض کرد که تراوایی واقعی توده سنگ در زیر سازه سد کمتر از مقداری است که از مماس بر منحنی پله اول منحنی  $P - Q$  در هر آزمایش به دست می‌آید.

روش دیگر انتخاب مقادیر لوژون، استفاده از روش هالسبی<sup>۱</sup> (۱۹۷۶) است که چگونگی کاربرد آن در جدول شماره ۹ تشریح شده است.



جدول ۹- تغییر و تفسیر نتایج آزمایش لوژون و انتخاب آن (Houlsby 1976)

نوع جریان و تفسیر نتایج	مقادیر لوژون در هر آزمایش	فشارهای آزمایش
<p>جریان آرام - تمامی مقادیر لوژون تقریباً برابر هستند. میانگین مقادیر را به کار برید</p>		
<p>جریان مغشوش - مقادیر لوژون با کاهش فشار افزایش می‌یابند. مقدار لوژون مربوط به فشار حداکثر را به کار برید. جریان به ندرت کاملاً مغشوش است.</p>		
<p>انبساط - در فشارهای بالا، توده سنگ در اثر باز شدن درزه‌ها انبساط می‌یابد. این یک عارضه موقتی است و به عنوان خصوصیات عادی در فشارهای نمونه آب زیرزمینی در نظر گرفته نمی‌شود. در نتیجه میانگین مقادیر لوژون مربوط به دو فشار حداقل یا میانه را به کار ببرید.</p>		
<p>آب شستگی - مواد پرکننده ناپیوستگیهای سنگ در اثر جریان آب شسته شده است. آب شستگی (فرسایش) یک عارضه دائمی توده سنگ در نظر گرفته می‌شود. مقدار لوژون مربوط به آخرین فشار برگشت (بیشترین) را به کار برید. این امر ممکن است نشانگر بالا بودن فشار آزمایش باشد.</p>		
<p>پرشدن خلل و فرج - این امر معمولاً در اثر آب پرکننده خلل و فرج در توده سنگی که بخشی از آن اشباع شده است، اتفاق می‌افتد. مقدار لوژون مربوط به پله آخر آزمایش انتخاب می‌شود. به منظور حصول اطمینان از اشباع سنگ، توصیه می‌شود آزمایش طولانی‌تر انجام شود.</p>		

### ۳- آزمایش تعیین ضریب تراوایی رسوبات ناپیوسته در صحرا با آزمایش لوفران<sup>۱</sup>

#### ۱-۳ آشنایی

یکی از پارامترهای مهم مصالح ناپیوسته مانند آبرفتها، واریزه‌ها و خاکهای برجا، ضریب تراوایی این مصالح به حالت برجا است که در طراحی سازه‌ها به ویژه سازه‌های آبی جزء پارامترهای اصلی به حساب می‌آید و در محاسبات نشست آب از پی‌ها و طراحی دیواره‌های آب‌بند، به کارگرفته می‌شود. برای تعیین ضریب تراوایی مصالح یادشده از آزمایش لوفران یا آزمایش پمپاژ به داخل گمانه استفاده می‌شود. در این آزمایش میزان آبخوری لایه‌های موردنظر تحت فشار ثابت اندازه‌گیری و میزان تراوایی محاسبه می‌شود و در هر شرایطی صرفنظر از موقعیت سطح آب زیرزمینی قابل اجرا است.

#### ۲-۳ وسایل موردنیاز آزمایش

علاوه بر کلیه تجهیزاتی که در حفر گمانه مورد استفاده قرار می‌گیرند، برای انجام آزمایش لوفران وسایل اختصاصی زیر نیز مورد نیاز است:

- کنتور آب برای اندازه‌گیری شدت جریان آب با دقت  $0.01$  لیتر
- سوند الکتریکی برای اندازه‌گیری عمق سطح آب
- زمان‌سنج (کرونومتر)
- منبع ذخیره آب
- ظرف مدرج با دقت یک سانتیمتر مکعب

#### ۳-۳ آماده سازی

این آزمایش در داخل گمانه‌های اکتشافی انجام می‌شود. این گمانه‌ها ممکن است به روش دورانی و یا ضربه‌ای حفر شده باشند. برای انجام این آزمایش، آماده سازی محل آزمایش اهمیت زیادی دارد به طوری که عدم دقت در آماده‌سازی، منجر به نتایج غیرواقعی خواهد شد.



در داخل گمانه‌ای که قرار است آزمایش لوفران انجام شود، حتماً باید لوله جدار نصب شود. قبل از حفر قطعه موردنظر باید ارتباط قطعه با قسمت فوقانی را قطع کرد به نحوی که ورود و یا خروج آب تنها از طریق قطعه مورد آزمایش انجام گیرد. به این منظور:

- حفاری در بالای قطعه مورد آزمایش متوقف می‌شود.
- مته و ستون لوله‌ها از گمانه خارج می‌شود.
- لوله جداري حدود ۳۰ تا ۵۰ سانتیمتر بالا کشیده می‌شود.
- گلوله‌هایی از جنس رس (بتونیت) به داخل گمانه ریخته می‌شود.
- با استفاده از تسمه‌ای که به انتهای ستون لوله‌های حفاری وصل می‌شود، گلوله‌های رسی به خوبی کوبیده می‌شود.
- لوله جداري مجدداً به آرامی به سمت پایین رانده می‌شود تا به محل قبلی برسد.
- عملیات مجدداً آغاز شده و قطعه موردنظر با طول مناسب حفاری می‌شود.

به این ترتیب ارتباط قطعه مورد آزمایش با قسمتهای بالایی گمانه قطع شده و اندازه‌گیری شدت جریان آب ورودی و خروجی امکان پذیر می‌شود.

پس از خاتمه حفاری قطعه، آن را شستشو می‌دهند. شستشو آنقدر ادامه می‌یابد تا آب برگشتی از گمانه کاملاً زلال و بدون رسوب باشد.

طی آماده‌سازی گمانه برای انجام آزمایش لوفران نکات زیر باید مدنظر قرار گیرد:

- در گمانه‌هایی که برای آزمایش لوفران در نظر گرفته شده‌اند استفاده از گل حفاری مجاز نیست، بلکه باید از آب زلال و بدون رسوب استفاده کرد. بهتر است درجه حرارت آب مورد استفاده بیشتر از آب زیرزمینی باشد تا از تشکیل حبابهای هوا در تشکیلات ممانعت به عمل آید.
- سرعت حفاری و فشار آب باید به گونه‌ای باشد که از ریزش و شستشوی بیش از حد جدار قطعه مورد آزمایش جلوگیری به عمل آید و حتی‌الامکان از بهم‌خوردگی خاک جلوگیری کرد. در صورتی که قطعه مورد آزمایش در زیر سطح آب زیرزمینی واقع شده باشد لازم است در تمام مراحل شستشو گمانه را پر از آب نگهداشت تا بر اثر فشار آب اطراف، مصالح از کف چاه و زیر لوله جدار بالا نزنند.

### ۴-۳ روش آزمایش



آزمایش لوفران اساساً در خاکها و رسوبات آبرفتی درشت‌دانه که تهیه نمونه دست‌نخورده مشکل است انجام می‌شود.

این آزمایش را به دو صورت زیر می توان انجام داد :

### - آزمایش تعیین ضریب تراوایی افقی<sup>۱</sup>

این آزمایش در خاکهایی امکان پذیر است که دیواره گمانه در طول قطعه موردنظر ریزش نکند و در آن یک قطعه آزمایش می شود. در این روش، نتایج آزمایش زمانی قابل قبول است که طول قطعه (L) مساوی و یا بزرگتر از ده برابر شعاع گمانه (r) باشد ( $L \geq 10r$ ).

### - آزمایش تعیین ضریب تراوایی قائم<sup>۲</sup>

این آزمایش برای خاکهایی انجام می شود که جدارگمانه در طول موردنظر ریزش می کند. در این موارد لوله جدار تا انتهای گمانه رانده می شود و فقط کف گمانه مورد آزمایش تراوایی قرار می گیرد و به این دلیل آن را آزمایش نقطه ای هم می نامند.

از نقطه نظر شیوه پمپاژ آب، آزمایش لوفران به دو صورت زیر انجام می گیرد:

الف - ریختن آب به داخل گمانه<sup>۳</sup> برای گمانه هایی که سطح آب آنها پایین باشد، انجام می شود.

ب - تخلیه آب از گمانه<sup>۴</sup> برای گمانه هایی انجام می شود که سطح آب آنها در نزدیکی سطح زمین باشد.

بر اساس نحوه افزودن و یا خارج کردن آب از گمانه نیز آزمایش لوفران به یکی از سه روش زیر انجام می گیرد:

### الف - روش بار آبی ثابت<sup>۵</sup>

در این روش، پس از آماده سازی قطعه مورد آزمایش مداوماً آب به داخل گمانه تزریق می شود تا به ازای یک شدت جریان معین، سطح آب در نقطه ای بالاتر از قطعه مورد آزمایش یا سطح آب زیرزمینی ثابت بماند (در روش ریختن آب به داخل گمانه) و یا اینکه با یک شدت جریان معین آب از گمانه پمپاژ می شود تا در سطحی معین، زیر سطح آب زیرزمینی ثابت بماند (تخلیه آب از گمانه). پس از تثبیت سطح آب در گمانه شدت جریان ورودی و یا خروجی آب در گمانه قرائت می شود. این قرائت ها تا زمانی ادامه می یابد که اختلاف بین دو قرائت متوالی کمتر از ۱۰ درصد شود. فاصله زمانی بین قرائت ها ابتدا ۱ دقیقه و سپس ۵ یا ۱۰ دقیقه است. در این روش با در دست داشتن شدت جریان، شعاع گمانه و فشار هیدروستاتیک وارد به قطعه مورد آزمایش، می توان با استفاده از فرمولهای مربوط ضریب تراوایی را محاسبه کرد.

1- Horizontal Percolation

2- Vertical percolation

3 - Pumping in

4 - Pumping out

5 - Constant head



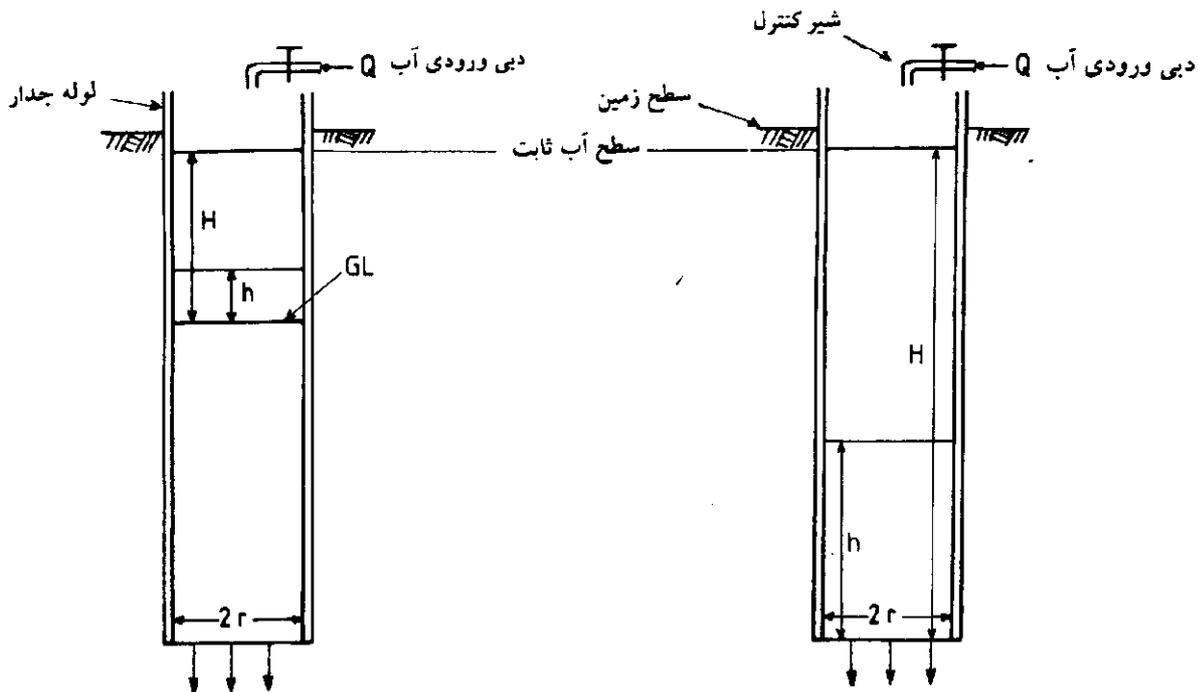
## ب- روش بار آبی افتان<sup>۱</sup>

در این روش پس از آماده‌سازی قطعه یا نقطه مورد آزمایش، آب به گمانه اضافه می‌شود تا به سطح معینی برسد. سپس جریان آب قطع می‌شود و تغییرات سطح آب در گمانه نسبت به زمان را اندازه می‌گیرند تا سطح آب به سطح آب زیرزمینی و یا قطعه مورد آزمایش نزدیک شود. فواصل زمانی اندازه‌گیری سطح آب برای پنج قرائت اول یک دقیقه و برای پنج قرائت بعدی پنج دقیقه است و قرائت‌های بیشتر در هر ده دقیقه انجام می‌گیرد.

## ج- روش بار آبی خیزان

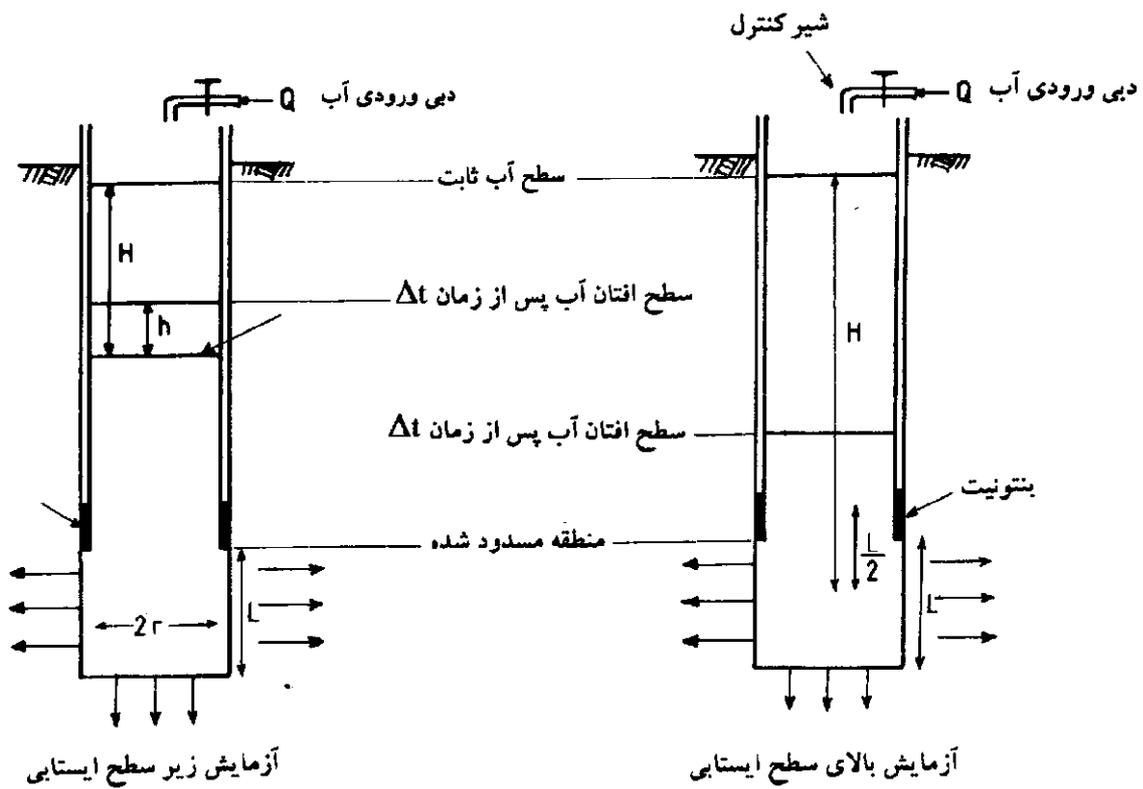
این روش طی پمپاژ آب از داخل گمانه انجام می‌شود و در گمانه‌هایی امکان‌پذیر است که سطح آب زیرزمینی در رقوم بالا و نزدیک به سطح زمین باشد، تا پمپاژ آب به سادگی امکان‌پذیر شود. در این روش آب زیرزمینی را به وسیله پمپ و یا هر وسیله دیگر به گونه‌ای خارج می‌کنند که سطح آب زیرزمینی افت کند و از سطح معینی عمل پمپاژ آب قطع شده و بالا آمدن یا خیز سطح آب زیرزمینی نسبت به زمان اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری تا رسیدن به سطح آب زیرزمینی ادامه می‌یابد.

شکل‌های شماره ۱۱، ۱۲ و ۱۳ آزمایش لوفران به روش‌های بار آبی ثابت و متغیر، افتان و خیزان را در حالت‌های افقی و قائم<sup>۲</sup> نشان می‌دهند.

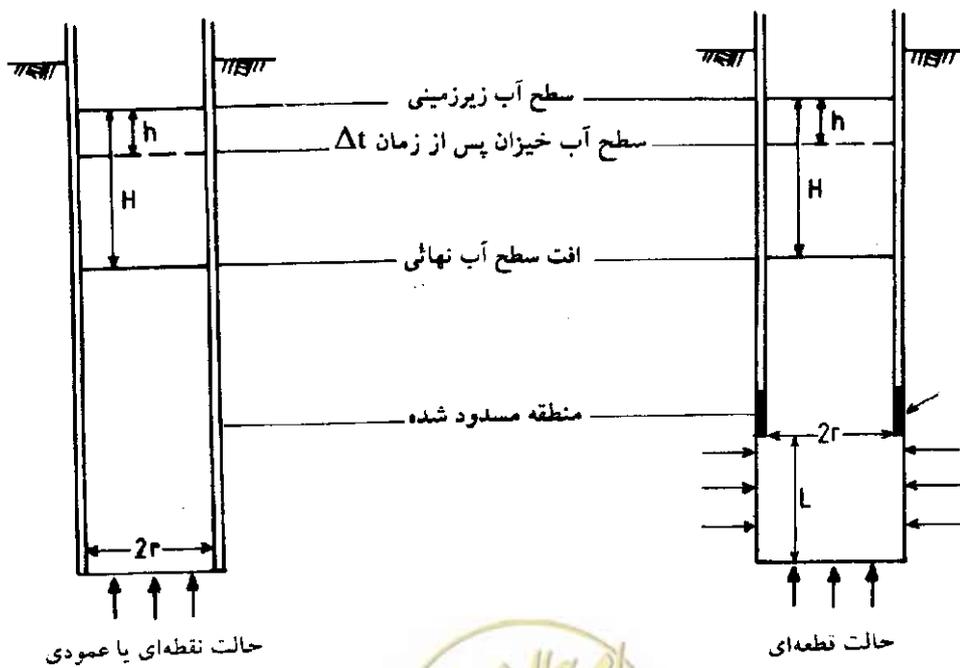


آزمایش در زیر سطح ایستایی

شکل ۱۱- آزمایش لوفران با روش‌های بار آبی ثابت و افتان در حالت عمودی یا نقطه‌ای



شکل ۱۲- آزمایش لوفران با روشهای بارآبی ثابت و افتان در حالت ایجاد قطعه افقی



شکل ۱۳- آزمایش لوفران با روش بارآبی خیزان در حالت‌های نقطه‌ای یا عمودی

### ۵-۳ ثبت نتایج آزمایش

نتایج و داده‌های ناشی از آزمایش در جدول شماره ۱۰ ثبت می‌شود. در این جدول، داده‌های زیر درج می‌شود:

- نام و موقعیت پروژه، شماره گمانه
- نام پیمانکار، ناظر و محاسب
- عمق ابتدا و انتهای قطعه (L)
- عمق سطح ایستابی
- عمق تا وسط قطعه مورد آزمایش و یا سطح ایستابی (هرکدام که کوچکتر است) (H)
- طول لوله جداری که از سطح زمین بالاتر است
- قطر لوله جداری و قطر قطعه و یا نقطه مورد آزمایش (۲r)
- جنس خاک مورد آزمایش
- قرائت‌های انجام شده در مورد روش بارآبی ثابت، زمان و شدت جریان است و در مورد روش‌های بارآبی افتان و خیزان، تغییرات سطح آب نسبت به زمان به ترتیب فرم پیوست است.

نمودارها و جدولهای پر نشده که در پیوست آورده شده است، به منظور استفاده کارشناسانی است که مایلند در انجام آزمایشها و غیره، آنها را به کار گیرند.



جدول ۱۰- ثبت نتایج آزمایش لوفران

شماره گمانه : S۴	صفحه : ..... از ..... صفحه
دستگاه نظارت :	قطعه آزمایش از ۱۲ تا ۱۳ (L) متر
پروژه :	عمق تا وسط قطعه یا سطح آب زیرزمینی (هر کدام کمتر است) : ۴ (H)
محل :	ارتفاع لوله جداری از سطح زمین : ۳۰ cm قطر : لوله جداری ۱۱۳ و قطعه ۱۰۱ (۲r)
توصیف لایه‌های خاک :	
پیمانکار : شرکت	نظارت توسط :
	محاسبه توسط :

بار آبی خیزان				بار آبی افتان		بار آبی ثابت			
خیز سطح آب		افت سطح آب		افت سطح آب		تخلیه با سطح آب ثابت (لیتر)		سطح آب قبل از اشباع	
دقیقه	قرائت (متر)	اختلاف قرائت (متر)	قرائت (لیتر)	دقیقه	قرائت (متر)	قرائت	اختلاف	دقیقه	قرائت (متر)
۰				۰		۴۵۰۵		۰	
۱				۱	۱/۰ m	۴۵	۴۵۵۰	۶	
۲				۲	۱/۸۵	۴۱	۴۵۹۱	۱۰	
۳				۳	۲/۲۸	۴۴	۴۶۳۵	۱۵	
۴				۴	۲/۷	۹۰	۴۷۲۵	۲۵	
۵				۵	۳/۱	۹۰	۴۸۱۵	۳۵	
۱۰				۱۰	۳/۳۵			۴۵	
۲۰				۲۰	۳/۶۵				
۳۰				۳۰	۴				
۴۰				۴۰					
۵۰				۵۰					
۶۰				۶۰					
۹۰				۹۰					
۱۲۰				۱۲۰					

محاسبات :	نفوذ قائم	نفوذ افقی
الف) آزمایش بار آبی خیزان و افتان	$K = \frac{r}{t} \log \frac{H}{h}$	الف) آزمایش بار آبی خیزان و افتان $K = \frac{r}{L} \log \frac{L}{r}$ (c= ۲/۶۴)
ب) آزمایش بار آبی ثابت	$K = \frac{Q}{5.5 rH}$	ب) آزمایش بار آبی ثابت $K = \frac{Q}{LH} \log \frac{L}{r}$ (L > ۱۰r)
	cm/s	Cm/s
	$K_f =$	$K_c = 1/15 \times 10^{-3}$

### ۳-۶ محاسبه ضریب تراوایی در حالت‌های مختلف

در دو حالت افقی و قائم از فرمولهای زیر استفاده می‌شود:

#### ۳-۶-۱ محاسبه ضریب تراوایی به روش قائم

الف - بار آبی خیزان و بار آبی افتان

$$K = 1/31 \frac{r}{t} \log \frac{H}{h} \quad (1-3)$$

که در آن:

$K$  = ضریب تراوایی بر حسب سانتیمتر در ثانیه

$r$  = شعاع داخلی لوله جداری در کف گمانه بر حسب سانتی‌متر

$t$  = زمان افت و یا خیز آب بر حسب ثانیه

$H$  = طول ستون آب تا نقطه مورد آزمایش یا سطح ایستایی بر حسب سانتیمتر (هرکدام کوچکتر باشد)

$h$  = افت یا خیز سطح ایستایی در زمان  $t$  بر حسب سانتی‌متر

ب - بار ثابت

$$K = \frac{Q}{5/5 \times rH} \quad (2-3)$$

که در آن:

$K$  = ضریب تراوایی بر حسب سانتیمتر بر ثانیه

$r$  = شعاع داخلی لوله جداری در کف گمانه بر حسب سانتیمتر

$H$  = طول ستون آب تا نقطه مورد آزمایش یا تا سطح آب زیرزمینی بر حسب سانتیمتر (هرکدام کوچکتر باشند)، در

صورتی که جریان آب تحت فشار باشد فشار اعمال شده نیز اضافه شود.

$Q$  = شدت آب ورودی بر حسب سانتیمتر مکعب در ثانیه

### ۳-۶-۲ محاسبه ضریب تراوایی به روش افقی

الف - بار آبی خیزان یا بار آبی افتان

$$K = \frac{c}{t} \log_{10} \frac{H}{h} \quad \text{و} \quad c = ۲/۶۴ \frac{r^2}{L} \log_{10} \frac{L}{r} \quad (۳-۳)$$

مشروط بر آنکه  $L > 10 r$

که در آن:

$K =$  ضریب تراوایی بر حسب سانتیمتر بر ثانیه

$C =$  ضریب ثابت برای قطعه مورد آزمایش

$t =$  زمان افت و یا خیز آب بر حسب ثانیه

$H =$  طول ستون آب تا وسط قطعه مورد آزمایش یا سطح ایستابی بر حسب سانتیمتر (هرکدام کوچکتر است)

$h =$  افت و یا خیز سطح ایستابی در زمان  $t$  بر حسب سانتیمتر

$r =$  شعاع گمانه در محل قطعه مورد آزمایش بر حسب سانتیمتر

$L =$  طول قطعه مورد آزمایش بر حسب سانتیمتر

ب - سطح آب ثابت

$$K = ۰/۳۷ \frac{Q}{LH} \log_{10} \frac{L}{r} \quad (۴-۳)$$

مشروط بر آنکه  $L \geq 10 r$

که در آن:

$K =$  ضریب تراوایی بر حسب سانتیمتر در ثانیه

$Q =$  شدت جریان ورودی آب بر حسب سانتیمتر مکعب در ثانیه

$L =$  طول قطعه مورد آزمایش بر حسب سانتیمتر

$H =$  طول ستون آب تا وسط قطعه مورد آزمایش یا سطح ایستابی (هرکدام کوچکتر باشد) بر حسب سانتیمتر

$r =$  شعاع گمانه در محل قطعه مورد آزمایش بر حسب سانتیمتر



پیوستها، نمودارها و جدولهای نمونه



# پیوست ۱- ثبت گزارش آزمایش تراوایی

آزمایش تراوایی آزمایشگاهی (روش آزمایش .....)

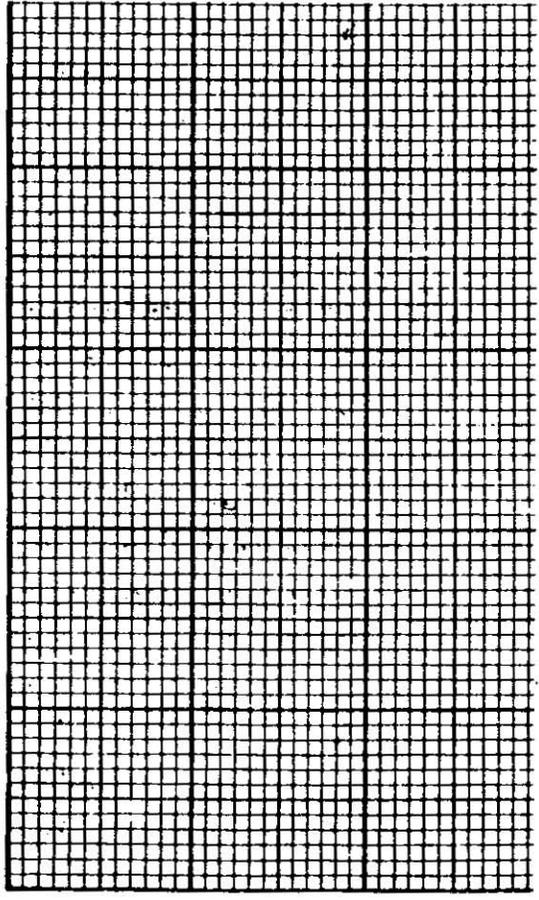
شماره کار:	شماره نمونه:	شماره گمانه:	عمق نمونه:
طول قطعه:	قطر قطعه:	سطح مقطع قطعه:	سطح مقطع لوله:
پروژه			توصیف خاک:

نمودار دبی - زمان	بار آبی ثابت				بار آبی افتان	
	قبل از اشباع		بعد از اشباع		بعد از اشباع	
	t دقیقه	v لیتر	t دقیقه	v لیتر	t دقیقه	Δh cm
۰						
۱						
۲						
۳						
۴						
۵						
۶						
۷						
۸						
۹						
۱۰						
۱۱						
۱۲						
۱۳						
۱۴						
۱۵						
۱۶						
۱۷						
۱۸						
۱۹						
۲۰						
۲۱						
۲۲						

۱- زمان (ثانیه)



Q - دبی (سانتی‌متر مکعب)

محاسبه ضریب تراوایی تحت بار آبی ثابت

$$K = \frac{vL}{Aht}$$

محاسبه ضریب تراوایی تحت بار آبی افتان

$$K = \frac{aL}{At} \times 2/30.26 \log \frac{h_0}{h_1}$$



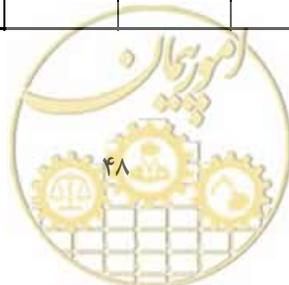
تاریخ و امضای آزمایش‌کننده:



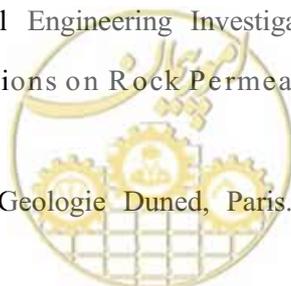


پیوست ۴- ثبت نتایج آزمایش فشار آب همراه با تحلیل رفتار توده سنگ به روش هالسبی

گروه	مقادیر لوژون		میزان آب تزریق شده در طی انجام آزمایش، قرائت شده از کنتور آب (لیتر)	فشار مانومتر (بار)		زمان آزمایش (دقیقه)				قطعه مورد آزمایش (متر)	تاریخ
	مقادیر انتخاب شده برای هر قطعه آزمایشی	برای هر پله فشار		واقعی	مورد نیاز	قرائت ساعت		واقعی	مورد نیاز		
						تا	از				
A خطی											
B آشفته											
C انبساط											
D فرسایش و شستشو											
E آب بندی خودبخودی											
#											



- ۱-۴ افلاکی، اسماعیل، آزمایشگاه مکانیک خاک، انتشارات علم و صنعت، ۱۳۷۲
- ۲-۴ بهرامی سامانی، فریدون، ترجمه استاندارد بررسیهای زمین شناسی پی سدها، کمیسیون بین المللی کمیته ملی سدهای بزرگ ژاپن، انتشارات مهتاب قدس ۱۳۶۷
- ۳-۴ جاوید، محمد، آزمایشهای مکانیک خاک، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران، ۱۳۶۵
- ۴-۴ مدنی، حسن، آبکشی و آبرسانی در معادن، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۶۷
- ۵-۴ معماریان، حسین، زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، انتشارات دانشگاه تهران ۱۳۷۴.
- ۶-۴ معماریان، حسین، زمین شناسی برای مهندسين، انتشارات دانشگاه تهران ۱۳۷۲.
- 4-7 Comberfort, H. 1964: Injections Des Sols, Vol. I, 2N Editions Eyrolles, Paris.
- 4-8 Criteria Governing the Dimensioning of the Grout Curtains and Drainage Screens. Deere, Deere, D.V., 1976. Dams on Rock Foundation - Some Desion Question, Rock Eng. For Foundations and Slopes Conference II. Boulder, Colorado, pp. 55-86
- 4-9 Earth Manual, 1974. 2ND Edition, USBR.
- 4-10 Ewert, F.K., 1985. Comments on Grouting Pressure and its Relation to Groutability, ICOLD, Q58-6.
- 4-11 Ewart, F.K. , 1985. Rock Grouting With Enphasis on Dam Site, Springer - Verlag.
- 4-12 Ewert, F.K., 1992. the individual Groutability of Rock, Water Power & Dams Construction.
- 4-13 Houlsby, A.C., 1985, Construction and Design of Cement Grouting, Curtain, Jhon Willey & sons, Inc.
- 4-14 Houlsby, A.C., 1985, Groutability and its Relation to Various factors. ICOLD, Q58-R6.
- 4-15 Houlsby, A.C., 1976. Routine Interpretation of the lugeon Water - Test. Q.J.Eng. Geol Vol. 9.
- 4-16 Hunt, R.E., 1984. Geotechnical Engineering Investigation Manual. Mc Graw Hill.
- 4-17 Kutzner, c.1985, Considerations on Rock Permeability and Grouting Criteria. ICOLD, Q.58.R.17.
- 4-18 Lugeon, M.1933. Barrages of Geologie Duned, Paris.



- 4-19 Nonveiller, E., 1970. A Rational Approach to Design of Grout Curtains. 2ND I.C.ISRM. Belgrade. Vol.3. R.G. pp.1-13.
- 4-20 Nonveiller, E., 1989. Grouting Theory and Practice. Elsevier.
- 4-21 Permeability and Grout take as Parameters. Problems In Interpreting The Water Pressure Tests and Selecting The Pressure for Evaluation of Permeability ICOLD, 1985. Q. 58-9.
- 4-22 Shibata, I.Iida. R. Matsunmoto. N., 1981 Procedures for the Investigations of Parmeability and Seepage Control In Soft Rock Foundations for Dams. Proc. Int. Symposium on Weak Rook.
- 4-23 Tanjingji, 1985. Water Pressure Tests in karstic Rock Foundation Practice in Wujiangdu Hydroelectric Project. ICOID, Q. 58-6.
- 4-24 Joseph E.Bowels, 1981. Engineering Properties of Soil. Mc Graw Hill.
- 4-25 Standard Test Method for Granular Soils (Constant Head), D2434-68 (Reapproved 1994).



Islamic Republic of Iran  
Plan and Budget Organization - Ministry of Energy

# Instructions for laboratory and field permeability testings

No: 188

Office of the Deputy for Technical Affairs  
Bureau of Technical Affairs and Standards

1378/2000



[omoorepeyman.ir](http://omoorepeyman.ir)

## این نشریه

با عنوان «دستورالعمل آزمایشهای تراوایی» نامگذاری شده است که شامل اندازه‌گیری ضریب تراوایی خاک در آزمایشگاه و خاک و سنگ در صحرا است. رایج‌ترین آزمایش صحرایی تعیین تراوایی در سنگ، آزمایش لوزون و در خاک، آزمایش لوفران است. این نشریه برای انجام آزمایشهای تراوایی در آزمایشگاه و در صحرا [در خاک و سنگ] و چگونگی محاسبات مربوطه، انتخاب مقادیر لوزون و ارزیابی رفتار توده سنگ در برابر فشار آب، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

مرکز مدارک اقتصادی - اجتماعی و انتشارات

ISBN 964-425-164-4



9 789644 251641



omoorepeyman.ir