جمهوری اسلامی ایران

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
موسسه تحقیقات خاک و آب

دستور کار با صفحات و محفظه‌های فشاری

نگارندگان

یوسف هاشمی‌نژاد و مهدی زنگی‌آبادی

اعضای هیات علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی

نشریه فنی: 627

1402

مشخصات اثر

عنوان: دستور کار با صفحات و محفظه‌های فشاری

نگارندگان: یوسف هاشمی نژاد و مهدی زنگی آبادی

ناشر: موسسه تحقیقات خاک و آب کشور

کارشناس انتشارات: سمانه پورمنصور

ویراستار ادبی: زهرا محمدی

طراح جلد: راضیه محمدی

سال انتشار: 1402

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

این اثر با شماره 63539 در تاریخ 1402/3/4 در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است.

نقل مطالب با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: کرج، میدان استاندارد، جاده مشکین‌دشت، بلوار امام خمینی (ره)، موسسه تحقیقات خاک و آب

کد پستی: 3177993545 **صندوق پستی:** 311-31785

نمابر : 02636210121 **تلفن:** 36201900- 026

وب‌سایت: http://www.swri.ir **پست الکترونیکی:** info@swri.ir

مسئولیت صحت مطالب به عهده نگارندگان است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیش‌گفتار 1
1- مفاهیم و تعاریف پایه 2
1-1- محتوای آب در خاک 2
1-2- پتانسیل آب در خاک 3
1-3- واحدهای متداول در اندازه‌گیری پتانسیل آب در خاک 5
1-4- منحنی مشخصه رطوبتی خاک 6
1-5- استخراج آبِ خاک به‌وسیله‌ی فشار هوا 9
2- ابزار و وسایل 11
2-1- سلول فشاری 100 کیلوپاسکال 11
2-2- محفظه 500 کیلوپاسکال 12
2-2-1- انواع صفحات مورد استفاده در محفظه 500 کیلوپاسکال 13
2-3- محفظه 1500 کیلوپاسکال 13
2-4- تأمین و تنظیم‌کننده‌های فشار 14
2-4-1- تامین فشار برای سلول فشاری 14
2-4-2- تامین و تنظیم فشار برای محفظه فشاری 15
3- روش انجام آزمایش 16
3-1- روش انجام آزمایش با سلول 100 کیلوپاسکال 16
3-1-1- جایگذاری نمونه‌های خاک در سلول 17
3-1-2- توزین نمونه‌ها 17
3-2- روش انجام آزمایش با سلول 500 کیلوپاسکال 18

3-2-1- اشباع کردن صفحه و نمونه خاک 18
3-2-2- تنظیم فشار محفظه 500 کیلوپاسکال 20
3-3- روش انجام آزمایش با سلول 1500 کیلوپاسکال 22
3-3-1- بازکردن و بستن درب محفظه 22
3-3-2- اتصال صفحه سرامیکی به محفظه 23
3-3-3- تنظیم فشار محفظه 1500 کیلوپاسکال 26
3-4- آماده‌سازی خاک 27
3-5- ملاحظات و مراقبت از صفحه و محفظه فشاری 1500 کیلوپاسکال 29
3-6- خطاهای رایج در کار با دستگاه صفحات فشاری 31
منابع 32

پیش‌گفتار

لازمه توصیف و پیش‌بینی جریان آب در خاک‌های غیراشباع، شناخت صحیح از ویژگی‌های این خاک‌ها است. یکی از ویژگی‌های اصلی این خاک‌ها که در محاسبات مهندسی استفاده می‌شود رابطه بین مکش (یا فشار آب) بر حسب (cm_{H2O} یا kPa) و میزان رطوبت حجمی برحسب (cm^3/cm^3) می‌باشد. این رابطه منحنی مشخصه رطوبتی خاک نامیده می‌شود. این ویژگی نه تنها رطوبت خاک در مکش‌های مختلف را که در مدیریت آب خاک مهم است نشان می‌دهد؛ بلکه ویژگی‌های دیگری مانند توزیع اندازه منافذ، تخلخل کل و رطوبت قابل استفاده را نیز بیان می‌کند (خداوردی‌لو و همایی، 1381). هم‌چنین از این ویژگی برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع و نیز حرکت املاح در خاک‌ها استفاده می‌شود. هر چند روش‌هایی معرفی شده است که این مقادیر را بتوان از روی ویژگی‌های زودبازیافت خاک مانند توزیع اندازه ذرات و دیگر ویژگی‌های فیزیکی خاک تخمین زد، ولی بیشتر این روش‌ها اگر نگوییم همه آن‌ها برای خاک‌هایی متفاوت از خاک‌های کشور ما استخراج شده‌اند و کاربرد آن‌ها برای شرایط خاک‌های ایران جای بحث فراوان دارد. به این ترتیب ضروری است، اندازه‌گیری‌های هرچه بیشتری از این ویژگی‌های خاک‌ها در کشور صورت پذیرد. تهیه بانک اطلاعات این اندازه‌گیری‌ها به همراه دیگر ویژگی‌های زودبازیافت خاک، می‌تواند برای تهیه توابع انتقالی متناسب با خاک‌های کشور کارساز باشد.

دو دسته اصلی از تکنیک‌ها برای اندازه‌گیری پتانسیل آب در خاک بر روی نمونه‌های خاک در آزمایشگاه وجود دارد. دسته اول استفاده از محفظه و صفحات فشاری سرامیکی و دسته دوم ستون آویزان آب (یا روش جعبه شنی) است. البته روش‌های دیگری مانند سایکرومترترموکوپل، کاغذ صافی، سانتریفیوژ و روش‌هایی از این دست نیز معرفی شده‌اند که کاربرد گسترده‌ای در کشور پیدا نکرده‌اند.

1- مفاهیم و تعاریف پایه

1-1- محتوای آب در خاک

محتوای آب در خاک که گاهی از آن با عنوان رطوبت خاک نیز یاد می‌شود یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر بر رشد و نمو گیاهان است. اطلاع از محتوای آب در خاک از لحاظ برنامه‌ریزی حجم و زمان آبیاری بسیار دارای اهمیت است. به همین دلیل روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم وضعیت رطوبتی خاک پیشنهاد شده است. محتوای آب در خاک را می‌توان بر مبنای جرمی و یا بر مبنای حجمی بیان کرد

$$\text{محتوای جرمی رطوبت خاک} = \frac{\text{جرم آب}}{\text{جرم خاک خشک}}$$

$$\text{محتوای حجمی رطوبت خاک} = \frac{\text{حجم آب}}{\text{حجم خاک دست نخورده}}$$

محتوای جرمی رطوبت خاک (θ_m)، جرم آب (m_w) جرم خاک خشک (m_s)، محتوای حجمی رطوبت خاک (θ_v) حجم آب (v_w) و حجم خاک دست‌نخورده (v_t) باشد، شکل ریاضی روابط فوق بصورت زیر است:

$$\theta_m = \frac{m_w}{m_s} \quad (1)$$

$$\theta_v = \frac{v_w}{v_t} \quad (2)$$

اگر مقادیر فوق در 100 ضرب شوند، درصد رطوبت جرمی و درصد رطوبت حجمی بدست خواهد آمد. در رابطه (2) می‌توان بجای حجم آب از جرم آب نیز استفاده کرد. روابط (1) و (2) نسبت هستند و با واحدهای هم‌اندازه بیان می‌شوند. مثلاً گرم بر گرم یا لیتر بر لیتر.

برای تبدیل رطوبت جرمی به حجمی از جرم مخصوص ظاهری (ρ_b) استفاده می‌شود. جرم مخصوص ظاهری نسبت جرم خاک خشک به حجم خاک دست‌نخورده است:

$$\rho_b = \frac{m_s}{v_t} \quad (3)$$

اگر رطوبت جرمی در جرم مخصوص ظاهری ضرب شود، رطوبت حجمی حاصل می‌شود:

$$\theta_m \times \rho_b = \frac{m_w}{m_s} \times \frac{m_s}{v_t} = \frac{m_w}{v_t} = \frac{v_w}{v_t} = \theta_v \rightarrow \theta_v = \theta_m \times \rho_b \quad (4)$$

روش اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک در آزمایشگاه، اندازه‌گیری رطوبت جرمی است که به این منظور نمونه خاک مرطوب پس از توزین، به مدت 24 ساعت در دمای 104 درجه سانتی‌گراد در آون خشک می‌شود و سپس دوباره توزین می‌شود. تفاضل جرم تر و خشک، نشان‌دهنده جرم آب می‌باشد. سپس با استفاده از رابطه (1) می‌توان رطوبت جرمی را بدست آورد. از طرف دیگر عمده سنسورهایی که رطوبت خاک را بصورت غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌کنند رطوبت را بر مبنای حجمی نمایش می‌دهند و نیز در مدیریت آبیاری در مزرعه کاربرد رطوبت حجمی ساده‌تر است، با استفاده از رابطه (4) این مقادیر به یکدیگر قابل تبدیل هستند.

1-2- پتانسیل آب در خاک

برای بیان وضعیت رطوبتی خاک و ارتباط آن با رشد گیاه و جذب آب توسط ریشه، محتوای رطوبت خاک معیار مناسبی نیست. چرا که مقدار رطوبت نگهداری شده در خاک‌هایی با بافت‌های متفاوت، یکسان نیست و از دیگر سو، خاک‌های دارای بافت‌های متفاوت آب را با سرعت و سهولت یکسانی در اختیار ریشه گیاه قرار نمی‌دهند (Lazarovitch, Vanderborght et al., 2018). به‌طور نمونه اگر دو خاک درای بافت رسی و شنی ولی با محتوای رطوبت یکسان در مجاورت همدیگر قرار داده شوند، انتظار می‌رود که آب از خاک شنی به سمت خاک رسی منتقل شود. در نتیجه علی‌رغم این‌که محتوای آب دو خاک مساوی است، ولی موضوعی که باعث حرکت آب در این مثال می‌شود، تفاوت در انرژی آب در دو نمونه خاک با بافت متفاوت است.

آبِ خاک نیز مانند هر جسم دیگری تمایل دارد از سطح انرژی بیشتر به سطح انرژی کمتر منتقل شود. انرژی دارای دو جزء انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل است. از آن‌جا که سرعت حرکت آب در خاک و محیطهای متخلخل بسیار کند است، در نتیجه انرژی جنبشی آب در خاک بسیار کم و قابل چشم‌پوشی است. موضوعی که باعث حرکت آب در خاک و جذب آب توسط ریشه می‌شود، انرژی پتانسیل است که از آن با عنوان پتانسیل آب در خاک نیز یاد می‌شود.

پتانسیل آب در خاک دارای چهار بخش است:

1) پتانسیل گرانشی، 2) پتانسیل فشاری، 3) پتانسیل ماتریک و 4) پتانسیل اسمزی

پتانسیل گرانشی در اثر نیروی گرانش زمین ایجاد و پتانسیلی است که جسم به دلیل موقعیت خود نسبت به یک سطح مقایسه مرجع دارا می‌باشد. نقاطی که زیر سطح مرجع باشند دارای پتانسیل گرانشی منفی و نقاط بالای سطح مرجع دارای پتانسیل گرانشی مثبت هستند. پتانسیل ثقلی مستقل از ویژگی‌های خاک است و تنها به فاصله عمودی بین نقطه موردنظر تا سطح مقایسه بستگی دارد.

پتانسیل فشاری در زیر سطح ایستابی و خاک‌های اشباع کاربرد دارد. مقدار پتانسیل فشاری وابسته به ارتفاع ستون آب بالای هر نقطه از خاک است که به این ترتیب مقدار آن همواره مثبت است. عمده شرایطی که در کشاورزی با آن روبرو هستیم شرایط غیر اشباع است که در این شرایط مقدار پتانسیل فشاری صفر است. پتانسیل فشاری را با پیزومتر اندازه‌گیری می‌کنند. در سطح آب پیزومتری، پتانسیل فشاری برابر صفر و در زیر این سطح، همیشه مثبت است و با افزایش عمق زیر سطح آزاد آب، پتانسیل فشاری افزایش می‌یابد.

پتانسیل ماتریک بر خلاف پتانسیل فشاری، به نیروی جذب سطحی ماتریکس (گوشته) خاک مربوط است. پتانسیل ماتریک تنها در حالت غیر اشباع کاربرد دارد و مقدار آن همواره منفی است. پتانسیل ماتریک یکی از ویژگی‌های پویای خاک است و مقدار آن را می‌توان با استفاده از تانسیومتر اندازه‌گیری کرد. هرچه میزان مکش وارد شده به آب توسط خاک بیشتر باشد پتانسیل ماتریک آب منفی‌تر می‌شود به عنوان نمونه در یک محتوای رطوبت یکسان خاک رسی نسبت به یک خاک شنی مکش بیشتری بر آب خاک وارد می‌کند. به این ترتیب پتانسیل ماتریک خاک رسی در این شرایط منفی‌تر از خاک شنی است. پتانسیل ماتریک مهم‌ترین بخش پتانسیل آب در خاک‌های کشاورزی است و مطالب این دستورالعمل برای اندازه‌گیری همین بخش پتانسیل آب در خاک کاربرد دارد.

پتانسیل اسمزی نشان‌دهنده مکشی است که در اثر اختلاف غلظت و وجود یک غشای نیمه‌تراوا بر آبِ خاک وارد می‌شود. اگر غشای نیمه‌تراوایی وجود داشته باشد که اجازه عبور آب را بدهد ولی به املاح حل شده در آب اجازه عبور ندهد و در دو طرف این غشای نیمه‌تراوا، اختلاف غلظت املاح وجود داشته باشد، آب از سمت محلول رقیق‌تر به سمت

محلول غلیظ‌تر حرکت خواهد کرد. در واقع محلول غلیظ‌تر مکشی را بر آب موجود در محلول رقیق‌تر وارد می‌کند. شرط وجود پتانسیل اسمزی، وجود غشای نیمه‌تراوا بوده و از آن‌جا که غشای سلول‌های ریشه دارای این خاصیت می‌باشد، پتانسیل اسمزی در جذب آب توسط ریشه تاثیرگذار است ولی در حرکت آب در خاک (بدون حضور ریشه) تاثیرگذار نیست.

3-1- واحدهای متداول در اندازه‌گیری پتانسیل آب در خاک

انرژی آب در خاک را می‌توان بر مبنای واحد جرم یا واحد حجم بیان کرد. واحد استاندارد انرژی بر مبنای جرم، ژول بر کیلوگرم (J/Kg) است. انرژی بر مبنای حجم معادل فشار بوده و از این‌رو از واحد استاندارد فشار در سیستم بین‌المللی، یعنی پاسکال (Pa)، برای آن استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که اگر چگالی آب 1 مگاگرم بر مترمکعب (Mg/m^3) باشد، 1 ژول در کیلوگرم معادل 1 کیلوپاسکال است. پتانسیل بر مبنای حجم دارای معایبی است، مهم‌ترین عیب آن این است که برای کاربرد آن در معادلات جریان باید فرض شود که چگالی آب ثابت است. پذیرش واحدهای ژول بر کیلوگرم و پاسکال به‌عنوان واحدهای استاندارد پتانسیل آب نیازمند مقداری بازآموزی است، چراکه هیچ‌کدام معادل واحدهای مرسوم برای استفاده نیستند. استفاده از پتانسیل بر مبنای جرم مبتنی بر فرضیات کمتری بوده و ارتباط مشخص‌تری با انرژی آب در خاک دارد. به همین دلیل واحدهای جرمی به واحدهای حجمی ترجیح داده می‌شوند. در این دستورالعمل سعی شده است تمام واحدها برحسب واحدهای استاندارد متروکیلوپاسکال بیان شود.

پتانسل آب در خاک بر حسب واحدهای برخی از مهم‌ترین و متداول‌ترین واحدهای پتانسیل و ضرایب تبدیل آن‌ها در جدول (1) نشان داده شده است. این ضرایب برای تبدیل واحدهای ستون سمت راست به ردیف بالا باید در عدد مورد نظر ضرب شوند. برای تبدیل واحد از ردیف بالا به ستون سمت راست باید عدد مورد نظر بر این مقادیر تقسیم شود.

جدول (1) ضرایب تبدیل برخی واحدهای پتانسیل اسمزی به یکدیگر. سانتی‌متر در جدول فشار ستون آب است.

واحد	بار	میلی‌بار	سانتی‌بار	اتمسفر	سانتی‌متر	مگاپاسکال	کیلوپاسکال	psi
بار	1							
میلی‌بار	0/001	1						
سانتی‌بار	0/01	10	1					
اتمسفر	1	1000	100	1				
سانتی‌متر*	0/001	1	0/1	0/001	1			
مگاپاسکال	10	10000	10000	10	10000	1		
کیلوپاسکال	0/01	10	1	0/01	10	0/001	1	
Psi	0/06895	68/95	6/895	0/06895	68/95	0/006895	6/895	1

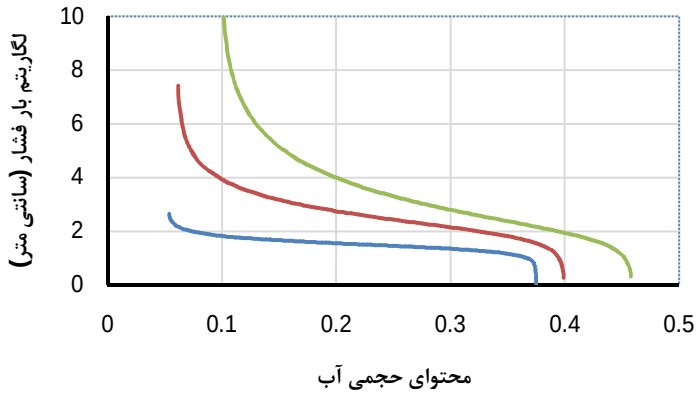
*: سانتی‌متر ستون آب

**: پی اس آی معادل فشار ناشی از یک پوند نیرو بر مساحت یک اینچ مربع است.

4-1- منحنی مشخصه رطوبتی خاک

منحنی مشخصه رطوبتی خاک در واقع رابطه بین محتوای آب و پتانسیل آب در خاک است. از آن‌جا که برنامه‌ریزی آبیاری بر مبنای نقاط مهم پتانسیلی (مانند ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی) انجام می‌شود ولی اندازه‌گیری وضعیت آب در مزرعه معمولاً به صورت محتوای حجمی آب است، لازم است بتوان این دو مقدار را به یکدیگر تبدیل کرد. برای هر خاک مقدار نگهداری آب در پتانسیل‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. معمولاً محتوای حجمی آب در محور افقی و لگاریتم مکش بر حسب سانتی‌متر آب (با علامت مثبت) در محور عمودی قرار می‌گیرد. به منحنی حاصله منحنی مشخصه رطوبتی خاک گفته می‌شود.

با استفاده از غشاها و صفحات فشاری، منحنی مشخصه رطوبتی برای هر نوع خاک را می‌توان ترسیم کرد. هر نقطه از این منحنی، نشان‌دهنده مکش متناظر با محتوای آبِ خاک در آن مکش است(شکل 1) این منحنی در مطالعات حرکت آب در خاک و مقدار رطوبت قابل استفاده خاک برای رشد گیاه، کاربرد دارد.



شکل 1- منحنی رطوبتی خاک که برای سه نوع خاک مختلف (آبی برای خاک شنی، قرمز برای خاک لومی و سبز برای خاک رسی) رسم شده است. با استفاده از بانک اطلاعات ROSETTA

همان‌گونه که در شکل 1 مشخص است، تغییر محتوای آب با افزایش مکش در خاک شنی بسیار شدید است و با افزایش درصد رس خاک، این تغییرات تدریجی‌تر می‌شود. این تغییرات شدید به گونه‌ای است که در لگاریتم بار فشار 2 که معادل 100 سانتی‌متر مکش است، خاک شنی تقریباً تمام آب موجود در خود را از دست می‌دهد، در حالی‌که برای خاک لومی این اتفاق در مکش حدود 10000 سانتی‌متری می‌افتد.

به دلیل پیچیدگی روابط آب و خاک مدل‌های ریاضی بسیاری برای شبیه سازی این روابط معرفی شده اند. آگاهی از این روابط در مسایل مختلف آبیاری و زهکشی، برای تعیین نیاز آبی گیاهان، مقدار آب موجود در خاک، کنترل شوری، مدیریت و برنامه ریزی آبیاری و غیره بسیار اهمیت دارد. منحنی‌های مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع از جمله مهمترین عوامل در بررسی حرکت آب در خاک هستند. بیان کمی این دو ویژگی منجر به تعیین مقدار آب قابل استفاده برای رشد گیاهان می شود. در ادامه برخی از مهم‌ترین این معادلات بصورت خلاصه معرفی شده‌اند.

معادله بروکس و کوری (Brooks and Corey 1964): نخستین بار برای بررسی جریان نفت در خاک مطرح شد، و به دلیل شکل ساده ریاضی آن در فیزیک خاک نیز استفاده شد:

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(\alpha h)^{-\lambda} & \alpha h \geq 1 \\ \theta_s & \alpha h < 1 \end{cases} \quad (5)$$

در این رابطه θ رطوبت معادل پتانسیل ماتریک خاک h، θ_s مقدار رطوبت اشباع، θ_r مقدار رطوبت باقیمانده، α عکس مقدار پتانسیل ماتریک نشان‌دهنده نقطه ورود هوا به خاک، h پتانسیل ماتریک و λ شاخص توزیع اندازه ذرات است.

معادله کمپل(Campbell 1974): نخست با استفاده از مثلث بافت خاک شیرازی و بورسما (Shirazi and Boersma 1984) میانگین هندسی قطر ذرات (dg) و انحراف معیار هندسی (σg) به عنوان تابعی از اندازه و فراوانی ذرات شن، سیلت و رس محاسبه می‌شود. سپس دیگر پارامترها با توجه به معادله تعیین می‌شود:

$$h = h_b \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{-b} \qquad h < h_{es} \quad (6)$$

$$h_{bs} = -0.5 dg^{-0.5} \quad (7)$$

$$h_b = h_{bs} \left(\frac{\rho_b}{1.3}\right)^{0.67b} \quad (8)$$

$$b = -2h_b + 0.2\sigma g \quad (9)$$

که در روابط بالا h پتانسیل ماتریک، (h_{bs}) پتانسیل ماتریک استاندارد در نقطه ورود هوا به خاک ($=1.3\rho_b$)، b فاکتور شکل، n تخلخل کل خاک، ρ_b جرم ویژه ظاهری و ρ_s جرم ویژه حقیقی خاک است. مقدار رطوبت اشباع خاک θ_s تقریباً 5 درصد کمتر از تخلخل کل خاک در نظر گرفته می‌شود.

معادله کمپل در نقطه $\theta = \theta_s$ دارای گسیختگی است. زیرا اگر $\theta = \theta_s$ شود نسبت‌شان برابر یک می‌شود و در این حالت بایستی پتانسیل ماتریک صفر شود؛ چون خاک اشباع است. در حالی که در معادله کمپل وقتی رطوبت خاک اشباع شد مقدار پتانسیل ماتریک برابر h_e می‌شود.

معادله وان‌گنوختن(Van Genuchten 1980): رابطه ریاضی معادله وان‌گنوختن به شکل زیر است:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1+(\alpha h)^n]^m} \quad (10)$$

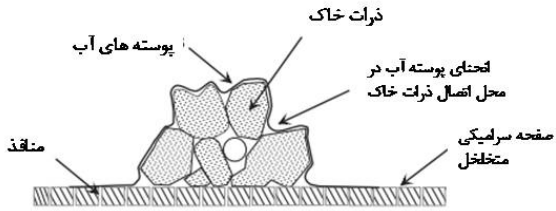
m،α و n پارامترهای شکل هستند که تاثیر زیادی بر شکل منحنی رطوبتی دارند. θ رطوبت معادل پتانسیل ماتریک خاک h، θs مقدار رطوبت اشباع، θ_r مقدار رطوبت باقیمانده است.

1-5- استخراج آبِ خاک به‌وسیله‌ی فشار هوا

روابط آبی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی هستند که بر کاربرد خاک در مقاصد کشاورزی و مهندسی تاثیرگذار هستند. در آزمایشگاه‌ها برای مطالعه بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی خاک و نیز برای استخراج محلول خاک برای تجزیه شیمیایی، از غشاها و صفحات فشاری استفاده می‌شود. روش‌های دیگری نیز مانند فشرده کردن، سانتریفیوژ (Reynolds, 1984)، جابجایی (Menzies and Bell, 1988)، جذب ملکولی (Van Hees, Vinogradoff et al., 2003) برای این منظور استفاده می‌شود. ولی در هر کدام از این روش‌ها، بازه کاربرد روش، بسیار محدود است. در بسیاری از موارد، اجرای روش مشکل است و در برخی موارد، ساختمان خاک تخریب می‌شود. در مقابل غشاها (Richards, 1941) و صفحات فشاری، ابزاری راحت و قابل اعتماد برای استخراج آبِ خاک بدون تخریب ساختمان خاک در شرایط کنترل شده و در تمام دامنه رطوبتی رشد گیاه هستند. از این روش می‌توان بر روی نمونه‌های دست خورده و دست نخورده خاک استفاده نمود.

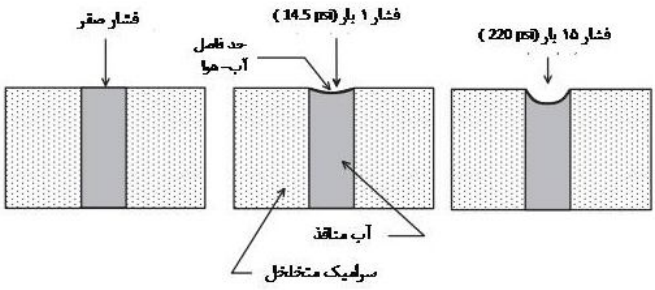
غشاها و صفحات فشاری در تعیین نفوذپذیری ستون‌های خاک دست نخورده، و مطالعات اثر پس‌ماند در خاک استفاده می‌شوند. محلول خاک را می‌توان در فواصل مکش مشخص استخراج و برای تجزیه شیمیایی استفاده کرد. صفحات فشاری انطباق خوبی برای واسنجی ابزارهای مختلف اندازه‌گیری رطوبت خاک و حتی در فرآیند اولترافیلتراسیون مانند جداسازی ملکول‌های سنگین پروتئین از محلول‌های رقیق نشان داده‌اند (Molinari, Poerio et al., 2005).

اصول کارکرد غشاها و صفحات فشاری، کاملاً شناخته شده است. مدت‌ها آبِ خاک را با مکش از آن استخراج می‌کردندکه در آن یک سرامیک متخلخل نقش رابط داشته و همچنین وسیله‌ای برای حفظ اختلاف فشار بین آبِ خاک و آب طرف مقابل بود. غشاها و صفحات فشاری، تغییر یافته‌ی فرآیند مکش هستند که در آن آب با استفاده از فشار مثبت در داخل منافذ سرامیک متخلخل یا غشا به حرکت درمی‌آید. در حالت تعادل فرض بر این است که آبِ خاک با نیرویی معادل فشار اعمال شده ولی با مقدار منفی نگهداری می‌شود.



شکل 2- ذرات خاک روی سرامیک متخلخل

شکل 2 نمایی از ذرات خاک را در تماس با صفحه سرامیکی متخلخل در داخل محفظه فشاری نشان می‌دهد. در زیر سرامیک متخلخل خیس شده، یک صفحه متخلخل با مش ریز قرار دارد که مسیری را برای عبور محلول استخراج شده فراهم می‌آورد و زیر آن به وسیله‌ی غشای لاستیکی مسدود شده است. نمونه‌های خاک مستقیم روی صفحه سرامیکی قرار گرفته و روی صفحه اشباع می‌شوند. پس از بستن پیچ‌های درب محفظه، فشار هوا را می‌توان به مقدار مورد نظر در آزمایش (0/1 تا 1500 کیلوپاسکال)، تنظیم نمود. به محض این‌که فشار هوا در داخل محفظه، بالاتر از فشار هوا شود، آب اضافی از راه منافذ میکروسکوپی صفحه سرامیکی به بیرون رانده می‌شود. با این حال، هوای فشرده از داخل منافذ عبور نمی‌کند زیرا این منافذ با آب پر شده‌اند و کشش سطحی آب مانع از ورود هوا به داخل منافذ می‌شود. وقتی که فشار هوا در داخل محفظه زیاد می‌شود، شعاع انحنای سطح تماس کم می‌شود (شکل 3). با این حال پوسته‌ی آب نمی‌شکند و این امکان را فراهم می‌آورد که فشار هوا در تمام محفظه اعمال شود.



شکل 3- شعاع انحنای پوسته‌ی آب در سطح تماس آب و هوا در فشارهای مختلف

پس از تنظیم فشاری مشخص در داخل محفظه، آبِ خاک از اطراف ذرات خاک حرکت کرده و از داخل منافذ صفحه سرامیکی به بیرون رانده می‌شود و این اتفاق تا زمانی ادامه می‌یابد که شعاع انحنای پوسته آب در داخل نمونه خاک معادل شعاع انحنای آب موجود در منافذ صفحه سرامیکی شود. زمانی که این حالت روی دهد، تعادل حاصل شده است و جریان آب متوقف می‌شود. به محض این که فشار هوا در محفظه افزایش یابد، دوباره آب خاک جریان یافته تا زمانی که تعادل جدیدی حاصل شود.

در حالت تعادل رابطه‌ای معکوس بین فشار هوا (نیروی مثبت) در محفظه و مکش خاک (نیروی منفی) وجود دارد. برای نمونه‌ای که با فشار هوای داخل محفظه به تعادل رسیده است، می‌توان محتوای آب متناظر با آن فشار را بر مبنای وزنی یا حجمی تعیین نمود. برای نمونه اگر فشار هوا در محفظه در 100 کیلوپاسکال تنظیم شده باشد، مکش خاک در حالت تعادل 100 کیلوپاسکال خواهد بود. و همینطوراگر فشار هوا در داخل محفظه 1500 کیلوپاسکال باشد، مکش خاک در حالت تعادل 1500 کیلوپاسکال است.

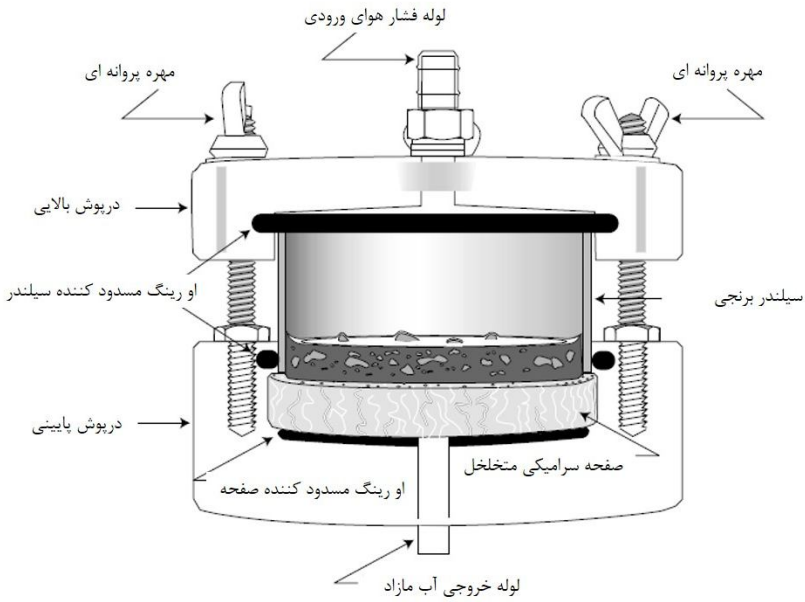
اصول کارکردی که در بالا توصیف شد برای تمام صفحات و غشاهای فشاری مشابه است. با این تفاوت که استفاده از غشاهای سلولوزی امکان اعمال فشار تا 10000 کیلوپاسکال را فراهم می‌آورند. در حالی‌که محدودیت کارکرد صفحات فشاری 1500 کیلوپاسکال است. ولی در صفحات سرامیکی زمان تعادل بسیار سریع‌تر رخ می‌دهد چرا که اندازه منافذ درشت‌تر است و سرعت هدایت آب بیشتر است. صفحات سرامیکی برای استخراج محلول‌های شیمیایی از خاک مناسب نیستند چرا که سطح ویژه بسیار زیاد داخل این صفحات سرامیکی بر ترکیب شیمیایی مواد استخراج شده تاثیرگذار خواهد بود. برای استخراج مواد شیمیایی از محلول خاک می‌توان از غشاءهای فشاری استفاده نمود (Bittelli and Flury, 2009).

2- ابزار و وسایل

2-1- سلول فشاری 100 کیلوپاسکال

سلول فشاری 100 کیلوپاسکال برای اندازه‌گیری‌های مرسوم 10، 33 و 100 کیلوپاسکال بر روی نمونه‌های دست نخورده خاک مناسب هستند. نقطه ورود هوای

این سلول‌ها بیشتراز 100 کیلوپاسکال و معمولاً بین 120تا 170کیلوپاسکال است (Sakaki and Illangasekare, 2007). این سلول‌ها بیشترین نفوذپذیری وکوتاه‌ترین زمان برای رسیدن به حالت تعادل را نسبت به تمام صفحات فشاری دارند. شکل 4 یک مقطع عرضی از دستگاه صفحه فشاری و سلول فشاری 100 کیلوپاسکال را نشان می‌دهد.



شکل 4- نمایی از سلول فشاری 100 کیلوپاسکال

2-2- محفظه 500 کیلوپاسکال

محفظه 500 کیلوپاسکال دارای یک بدنه محکم و آب‌بندی شده در مقابل فشار است که انواع مختلف صفحات فشاری در دامنه صفر تا 500 کیلوپاسکال را می‌توان در داخل آن به‌کار برد. سلول از فولاد ساخته شده و برای جلوگیری از خوردگی قسمت‌های داخلی و بیرونی آن پوشش‌دار است.

2-2-1- انواع صفحات استفاده شده در محفظه 500 کیلوپاسکال

در محفظه 500 کیلوپاسکال می‌توان از صفحات سرامیکی 100 کیلوپاسکال ، 300 کیلوپاسکال و 500 کیلوپاسکال استفاده نمود. صفحه‌های 100 کیلوپاسکال برای اندازه‌گیری‌های مرسوم در دامنه 10 تا 33 کیلوپاسکال مناسب هستند. نقطه ورود هوای این صفحات بیشتر از 100 کیلوپاسکال است. صفحات فشاری 300 کیلوپاسکال نیز می‌توانند برای مطالعات نگهداری آب خاک در دامنه صفر تا 300 کیلوپاسکال استفاده شوند. نقطه ورورد هوای این صفحات بیش از 300 کیلوپاسکال بوده و معمولاً بین 380 تا 450 کیلوپاسکال است. صفحات 500 کیلوپاسکال نیز به‌راحتی در این محفظه قابل استفاده هستند، ولی برای استفاده از صفحات با نقطه ورود هوای بالاتر باید از محفظه 1500 کیلوپاسکال استفاده کرد.

صفحات فشاری 1500 کیلوپاسکال به دلیل اندازه ریز منافذ و نیز نفوذپذیری بسیار کم برای مطالعات نگهداری آب در خاک در دامنه صفر تا 100 کیلوپاسکال مناسب نیستند. نقطه ورود هوای این صفحات بیش از 1500 کیلوپاسکال بوده و برای مطالعات منحنی مشخصه رطوبتی در کل دامنه تغییرات مکش، باید از این صفحات در محفظه 1500 کیلوپاسکال استفاده نمود.

2-3- محفظه 1500 کیلوپاسکال

محفظه 1500 کیلوپاسکال (15 بار) برای اعمال فشار تا 15 بار مناسب است. به این ترتیب صفحات 5، 10 و 15 بار را باید در این محفظه قرار داد تا فشار مورد نظر را بتوان بر روی آن اعمال کرد.

شکل 5- محفظه فشاری مورد استفاده برای صفحات 1500 کیلوپاسکال

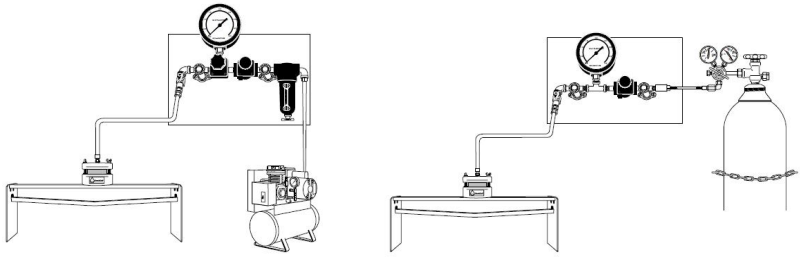
درب دستگاه استخراج‌کننده صفحات فشاری 1500 کیلوپاسکال به محفظه وصل است (شکل 5). در عین حال می‌توان آن‌را از بدنه جدا کرد. در این دستگاه می‌توان سه صفحه 1500 کیلوپاسکال را با استفاده از جداکننده‌هایی روی همدیگر قرار داد.

2-4- تأمین و تنظیم‌کننده‌های فشار

2-4-1- تامین فشار برای سلول فشاری

برای استخراج آب خاک با استفاده از فشار هوا، نیاز به منبعی از هوای با فشار تنظیم شونده است. برای این منظور می‌توان از کمپرسور هوای متصل به رگولاتور، مخازن بزرگ هوای فشرده و یا نیتروژن فشرده استفاده نمود. در استفاده از سلول فشاری به شکل منظم، کمپرسور هوا با رگولاتور مناسب‌ترین انتخاب است. برای کار در فشارهای کم مانند یک دهم و 33 کیلوپاسکال، استفاده از مانیفولدهای حساس به تغییرات کم فشار مانند 0700G3 توصیه می‌شود. در شرایط استفاده از مخزن هوای فشرده، این مانیفولد مناسب نیست، زیرا این مانیفولد مقداری نشتی هوا داشته که می‌تواند هوای داخل مخزن را در مدت کوتاهی (حدود یک روز) تخلیه نماید. شکل 6 اتصال یک سلول فشار 100 کیلوپاسکال را به کمپرسور و مخزن هوای فشرده نشان می‌دهد. به طور کلی انتخاب رگولاتور و مانیفولد مناسب بستگی به مخزن فشار و نوع گاز استفاده می‌شود. در صورت نیاز به تنظیم دقیق‌تر فشار، می‌توان دو رگولاتور را به صورت سری پشت سر هم قرار داد.

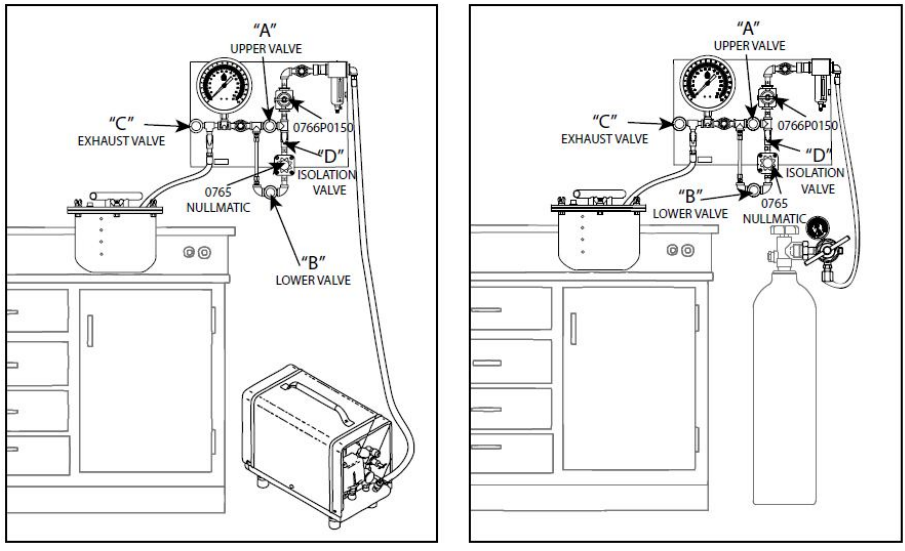
توجه: برخی از رگولاتورها برای کارکرد مناسب نیازمند حداقلی از فشار ورودی هستند. برای نمونه حداقل فشار ورودی رگولاتور Nulmatic، 103 کیلوپاسکال است.



شکل 6- اتصال سلول فشار 100 کیلوپاسکال به کمپرسور و مخزن هوای فشرده

2-4-2- تامین و تنظیم فشار برای محفظه فشاری

برای تمام کارهای استخراج آب خاک به وسیله فشار هوا، منبعی از هوای با فشار تنظیم شونده ضروری است. به این منظور هم می‌توان از کمپرسور هوای متصل به رگولاتور استفاده کرد و هم از مخازن بزرگ هوای فشرده و یا نیتروژن فشرده میتوان بهره برد. اگر قرار است از سلول فشاری به طور منظم استفاده شود، کمپرسور هوا با رگولاتور مناسبترین انتخاب است. برای کار در فشارهای پایین مانند 10 و 33 کیلوپاسکال، استفاده از مانیفولدهای حساس به تغییرات کم فشار مانند 0700G3 توصیه می شود. در حالی که اگر از مخزن هوای فشرده استفاده می‌شود این مانیفولد مناسب نیست، زیرا این مانیفولد مقداری نشتی هوا دارد که می‌تواند هوای داخل مخزن را در مدت کوتاهی در حدود یک روز تخلیه نماید. شکل 7 اتصال یک مخزن 500 کیلوپاسکال را به کمپرسور و مخزن نیتروژن فشرده نشان می‌دهد.



شکل 7- اتصال محفظه 500 کیلوپاسکال به کمپرسور و مخزن نیتروژن فشرده

3- روش انجام آزمایش

3-1- روش انجام آزمایش با سلول 100 کیلوپاسکال(Soilmoisture Equipment Corp, 1995)

پیش از شروع آزمایش بایستی صفحه سرامیکی و نمونه خاک روی آن از آب اشباع شود و سپس فشار بر روی نمونه اعمال می‌شود. به محض این‌که فشار داخل محفظه از فشار هوا بیشتر شود، آب داخل نمونه خاک از راه ستون به هم‌پیوسته آب داخل منافذ میکروسکوپی سرامیک به بیرون هدایت می‌شود. تا زمانی که صفحه سرامیکی از آب اشباع باشد، هوای داخل سلول فشاری از طریق منافذ خارج نمی‌شود.

با افزایش فشار داخل محفظه، شعاع انحنای سطح تماس آب و هوا کاهش می‌یابد. بیشترین فشاری که هر صفحه سرامیکی می‌تواند تحمل کند و پس از آن، هوا وارد منافذ می‌شود، به‌وسیله قطر منافذ تعیین می‌شود. هرچه قطر منافذ کوچکتر باشد، صفحه سرامیکی در فشار بالاتری اجازه ورود هوا را می‌دهد. بین مقدار فشار هوا در داخل محفظه و شعاع انحنای سطح تماس آب و هوا در منافذ صفحه سرامیکی یک رابطه مشخص وجود دارد (Tuller, Or et al., 2004). به مقداری از فشار هوا که نهایتاً منجر به شکستن هلال آب می‌شود، فشار ورود هوا یا نقطه ورود هوای صفحه سرامیکیمی‌گویند. صفحات سرامیکی همواره باید در فشاری کمتر از فشار نقطه ورود هوا مورد استفاده قرار گیرند.

نکته: هر چه مقدار فشاری که یک صفحه تحمل می‌کند افزایش یابد، سرعت حرکت آب در داخل منافذ صفحه کاهش و در نتیجه زمان مورد نیاز برای بدست آوردن تعادل افزایش می‌یابد. برای نمونه با اینکه صفحه 300 کیلوپاسکال می‌تواند فشار 100 کیلوپاسکال را تحمل کند، ولی برای افزایش سرعت حصول تعادل توصیه می‌شود از صفحه 300 کیلوپاسکال به این منظور استفاده نشود.

پیش از اجرای آزمایش لازم است که صفحه سرامیکی کاملاً اشباع از آب و بدون هوا باشد. اینکار را می‌توان در دسیکاتور خلاء با استفاده از آب بدون هوا انجام داد ولی درون خود دستگاه هم می‌توان صفحه را اشباع نمود. برای این کار ابتدا اورینگ مسدود کننده سیلندر و سپس صفحه سرامیکی را خارج کنید. لوله زهکش را به یک شیلنگ تراز و سر دیگر شیلنگ را به یک بالن وصل نموده و ارتفاع آب داخل بالن را به اندازه ارتفاع کف سلول

تنظیم کنید. صفحه سرامیکی را دوباره در محل خود قرار داده و ارتفاع بالن را در سطح فوقانی صفحه سرامیکی تنظیم نمایید. باید توجه نمود که آب آزاد روی سطح صفحه سرامیکی وجود نداشته باشد.

3-1-1- جایگذاری نمونه‌های خاک در سلول

نمونه دست نخورده خاک را داخل سیلندر برنجی و سپس در قسمت پایینی سلول قرار دهید. به آرامی سیلندر را فشار داده تا از اورینگ گذشته و سپس به آرامی نمونه دست نخورده خاک را روی صفحه فشار دهید تا از تماس کامل آن با صفحه مطمئن شوید. برای اشباع نمونه خاک با آب، سطح آب بالن را تا در سطح فوقانی نمونه خاک تنظیم نمایید. زمان مورد نیاز برای اشباع شدن خاک بستگی به هدایت هیدرولیکی خاک و صفحه سرامیکی دارد. پس از اشباع کامل قطعه بالای سلول را وصل نموده و مهره‌های پروانه‌ای را سفت کنید. سلول را به مانیفولد تأمین کننده فشار وصل و فشار داخل سلول را روی مقدار مورد نظر تنظیم نمایید.

3-1-2- توزین نمونه‌ها

پیش از وزن کردن سلول برای اولین بار، باید هرگونه حباب هوایی که زیر صفحه است را با یک سرنگ پر از آب خارج نمود. برای اینکار، سلول را وارونه نگه داشته و با سرنگ آب را به داخل لوله تخلیه تزریق کنید. ممکن است لازم باشد سلول را کمی کج نگه دارید و چندبار آب را تزریق کنید. شاید هر بار پیش از وزن کردن لازم باشد فرایند پر کردن زیر صفحه انجام شود تا وزن آب موجود در انتهای سلول، ثابت باشد. برگرداندن سلول تاثیری بر وضعیت تعادلی نمونه خاک ندارد. هر زمان که خواستید نمونه را وزن کنید، قطره‌ای که در حال چکیدن است را با دستمال خشک نموده و با یک گیره شیلنگ زهکش خروجی را مسدود کنید تا مانع از برگشت هوا به داخل لوله زهکش شود. وقتی فشار قطع می‌شود، مکش منفی ایجاد شده و هوا از زهکش وارد نمونه می‌شود. زمانی که از صفحه با هدایت هیدرولیکی کم استفاده می‌کنید، نیاز به گیره نیست. نمونه با استفاده از ترازوی با دقت صدم گرم توزین می‌شود. وزن کل سلول با خاک حدود 500 گرم است. لازم به یادآوری

است که تعادل زمانی ایجاد می‌شود که وزن سلول با مقدار اندازه‌گیری شده پیشین یکسان باشد و به عبارت دیگر وزن ثابت بماند.

این فرآیند در فشارهای بیشتر نیز تا حداکثر فشار قابل تحمل توسط صفحه سرامیکی تکرار می‌شود. با توجه به تغییرات ایجاد شده در وزن می‌توان تغییرات رطوبت خاک از یک مقدار مکش به مکش دیگر را مشاهده نمود. در انتهای آزمایش نمونه را در دمای 105 درجه سانتیگراد به مدت 24 ساعت در آون خشک نموده، تغییرات وزن را یادداشت و مقدار رطوبت وزنی در هر مکش را محاسبه نمایید. از آنجایی که حجم سیلندر به دقت قابل محاسبه است، از این‌رو مقادیر رطوبت وزنی را می‌توان به رطوبت حجمی تبدیل نموده و سپس منحنی تغییرات رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف را رسم کرد.

ملاحظات: توجه داشته باشید که ذرات خاک از قطعات و اتصالات آب‌بندی کننده دور باشند. همچنین از خش انداختن و یا تماس محکم قطعات آب‌بندی کننده با سطوح فلزی خودداری کنید. ضربه و تخریب این سطوح می‌تواند منجر به نشت هوا از سلول شود. این نشت هوا باعث می‌شود مقداری از رطوبت نمونه خاک با هوا به بیرون برده شده و در نتیجه رطوبت تعادلی نمونه خاک کمتر از مقدار واقعی به دست آید.

توجه: پیش از اعمال فشار مطمئن شوید که درب بالایی سلول محکم بسته شده باشد، همچنین پیش از اینکه فشار کاملا از روی نمونه برداشته نشده است درب سلول را باز نکنید.

3-2- روش انجام آزمایش با سلول 500 کیلوپاسکال

3-2-1- اشباع کردن صفحه و نمونه خاک

در مطالعات نگهداری آب در خاک، ارتفاع نمونه خاک را کم انتخاب کنید تا زمان رسیدن به تعادل منطقی باشد. زمان رسیدن به تعادل با مجذور ارتفاع نمونه خاک تغییر می‌کند. به عنوان مثال نمونه‌ای با ارتفاع دو سانتی‌مترچهار برابر زمان مورد نیاز برای به تعادل رسیدن نمونه‌ای با ارتفاع یک سانتی‌متر، زمان نیاز دارد. اگر امکان‌پذیر باشد، ارتفاع نمونه باید به یک سانتی‌متر محدود شود. حلقه‌های پلاستیکی که همراه دستگاه ارایه

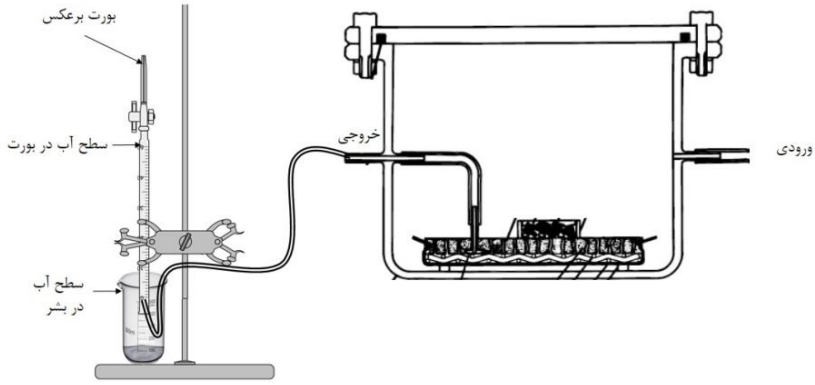
می‌شوند با ارتفاع یک و قطر 5/5 سانتی‌متر برای این کار مناسب هستند. این حلقه‌ها می‌توانند 25 گرم نمونه خاک را در خود جای دهند.

توجه: ساختمان خاک در دامنه 10تا 33 کیلوپاسکال بر نگهداری آب در خاک تاثیرگذار است. از این رو بهتر است در محدوده پتاسیل یادآوری شده از نمونه‌های دست نخوره خاک استفاده شود. ولی برای دیگر دامنه‌های پتانسیل آب در خاک می‌توان از حلقه‌های پلاستیکی همراه دستگاه استفاده نمود.

برای اشباع کردن صفحه سرامیکی و نمونه خاک بهتر است از آب بدون هوا استفاده شود. آب بدون هوا را می‌توان از طریق جوشاندن مقداری آب مقطر معمولی به مدت 15 تا 20 دقیقه و سپس خنک کردن آب در حالت سکون و بدون هم زدن آن بدست آورد. آب بدون هوا را می‌توان تا دو سه روز برای اشباع کردن صفحات و نمونه خاک استفاده نمود. نمونه خاک را می‌توان هم در داخل حلقه‌های فلزی نمونه دست نخورده و هم در داخل حلقه‌های پلاستیکی به وزن مخصوص دلخواه رساند. برای اتصال بهتر نمونه خاک با صفحه سرامیکی در صورتی که از حلقه‌های فلزی استفاده می‌کنید انتهای حلقه را با یک پارچه نخی با منافذ درشت پوشانده و با یک کش محکم کنید. سپس نمونه‌های خاک را داخل یک ظرف لبه‌دار گذاشته و آب بدون هوا را با یک شیلنگ باریک از قسمت پایین ظرف کم کم به ظرف اضافه کنید. ارتفاع آب داخل ظرف را به تدریج بالا ببرید تا آب روی نمونه خاک بایستد. سپس روی ظرف را پوشانده و اجازه دهید 16 تا 24 ساعت باقی بماند.

اگر از حلقه‌های لاستیکی استفاده می‌کنید، برای اتصال نمونه خاک به صفحه و همچنین برای توزین‌های بعدی بهتر است حلقه را روی یک کاغذ صافی قرار دهید. حلقه و کاغذ صافی را با احتیاط به روی صفحه سرامیکی منتقل کنید. داخل یک ظرف لبه‌دار مناسب یک مثلث مفتولی به اندازه زیر صفحه سرامیکی قرار دهید. صفحه را داخل ظرف لبه‌دار و روی مثلث قرار داده و دوباره مانند حالت پیشین با استفاده از یک شیلنگ باریک آب بدون هوا را از پایین به داخل ظرف بریزید تا کم کم آب روی صفحه را بگیرد و به تدریج نمونه خاک از پایین اشباع شود. پس از حداقل 16 تا 24 ساعت، نمونه خاک و صفحه اشباع شده‌اند و می‌توان آن‌ها را به محفظه فشاری منتقل کرد.

به طور دائم حباب‌های هوا از داخل صفحه به بیرون منتقل می‌شوند. در حالت تعادل، باید مقدار حباب‌های هوا بسیار کم و در حد صفر باشد. برای اطمینان از وضعیت تعادلی می‌توان مطابق شکل 7 خروجی دستگاه را با یک شیلنگ نازک به داخل یک بورت برعکس که داخل یک بشر پر از آب قرار دارد هدایت کرد. با باز کردن شیر بورت می توان سطح آب در بورت را در یک مقدار اولیه تنظیم کرده و سپس شیر بورت را بست. حباب‌های هوا در بالای بورت جمع شده و ستون آب را به پایین می‌رانند. باید به طور منظم حجم هوای جمع شده در بورت را بررسی کرد. از این روش می‌توان برای تعیین اشباع بودن صفحات 1500 کیلوپاسکال نیز استفاده نمود.



شکل 7- تعیین وضعیت تعادل برای محفظه 500 کیلوپاسکال

3-2-2- تنظیم فشار محفظه 500 کیلوپاسکال

برای تنظیم فشار در فشارهای کم بایستی با دقت هر دو رگولاتور تنظیم شوند. زمانی که رگولاتور پنوماتیک استفاده می‌شود، به‌طور پیاپی مقدار مشخصی هوا از پشت رگولاتور خارج می‌شود. مقدار هوای تخلیه شده بستگی به اختلاف فشار بین فشار هوای ورودی و فشار هوای تنظیم شده دارد. برای کاربردهای معمولی و به منظور حفظ هوای فشرده، فشار رگولاتور باید 14 تا 20 کیلوپاسکال بیشتر از فشار

تعادلی مطلوب، تنظیم شود. در این حالت مقدار هوای خارج شده از رگولاتور پنوماتیک در حدود 570 سانتی‌متر مکعب در دقیقه است. توجه داشته باشید که رگولاتور پنوماتیک در دامنه 7 تا 400 کیلوپاسکال و رگولاتور 1000کیلوپاسکال در دامنه 34 تا 1034کیلوپاسکال دقت دارد. اگر میزان هوادهی رگولاتور پنوماتیک در کار شما مشکل ساز است (برای نمونه میزان نیتروژن فشرده محدود است) برای خارج نمودن رگولاتور پنوماتیک از مدار می‌توان شیر B و شیر جداکننده D را بست (شکل 6). همچنین توجه داشته باشید که در دامنه 414 تا 517 کیلوپاسکال هم رگولاتور پنوماتیک باید از مدار خارج شود، زیرا این مقدار فشار بیش از مقدار مجاز این دستگاه است. به دلیل دقت و پایداری بیشتر توصیه می‌شود از رگولاتور پنوماتیک استفاده کنید ولی در عین حال این پایداری بیشتر منجر به هدر رفتن مقداری هوا شده که به‌وسیله کمپرسور به‌راحتی جبران می‌شود.

زمانی که فشار را برای اجرای آزمایش تنظیم می‌کنید، ابتدا شیر انتهای شیلنگ رابط را ببندید. سپس رگولاتور پنوماتیک را چند دور باز کنید تا مطمئن شوید که با فشاری کاملاً بالاتر از فشار مد نظر شما تنظیم شده است. سپس رگولاتور 150 را باز کنید تا فشار هوا در داخل رگولاتور پنوماتیک جریان یابد و شما آن را روی فشارسنج قرائت کنید. رگولاتور 150 را طوری تنظیم کنید که حدود 20 کیلوپاسکال بالاتر از فشار تعادلی مد نظر شما در فشارسنج قرائت شود. سپس رگولاتور پنوماتیک را تا حدی ببندید که خروج هوا از پشت آن شروع شود و فشارسنج دقیقاً روی فشار مد نظر شما تنظیم شود. اکنون می‌توانید شیر شیلنگ رابط را باز کنید و رگولاتورها فشار کمپرسور را در داخل محفظه به اندازه مد نظر شما تنظیم می‌کنند. در انتها به دلیل فشار هوایی که برای پر کردن مسیر لازم است، ممکن است کمی تنظیم دوباره نیز لازم باشد.

در صورت استفاده از رگولاتور پنوماتیک، شیر بالایی A بایستی بسته باشد (در جهت عقربه‌های ساعت بچرخانید تا بایستد)، شیر B بایستی باز باشد (در جهت خلاف عقربه‌های ساعت بچرخانید تا بایستد) و شیر جدا کننده D بایستی باز باشد (با دست به موازات لوله) (شکل 6).

در صورت استفاده نکردن از رگولاتور پنوماتیک و استفاده تنها از رگولاتور 150، شیر بالایی A بایستی باز باشد (در جهت خلاف عقربه‌های ساعت بچرخانید تا بایستد)، شیر B بایستی بسته باشد (در جهت عقربه‌های ساعت بچرخانید تا بایستد) و شیر جدا کننده D بایستی بسته باشد (با دست در جهت عمود بر لوله). این سیستم برای تنظیم فشارهای کم به‌عنوان تنظیم دوگانه[1] شناخته می‌شود و برای کنترل بسیار دقیق فشار هوا بسیار کاربرد دارد.

در انتهای آزمایش به منظور خارج نمودن هوا از محفظه، نخست اگر خروجی را به بورت برعکس وصل کرده‌اید، شیلنگ را قطع کنید و محل خروجی را با یک گیره محکم ببندید تا مکش برعکس اتفاق نیفتد، سپس شیر A و B را ببندید و شیر خروجی C را باز کنید تا هوای محفظه کاملاً خارج شود. حالا می‌توانید درب محفظه را باز کنید. به هیچ وجه تا تخلیه کامل هوای محفظه سعی نکنید پیچ‌های آن را باز کنید. پس از اتمام کار با محفظه فشاری ذرات خاک و رطوبت احتمالی داخل محفظه را با یک دستمال تمیز کنید.

3-3- روش انجام آزمایش با سلول 1500 کیلوپاسکال (Soilmoisture Equipment Corp, 2015)

3-3-1- بازکردن و بستن درب محفظه

با چند دور چرخاندن هشت پیچ در اطراف لبه محفظه، درب محفظه باز می‌شود. لازم نیست مهره‌های بالایی را از پیچ‌ها جدا کنید. پیچ‌هادارای سرهای مستطیلی خاصی هستند که در جای خود بر روی شیارهای بدنه قرار می‌گیرند. پیچ ها را از شیارها خارج کنید. در هنگام بستن پیچ‌ها ، همیشه مطمئن شوید که سر مستطیلی پیچ به درستی در شیار بدنه قرار گرفته باشد(شکل 8)، در غیر این‌صورت به سر پیچ آسیب وارد شده و می‌تواند ایمنی دستگاه را کاهش دهد.

[1]- Double Regulation

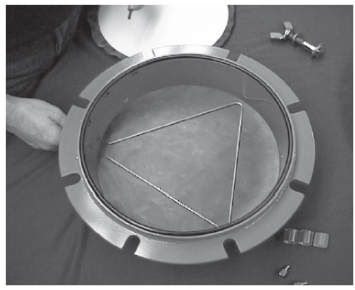
شکل 8- نحوه قرارگیری صحیح پیچ‌های با سر مستطیل شکل در شیارهای بدنه دستگاه

درب محفظه را با بلند کردن مستقیم به سمت بالا بردارید. اگر به نظر می‌رسد که درب به محفظه چسبیده است، یک لبه را با کمی فشار بلند کنید تا اتصال بین اورینگ و درب محفظه قطع شود (شکل 9). درب را با احتیاط حمل کنید تا قسمت زیرین آب‌بندی شده، خراشیده نشود و آسیب نبیند، زیرا ممکن است خدشه‌ای در آب‌بندی دستگاه به وجود آید. اورینگ آب‌بندی در داخل شیاری در بدنه خود محفظه قرار دارد.

شکل 9- درب باز شده‌ی محفظه

3-3-2- اتصال صفحه سرامیکی به محفظه

پیش از کارگذاشتن هر گونه صفحه فشاری در داخل محفظه، باید محافظ مثلثی در ته محفظه کارگذاری شود (شکل 10).

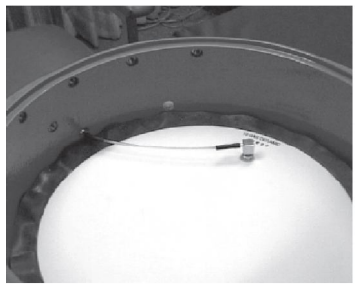


شکل 10- جایگذاری محافظ مثلثی در کف محفظه فشاری 1500 کیلوپاسکال

هدف از جای‌گذاری محافظ مثلثی ایجاد فاصله بین سطح پایینی صفحه سرامیکی و کف محفظه است. اگر از این محافظ استفاده نشود، ممکن است بین لبه‌های پوشش لاستیکی زیر صفحه و کف محفظه، انسداد رخ داده و وقتی که فشار اعمال می‌شود، اختلاف فشار زیاد بین بالا و پایین صفحه سرامیکی منجر به شکستن صفحه شود.

یادآوری: همواره پیش از جای‌گذاری صفحه سرامیکی مطمئن شوید که محافظ مثلثی در کف محفظه جای‌گذاری شده است.

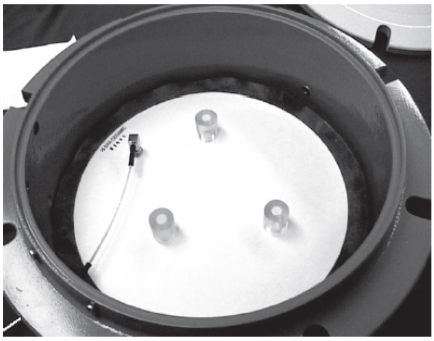
نخست صفحه سرامیکی را مستقیم روی محافظ در کف محفظه قرار داده، سپس خروجی صفحه را به پایین‌ترین پورت خروجی وصل کنید (شکل 11).



شکل 11- وصل کردن خروجی صفحه اول به پایین‌ترین پورت خروجی

در صورت نیاز به قرار دادن صفحه سرامیکی دوم پس از چیدن نمونه‌های خاک روی صفحه اول، سه عدد پایه جداکننده پلاستیکی را در نزدیکی لبه‌های صفحه اولی و تقریباً با

فاصله 120 درجه‌ای از یکدیگر قرار دهید (شکل 12). خروجی صفحه دوم را به پورت خروجی وسط وصل کنید.



شکل 12- قرار دادن پایه‌های جداکننده پلاستیکی برای جایگذاری صفحه سرامیکی دوم

برای انتقال صفحه سرامیکی به داخل و یا خارج محفظه، لبه‌های خارجی دیافراگم لاستیکی را با انگشت‌تان بگیرید. عموماً صفحات سرامیکی به شکل محدب در می‌آیند. به همین دلیل وقتی که می‌خواهید، روکش لاستیکی را به خروجی صفحه وصل کنید، انگشت‌تان را پشت پایه خروجی صفحه قرار دهید. همچنین وقتی که می‌خواهید شیلنگ نایلونی را به روکش لاستیکی خروجی محفظه وصل کنید، مطمئن شوید که شیلنگ نایلونی تا انتها رفته و به خروجی فلزی متصل شده است، زیرا شیلنگ نایلونی مقاومت کافی در برابر فشار داخل محفظه را دارد و در اثر فشار مسدود نمی‌شود در حالی‌که روکش لاستیکی برای مقاومت در برابر فشار بالا ساخته نشده است و ممکن است در فشارهای بالا مسیر خروجی را مسدود کند.

اگر انسداد هوا در این شیلنگ‌ها رخ دهد، منجر به اشتباه در قرائت تعادلی می‌شود. این حالت معمولاً تنها در انتهای آزمایش، زمانی که فشار را قطع می‌کنید نمایان می‌شود که در آن موقع به یک‌باره جریان خروجی هوای شدیدی رخ می‌دهد.

3-3-3- تنظیم فشار محفظه 1500 کیلوپاسکال

محفظه‌های فشاری 1500 کیلوپاسکال نیازمند منبعی از فشار گاز تنظیم شده به اندازه 1517 کیلوپاسکال و یا بالاتر هستند تا بتوانند رطوبت خاک را در دامنه 10 تا 1500 کیلوپاسکال استخراج نمایند. هم مخازن گاز فشرده و هم کمپرسورهای هوا را می‌توان به‌عنوان منبع فشار استفاده نمود. در این بین کمپرسورها به خصوص برای آزمایش‌های پیوسته و زیاد مقرون به‌صرفه‌تر هستند.

اگر از مخازن هوا و یا نیتروژن فشرده استفاده می‌کنید، مطمئن شوید که در مسیر نشتی هوا وجود نداشته باشد. مقدار کمی نشتی هوا در این مسیر می‌تواند مقدار زیادی هوای فشرده را در آزمایش هدر دهد.

منبع فشار هوا و دقت مورد نیاز برای آزمایش، تعیین‌کننده نوع رگولاتور مورد استفاده است. دقت تنظیم فشار بستگی به ساختار رگولاتور و تغییرات فشار در منبع تأمین‌کننده فشار دارد. با استفاده از رگولاتورهای مناسب، مقدار تغییرات فشار تنظیم شده حدود یک دوازدهم تا یک بیست و پنجم مقدار تغییر فشار تأمین‌کننده است. به عبارت دیگر، تغییر در منبع تأمین‌کننده فشار به اندازه 172 کیلوپاسکال، فشار هوای تنظیم شده با رگولاتور را در حد 7 تا 14 کیلوپاسکال بسته به ساختار رگولاتور تغییر خواهد داد.

اگر دقت بسیار بالا مدنظر باشد باید از تنظیم دوگانه استفاده نمود تا این تغییرات به حداقل برسد. این به معنی قرار دادن دو رگولاتور به‌صورت متوالی است. رگولاتور اولی در فشاری بیشتری از دومی تنظیم می‌شود تا فشار نسبتا ثابتی را برای دومی ایجاد کند. در این صورت میزان تغییرات فشار در رگولاتور دومی به حدود یک صدم کاهش می‌یابد. برای آزمایش‌های معمولی اندازه‌گیری رطوبت در 1500 کیلوپاسکال، استفاده از یک رگولاتور فشار زیاد کافی است. ولی در فشارهای کمتر، رگولاتورهای حساس‌تری باید استفاده شود.

برای تنظیم فشار مناسب در کل دامنه 0 تا 1500 کیلوپاسکال، باید دو رگولاتور استفاده شود. رگولاتور فشار زیاد را برای دامنه‌های فشار زیاد در مدار قرار دهید و با استفاده از یک شیر ساده این امکان را فراهم آورید که در صورت نیاز فشار هوا به سمت رگولاتورهای فشار کم منتقل شود.

در صورتی که از کمپرسور هوا استفاده می‌شود، در جلوی رگولاتور باید یک فیلتر هوا قرار داده شود. این فیلتر ذرات کوچک غبار را از رگولاتور دور نگه می‌دارد. در صورت تجمع این ذرات غبار در اتصالات و شیرها، شاهد تغییراتی در فشار هوای تنظیم شده خواهیم بود.

3-4- آماده‌سازی خاک

برای به دست آوردن نتایج دقیق و ثابت، نمونه‌های خاک باید به‌درستی آماده‌سازی شوند. برای اطلاع از شیوه آماده‌سازی نمونه به دستنامه شماره 60 وزارت کشاورزی آمریکا مراجعه شود. این دستنامه مشتمل بر تشریح جزییات آزمایش‌های نگهداری آب در خاک در مکش‌های مختلف و روش ترسیم منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک است.

پیش از قرار دادن نمونه‌های خاک بر روی صفحه سرامیکی، شیلنگ نایلونی و روکش لاستیکی را به خروجی صفحه متصل کنید. از هر نمونه خاک، دو زیر نمونه هریک به وزن 25 گرم که از الک 2 میلی‌متری عبور کرده است را توزین کنید و داخل حلقه‌های پلاستیکی قرار داده و سپس حلقه‌های پلاستیکی دارای نمونه خاک را روی صفحه قرار دهید. بر روی هر صفحه سرامیکی امکان قرارگیری 12 عدد از این حلقه‌های پلاستیکی وجود دارد.

برای جلوگیری از خطای توزیع اندازه ذرات، تمام نمونه خاک توزین شده را داخل حلقه‌ای پلاستیکی بریزید. ریختن مقداری از نمونه به بیرون باعث می‌شود که نمونه، نماینده مناسبی از کل خاک بررسی شده نباشد. سطح خاک داخل حلقه‌های پلاستیکی را صاف کنید و روی آن‌را با مربع‌هایی از کاغذ پوشش‌دار بپوشانید و به مدت 16 ساعت اجازه دهید تا روی صفحه‌ای که دارای مقداری آب اضافی است باقی بماند.

برای جای‌گذاری در محفظه نخست مطمئن شوید که محافظ مثلثی در کف محفظه قرار دارد. زمانی که نمونه‌های خاک آماده شدند، آب اضافی روی صفحه را با یک پیپت یا سرنگ بکشید. صفحه را در داخل محفظه قرار داده و اتصالات خروجی را وصل کنید. برای ایجاد فاصله بین صفحات سرامیکی درون یک محفظه (در صورت استفاده از چند صفحه در یک محفظه) می‌توانید از پایه‌های پلاستیکی استفاده کنید. تمام پورت‌های خروجی بلا

استفاده را با مهره‌های مسدود کننده، ببندید. مطمئن شوید که اورینگ محفظه در جای خودش قرار دارد، درب را روی محفظه قرار داده و مهره‌های درب را ببندید.

مطمئن شوید که سرهای مستطیل شکل پیچ‌های درب در جای خودشان قرار گرفته‌اند (شکل 9). قرار دادن نادرست پیچ‌ها می‌تواند باعث صدمه به آن‌ها شده و در نتیجه درب کامل بسته نشود.

خروجی محفظه را می‌توان به بورت برعکس متصل و تغییرات حجم هوای خروجی را در زمان‌های منظم قرائت نمود. در صورتی‌که فشار به تعادل رسیده باشد، تفاوت سرعت خروج هوا برای ساعت‌ها و یا روزهای متوالی نباید مقدار قابل توجهی باشد.

میزان فشار هوای داخل محفظه را به تدریج بالا ببرید. این فرآیند به شما اجازه می‌دهد که مقدار تعادلی را دقیق‌تر تنظیم کنید.

در شرایطی که از کمپرسور به عنوان منبع هوای فشرده استفاده می‌کنید، اگر فشار محفظه به یک‌باره به 1500 کیلوپاسکال افزایش یابد، ممکن است فشار مخزن کمپرسور به پایین‌تر از سطح مورد نیاز افت کند. این اتفاق به این دلیل می‌افتد که حجم محفظه فشاری بیشتر از حجم هوای ذخیره شده در مخزن کمپرسور است. اگر این اتفاق افتاد کلید روشن-خاموش کمپرسور را در حالت خاموش قرار داده و سپس روشن کنید تا به مدت 5 دقیقه به صورت مداوم کار کند. یک چرخه پنج دقیقه‌ای از کار مداوم کمپرسور، فشار را تا بالاتر از سطح مورد نظر افزایش خواهد داد.

با افزایش فشار هوای داخل محفظه، شعاع انحنای هلال سطح تماس آب و هوا هم در نمونه خاک و هم در صفحه سرامیکی افزایش می‌یابد. صفحه سرامیکی 1500 کیلوپاسکال به‌دلیل منافذ بسیار ریزی که دارد، پس از اشباع شدن کامل تا فشاری بیش از 1500 کیلوپاسکال ، اجازه ورود هوا به صفحه را نمی‌دهد. ولی درون خاک منافذ در اندازه‌های مختلفی وجود دارند. از این‌رو نخست منافذ درشت‌تر تخلیه شده و آب مازاد از راه منافذ صفحه و شبکه داخلی به سمت خروجی هدایت می‌شوند. با افزایش فشار داخل محفظه و حصول تعادل جدید، منافذ ریزتری از آب تخلیه می‌شوند. به این ترتیب در حالت تعادل، محتوای رطوبت خاک نشان‌دهنده مقدار آب خاک در آن پتانسیل ماتریک است.

این فرآیند را می‌توان برای تمام انواع خاک‌ها به‌جز برای رس‌های ریز منقبض شوند به کار برد. در این گروه از خاک‌ها با کم شدن رطوبت داخل خاک، نمونه خاک منقبض شده و بخشی از آن از صفحه سرامیکی جدا می‌شود و به این ترتیب سطحی که هدایت کننده جریان آب است کاهش یافته و اجازه نمی‌دهد تا تعادل حاصل شود.

زمانی که بورت برعکس نشان داد که جریان خروجی متوقف شده و تعادل حاصل شده است، می‌توان نمونه‌ها را خارج نمود. اغلب خاک‌ها در حدود 18 تا 20 ساعت به تعادل هیدروستاتیکی می‌رسند (van Lier et al., 2019). در انتهای آزمایش باید یا بورت خروجی قطع شود و یا مسیر آن با گیره مسدود، تا از برگشت دوباره آب به داخل صفحه در هنگام کم شدن فشار، جلوگیری شود.

بلافاصله پس از قطع کردن فشار و تخلیه فشار داخل محفظه، پیچ‌های درب محفظه را باز نموده و درب را کنار بگذارید. برای جلوگیری از تغییرات میزان رطوبت، نمونه‌ها را در اسرع وقت به قوطی‌های توزین رطوبت منتقل نمایید.

3-5- ملاحظات و مراقبت از صفحه و محفظه فشاری 1500 کیلوپاسکال

هر سلول صفحه فشاری مشتمل بر یک صفحه سرامیکی 1500 کیلوپاسکال با قطر تقریبی 26 سانتی‌متر است که از یک طرف با یک لایه دیافراگمی ضخیم مسدود شده است. یک شبکه داخلی از تماس نزدیک دیافراگم با صفحه جلوگیری نموده و مسیری را برای جریان آب ایجاد می‌کند. یک لوله خروجی، از داخل صفحه سرامیکی عبور کرده که این مسیر را به لوله خروجی بیرون صفحه وصل می‌کند. صفحات سرامیکی 1500 کیلوپاسکال به اندازه کافی مقاوم هستند، ولی برای جلوگیری از تخریب صفحه، از وارد آوردن بار مکانیکی و فشار اجسام تیز به آنها خودداری کنید. پیش از استفاده اجازه دهید که آب بدون هوا چندین ساعت روی سطح صفحه بایستد تا صفحه کاملاً خیس شود. تقریباً 150 میلی‌لیتر برای پرکردن منافذ هر صفحه نیاز است.

یک یا چند صفحه که از پیش خیس شده را داخل محفظه قرار دهید و خروجی‌های آنها را وصل کنید. سپس با دقت مقداری آب روی سطح هر صفحه اضافه کنید به شکلی که کاملا سطح صفحه را بپوشاند (تا ارتفاعی که لبه‌های دیافراگم اجازه می‌دهد). درب محفظه را ببندید

و فشار را تا 1500 کیلوپاسکال بالا ببرید. با افزایش فشار داخل محفظه، هوای زیادی از لوله خروجی خارج خواهد شد. این خروج یک‌باره هوا در اثر فشرده شدن دیافراگم و شبکه داخلی است که در نتیجه آن حجم داخلی سلول فشاری کم می‌شود. اگر لوله‌ها و شیلنگ‌های خروجی به‌درستی و محکم وصل شده باشند و صفحه شکسته و یا معیوب نباشد، جریان خروجی هوا پس از چند دقیقه متوقف شده و جریان ماندگاری از آب ایجاد خواهد شد.

حباب‌های ریز هوا با جریان آب خروجی و در فواصل زمانی تقریباً منظم خارج خواهد شد. سرعت این جریان خروجی هوا را می‌توان برحسب میلی‌لیتر در دقیقه از زمانی که جریان شروع می‌شود اندازه‌گیری کرد. زمانی که تمام آب روی صفحه از داخل سرامیک عبور کرد، جریان آب متوقف می‌شود. جریان هوایی که به‌آهستگی در صفحه پخش می‌شود، به تدریج مقادیر کمی از آبی را که در اطراف شبکه داخلی است را به سمت خروجی هدایت می‌کند. در این حالت می‌توان سرعت انتشار هوا را با استفاده از بورت برعکس (شکل 7) اندازه‌گیری کرد. در شرایطی که محفظه در فشار 1500 کیلوپاسکال تنظیم شده است، سرعت جریان هوا بایستی کمتر از یک دهم میلی‌لیتر هوا در دقیقه باشد. اگر سرعت جریان هوا بسیار بالاتر از این مقدار باشد، نشان‌دهنده آن است که نشت هوا در اتصالات وجود دارد، یا اینکه صفحه شکسته یا معیوب است.

به منظور استفاده صحیح و کاربرد طولانی مدت محفظه و صفحات فشاری توجه به نکات زیر ضروری است:

پس از اجرای آزمایش صفحه را خشک کنید و آن را در انبار نگهداری کنید. برای این کار لازم است که رسوبات تبخیری روی سطح صفحه را به حداقل برسانید. به این منظور سطح صفحه سرامیکی را با لایه نازکی از خاک ریزدانه غیرشور بپوشانید و اجازه دهید که برای چند روز خاک کاملاً خشک شود. سپس خاک روی صفحه را دور بریزید و صفحه را در جای مطمئن قرار دهید. این فرآیند رسوبات تبخیری را در سطح خاک ذخیره می‌کند و از تجمع آن در سطح صفحه جلوگیری می‌کند.

پس از مدتی استفاده از صفحه ممکن است که سرعت جریان صفحه به علت رسوبات کم شود، که باید حتما این رسوبات زدوده شوند. رسوبات کربنات کلسیم روی سطح صفحه سرامیکی را با دقت با استفاده از کاغذ سمباده درجه 200 یا 400 کربوراندوم خیس یا

خشک حذف کنید. اگر رسوب در داخل منافذ صفحه تشکیل شده باشد، باید با استفاده از یک محلول 10 درصد اسید هیدروکلریک تحت فشار و در داخل محفظه شسته شود. پس از این مرحله باید همین فرآیند شستشو تحت فشار در داخل محفظه با آب مقطر هم تکرار شود تا تمام اسید از داخل محفظه خارج شود.

شبکه داخلی صفحه از پلی پروپیلن ساخته شده است تا از فعالیت میکروبی در داخل صفحه جلوگیری کند. در عین حال در صورت بروز نشانه‌های فعالیت میکروبی، باید صفحه به صورت دوره‌ای با محلول سولفات مس یا کلرور مس مطابق فرآیندی که در بالا تشریح شد تحت فشار شسته شده و سپس با آب مقطر و تحت فشار محلول اضافی به طور کامل خارج شود.

به صورت دوره‌ای سطح داخلی محفظه را با یک محلول آب و صابون بشویید و با آب مقطر یا آب دوبار تقطیر آبکشی کنید و سپس با یک حوله خشک کنید. در صورت استفاده نشدن از دستگاه به مدت طولانی درب محفظه را کنار گذاشته تا از تجمع رطوبت در داخل محفظه جلوگیری شود.

در صورت مشاهده زنگ‌زدگی در داخل محفظه می‌توان داخل آن‌را با رنگ پایه آسفالت بنام Gila Coat و یا محصولات مشابه دوباره پوشش داد.

3-6- خطاهای رایج در کار با دستگاه صفحات فشاری

برخی محققین گزارش کرده‌اند که مقدار آبی که به‌وسیله‌ی دستگاه صفحات فشاری در پتانسیل‌های زیر 500کیلوپاسکال یا زیر200 کیلوپاسکال اندازه‌گیری می‌شود، کمتر از واقعیت و یا دارای خطا است. محققین این خطاها را به عوامل مختلفی ربط داده‌اند:

1. برگشت جریان آب از خروجی صفحه به سمت نمونه خاک پیش از این‌که فشار اعمال شده، برداشته شود.
2. نقص در حصول تعادل هیدروستاتیکی بین نمونه خاک و دستگاه صفحات فشاری.
3. نقص در حصول تعادل بین نمونه خاک و دستگاه صفحات فشاری در فشار 150 متر.
4. نداشتن تماس هیدرولیکی بین نمونه خاک و صفحه، پس از این‌که نمونه آب خود را از دست داد.

منابع

Bittelli, M. and M. Flury (2009). "Errors in water retention curves determined with pressure plates." Soil Science Society of America Journal 73(5): 1453-1460.

Brooks, R. and A. Corey (1964). Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No. 3, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, CO.

Campbell, G. S. (1974). "A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data." Soil science 117(6): 311-314.

Childs, E. C. (1940). The use of soil moisture characteristics in soil studies. *Soil Science*, *50*(4), 239-252.

Cresswell, H. P., Green, T. W., & McKenzie, N. J. (2008). The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention. *Soil science society of America Journal*, *72*(1), 41-49.

Dane, J. H., & Topp, C. G. (Eds.). (2020). *Methods of soil analysis, Part 4: Physical methods* (Vol. 20). John Wiley & Sons.

Lazarovitch, N., J. Vanderborght, Y. Jin and M. T. Van Genuchten (2018). "The root zone: Soil physics and beyond." Vadose zone journal 17(1): 1-6.

Menzies, N. and L. Bell (1988). "Evaluation of the influence of sample preparation and extraction technique on soil solution composition." Soil Research 26(3): 451-464.

Molinari, R., T. Poerio and P. Argurio (2005). "Polymer assisted ultrafiltration for copper–citric acid chelate removal from wash solutions of contaminated soil." Journal of applied electrochemistry 35(4): 375-380.

Reynolds, B. (1984). "A simple method for the extraction of soil solution by high speed centrifugation." Plant and Soil 78(3): 437-440.

Richards, L. (1941). "A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution." Soil science 51(5): 377-386.

Sakaki, T. and T. H. Illangasekare (2007). "Comparison of height-averaged and point-measured capillary pressure–saturation relations for sands using a modified Tempe cell." Water resources research 43(12).

Shirazi, M. A. and L. Boersma (1984). "A unifying quantitative analysis of soil texture." Soil Science Society of America Journal 48(1): 142-147.

Soilmoisture Equipment Corp (1995) Tempe Pressure Cells. Operating Instructions. 12 pp. California. USA.

Soilmoisture Equipment Corp (2015) 15 Bar Pressure Plate Extractor. Operating Instructions. 24 pp. California. USA.

Tuller, M., D. Or and D. Hillel (2004). Encyclopedia of Soils in the Environment.

Van Genuchten, M. T. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." Soil science society of America journal 44(5): 892-898.

Van Hees, P., S. Vinogradoff, A. Edwards, D. Godbold and D. Jones (2003). "Low molecular weight organic acid adsorption in forest soils: effects on soil solution concentrations and biodegradation rates." Soil Biology and Biochemistry 35(8): 1015-1026.

van Lier, Q. D. J., Pinheiro, E. A. R., & Inforsato, L. (2019). Hydrostatic equilibrium between soil samples and pressure plates used in soil water retention determination: consequences of a questionable assumption. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, 43*.