



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

روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک در مزارع و باغات

نگارندگان

افشین یوسف گمرکچی و مهرزاد محمص مستشاری

اعضای هیات علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین

نشریه فنی: ۵۹۲

۱۳۹۹

مشخصات اثر

عنوان: روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک در مزارع و باغات

نگارندگان: افشین یوسف گمرکچی و مهرزاد محمصص مستشاری

ناشر: موسسه تحقیقات خاک و آب

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: انتشارات سنا

کارشناس انتشارات: زهرا محمدی

ویراستار: زهرا محمدی

صفحه آرا: سمانه پورمنصور

طراح جلد: راضیه محمدی

سال انتشار: ۱۳۹۹

نشانی: کرج، میدان استاندارد، جاده مشکین دشت، بعد از رزکان نو، بلوار امام خمینی (ره)، موسسه

تحقیقات خاک و آب، کد پستی: ۳۱۷۷۹۹۳۵۴۵ - صندوق پستی: ۳۱۷۸۵-۳۱۱

تلفن: ۰۲۶-۳۶۲۰۱۹۰۰ دورنگار: ۰۲۶-۳۶۲۱۰۱۲۱

Website: www.swri.ir

Email: info@swri.ir

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

این اثر با شماره ۵۷۶۶۳ در تاریخ ۹۹/۳/۲۰ در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است.

نقل مطالب با ذکر منبع بلامانع است.

مسئولیت صحت مطالب به عهده نگارندگان است.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	مقدمه
۲	روش‌های مختلف اندازه‌گیری رطوبت خاک
۳	۱- تخمین رطوبت خاک بر اساس روش لمسی
۸	۲- تانسیومتر (مکش سنج)
۲۰	۳- بلوک گچی
۲۸	۴- اندازه‌گیری رطوبت خاک با روش TDR
۳۲	۵- روش نوترون متري
۳۸	نتیجه‌گیری و توصیه‌ها
۳۹	فهرست منابع

پیشگفتار

در راستای اجرای سیاست‌های افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی، ضروری است که مدیریت آب در سطح مزارع و باغات اصلاح و بهینه‌سازی شود. یکی از پایه‌های مهم و مدیریت پذیر در مدیریت آبیاری، اعمال صحیح برنامه‌ریزی آبیاری (دور و عمق آب آبیاری) بر پایه اصول عملی شناخته‌شده شرایط خاک، آب، گیاه و اقلیم است. در این میان شناخت و اندازه‌گیری وضعیت رطوبت خاک از عوامل و شاخص‌های مهمی هستند که به تصمیم‌گیری و موفقیت یک برنامه‌ریزی آبیاری کمک می‌کنند. اندازه‌گیری رطوبت خاک می‌تواند در تعیین موقع آبیاری و میزان آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری راهنمای خوبی برای کشاورزان باشد. هدف از نگارش نشریه مذکور آشنایی کارشناسان، مروجان، مهندسان ناظر و کشاورزان پیشرو با انواع روش‌های اندازه‌گیری رطوبت در خاک، بررسی برتری‌ها و کاستی‌های هر یک از روش‌های اندازه‌گیری رطوبت و آشنایی با روش‌های میدانی تشخیص میزان رطوبت خاک است.

مقدمه

از دیدگاه مقدار آب موجود در خاک در ارتباط با مراحل رشد گیاه، سه مرحله رطوبتی در خاک دارای اهمیت است که عبارت‌اند از: مرحله اشباع، گنجایش مزرعه‌ای و پژمردگی. در یک سامانه آبیاری مؤثر و بهره‌ور، لازم است در طی یک فصل زراعی مقدار آب متناسب با نیاز و مرحله رشدی گیاه و براساس پایش وضعیت آب و هوایی و رطوبت خاک، در اختیار گیاه قرار گیرد. بر این پایه اندازه‌گیری یا تخمین رطوبت خاک و نیاز آبی گیاه، یکی از مهم‌ترین عوامل در مدیریت آبیاری خواهد بود. اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک برای برنامه‌ریزی آبیاری، تنظیم دور آبیاری (فاصله دو آبیاری) و کاهش هدررفت آبیاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عدم آگاهی و دسترسی بیشتر بهره‌برداران به ابزار یا روش‌هایی که به تنظیم برنامه آبیاری آنان کمک رساند، باعث استفاده غیر بهینه آب آبیاری در مزارع و باغ‌ها خواهد شد.

منظور از اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک در کشاورزی، مشخص نمودن میزان آب موجود در خاک در یک زمان و مکان معین برای رشد گیاه است. با توجه به تغییرات افقی و عمودی زیادی که در توزیع رطوبت خاک به دلیل تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک وجود دارد در نتیجه برای تخمین قابل‌اعتماد مقدار رطوبت در توده خاک لازم است نمونه‌برداری در چندین نقطه و با دقت صورت گیرد (Gardner, 1986). در میان روش‌های متداول اندازه‌گیری رطوبت خاک می‌توان به مواردی همچون روش بررسی ظاهری خاک (شکل ۱)، روش وزنی، تانسیومتری، استفاده از بلوک‌های گچی، روش نوترون‌متری، استفاده از فن‌آوری دستگاه بازتاب زمانی امواج و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای اشاره نمود. هدف از ارائه این نشریه آشنایی بهره‌برداران، مروجین و کشاورزان پیشرو با انواع روش‌های متداول اندازه‌گیری رطوبت خاک در سطح مزارع و باغات است.



شکل ۱- تشخیص بافت خاک بر اساس ویژگی‌های ظاهری خاک

روش‌های مختلف اندازه‌گیری رطوبت خاک

روش‌های مختلف اندازه‌گیری رطوبت خاک در سطح مزارع و باغات و مهم‌ترین برتری و کاستی‌های استفاده از هر روش، به‌صورت خلاصه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مزایا و معایب روش‌های مختلف اندازه‌گیری رطوبت خاک

روش	ویژگی اندازه‌گیری شده	برتری‌ها	کاستی‌ها
لمس مستقیم	میزان رطوبت خاک	ساده، قابلیت استفاده آسان، با افزایش تجربه بهره‌بردار دقت آن افزایش می‌یابد.	دقت کم، نبود آگاهی از نیم‌رخ رطوبتی خاک، عدم ثبت اطلاعات دقیق رطوبت
وزنی	میزان رطوبت خاک	دقت زیاد	وجود فاصله زمانی بین نمونه‌برداری و نتایج آزمایشگاهی، محدودیت کاربرد توسط بهره‌برداران و کشاورزان، عدم ثبت اطلاعات بهنگام رطوبت خاک
تانسیومتری	مکش خاک	دقت خوب، خواندن آسان	هزینه نخستین تا اندازه‌ای زیاد، نیاز به نیروی انسانی ماهر، محدودیت کاربرد در زمین‌های سنگلاخی، مشکلات واسنجی، محدودیت کاربرد در محدوده مکش‌های زیاد
بلوک‌های گچی	مقاومت الکتریکی خاک	کار در محدوده مکش‌های زیاد، هزینه اولیه تا اندازه‌ای کم	متأثر بودن نتایج از شوری خاک، عدم حساسیت در مکش‌های کم، مراقبت و نگهداری، نیاز به واسنجی
TDR	ثابت دی الکتریک خاک	اندازه‌گیری رطوبت تا اندازه‌ای دقیق و با سرعت زیاد، امکان پایش غیرمستقیم شوری خاک	گرانی و نیاز به تنظیمات زیاد، متأثر بودن نتایج از بافت و شوری خاک، نیاز به واسنجی، نیاز به نیروی انسانی متخصص
نوترون متری	تراکم نوترون‌ها	اندازه‌گیری رطوبت تا اندازه‌ای دقیق	گرانی دستگاه، خطرات تشعشع رادیواکتیو، نیاز به نیروی متخصص و آموزش دیده

۱- تخمین رطوبت خاک بر اساس روش لمسی

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها در کاربرد ابزار پایش رطوبت خاک در سطح مزارع و باغات هزینه‌های اولیه خرید تجهیزات مرتبط، نیاز به مهارت بالا در بهره‌برداری تجهیزات، مشکلات نصب تجهیزات در سطح مزرعه و حوضه است. از سوی دیگر در بسیاری از موارد بهره‌بردار نیازی به تعیین دقیق میزان رطوبت خاک نداشته و تنها برآورد تقریبی از وضعیت آن می‌تواند به بهبود فرآیند مدیریت آبیاری در مزرعه منجر شود. از آنجاکه نوع بافت خاک از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در میزان نگهداشت رطوبت خاک است از این‌رو نخستین گام در تخمین رطوبت خاک بر اساس ویژگی‌های ظاهری خاک، آشنایی بهره‌بردار با روش میدانی تعیین بافت خاک است. در جدول ۲ روش میدانی ارزیابی بافت خاک بر اساس ۷ ویژگی ظاهری خاک نشان داده شده است. همچنین در شکل‌های ۲ تا ۵ شکل ظاهری خاک‌های زراعی در رطوبت‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۲- تشخیص بافت خاک براساس مشخصه‌های ظاهری خاک

معیار تشخیص	شن	لوم شنی	لوم	لوم سیلتی	لوم رسی	رس
 زبری و نرمی گل در بین انگشت‌ها و ظاهر قابل رویت	گل در بین انگشت‌ها کاملاً زبر به نظر می‌رسد و ذرات شن کاملاً ملموس است	زبری کمتری دارد و دانه‌های درشت کمتری در آن دیده می‌شود.	زبری میانگین	ذرات درشت کم و گل تا اندازه‌ای نرم و صابونی	نرم و دارای ذرات درشت ناچیز	کاملاً نرم بوده و ذرات شن در آن ملموس نیست و سطح آن براق به نظر می‌رسد.
پایداری کلوخه خشک	شکل نمی‌پذیرد	شکل نمی‌پذیرد	به راحتی از هم می‌پاشد	تا اندازه‌ای به راحتی از هم می‌پاشد.	تا اندازه‌ای به راحتی از هم می‌پاشد.	خیلی سفت و پایدار
پایداری کلوخه مرطوب	ناپایدار	پایداری کم	پایداری میانگین	پایدار	خیلی پایدار	خیلی پایدار
 پایداری و ثبات نوار تشکیل شده در بین انگشت‌های شست و سبابه	نوار تشکیل نمی‌شود	نوار تشکیل نمی‌شود	نوار تشکیل نمی‌شود	نوار به صورت بریده تشکیل می‌شود	نوار نازک و شکننده تشکیل می‌شود	نوار خیلی دراز و مقاوم تشکیل می‌شود
 لوله کردن در کف دو دست	لوله نمی‌شود	لوله نمی‌شود	لوله نمی‌شود	لوله می‌شود ولی در سطح خمیر ترک می‌خورد	لوله می‌شود ولی به صورت حلقه در نمی‌آید	به راحتی لوله شده و تشکیل حلقه می‌دهد
چسبندگی	کاملاً غیر چسبنده	تقریباً غیر چسبنده	چسبندگی کم	چسبندگی میانگین	چسبندگی تا اندازه‌ای زیاد	چسبندگی تا اندازه‌ای زیاد
اثر باقیمانده روی دست	هیچ گونه اثری روی دست باقی نمی‌ماند	هیچ گونه اثری روی دست باقی نمی‌ماند	مقداری رنگ بر روی دست باقی می‌ماند	مقداری رنگ و مقداری گل بر روی دست باقی می‌ماند	مقداری گل باقی می‌ماند	مقداری گل روی انگشت باقی می‌ماند



۲۵-۵۰ درصد رطوبت در دسترس
۲۵-۷۵ mm/m ظرفیت آب قابل استفاده

رطوبت کم، به شکل یک گلوله بسیار سست و ناپایدار در می‌آید که به خوبی اثر انگشت روی آن بجا می‌ماند.



۵۰-۷۵ درصد رطوبت در دسترس
۱۶-۵۰ mm/m ظرفیت آب قابل استفاده

مرطوب، به شکل یک گلوله سست و ناپایدار با دانه‌های گسسته ماسه در می‌آید که بر روی انگشتان دست جمع می‌شود. رنگ تیره، مقداری از آب بر روی انگشتان دست برجای می‌ماند. نمی‌توان آن را به شکل نوار درآورد.



۷۵-۱۰۰ درصد رطوبت در دسترس
۰-۲۵ mm/m ظرفیت آب قابل استفاده

مرطوب، به شکل یک گلوله سست و ناپایدار با دانه‌های گسسته ماسه در می‌آید که بر روی انگشتان دست جمع می‌شود. رنگ تیره، مقدار زیادی از آب بر روی دست برجای می‌ماند. نمی‌توان آن را به شکل نوار درآورد.

شکل ۲- تشخیص رطوبت در خاک‌های با بافت درشت



۵۰-۲۵ درصد رطوبت در دسترس
۵۸-۱۰۸ mm/m ظرفیت آب قابل استفاده

رطوبت کم، به شکل یک گلوله سست در می‌آید که اثر انگشتان بر روی آن مشخص است. رنگ تیره، بدون ایجاد هیچگونه اثر لک و رنگ بر روی انگشتان، دانه‌ها از هم جدا می‌شوند.



۷۵-۵۰ درصد رطوبت در دسترس
۲۵-۷۵ mm/m ظرفیت آب قابل استفاده

مرطوب، به شکل یک گلوله خاک در می‌آید که اثر انگشت بر روی آن مشخص است. اثر لک و رنگ بسیار کم خاک و آب بر روی انگشتان باقی می‌ماند. رنگ تیره، صاف و صیقلی نیست.



۱۰۰-۷۵ درصد رطوبت در دسترس
۳۳-۰ mm/m ظرفیت آب قابل استفاده

مرطوب، به شکل یک گلوله خاک در می‌آید. بطوریکه رطوبت مختصری از آن روی دست باقی می‌ماند. یک نوار سست بین انگشت شست و سبابه تشکیل می‌شود.

شکل ۳- تشخیص رطوبت در خاک‌های با بافت متوسط



۲۵-۵۰ درصد رطوبت در دسترس
۶۶-۱۵۰ mm/m ظرفیت آب قابل استفاده

کمی رطوبت، به شکل یک گلوله سست، تعداد بسیار کمی از دانه‌های خاک جدا می‌شوند. هیچ لکه آبی به دست نمی‌چسبد، با فشار می‌توان روی سطح آن را پهن کرد.



۵۰-۷۵ درصد رطوبت در دسترس
۳۳-۱۰۰ mm/m ظرفیت آب قابل استفاده

مرطوب، به شکل یک گلوله صاف در می‌آید به طوریکه که اثر انگشت به خوبی در آن بجا می‌ماند. رنگ و لک کمی بر روی انگشتان دست باقی می‌ماند. به شکل نوار بین انگشت شست و سبابه در می‌آید.

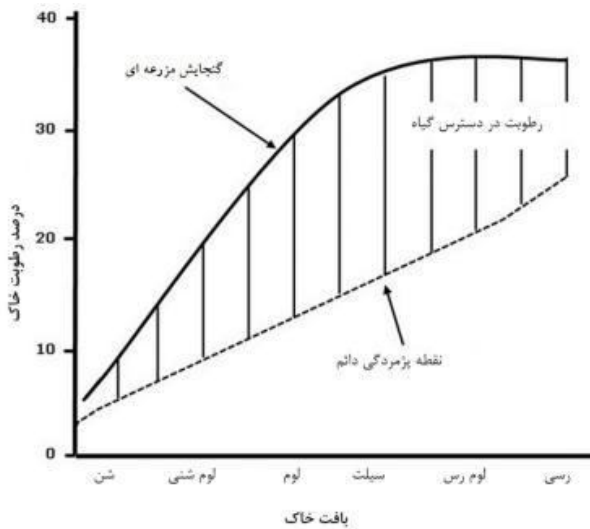


۷۵-۱۰۰ درصد رطوبت در دسترس
۰-۵۰ mm/m ظرفیت آب قابل استفاده

مرطوب، به شکل یک گلوله در می‌آید. روی انگشتان دست پوشش گلی قابل ملاحظه‌ای تشکیل می‌گردد، به راحتی بین انگشت شست و سبابه نوار تشکیل می‌شود.

شکل ۴- تشخیص رطوبت در خاک‌های با بافت ریز

در برنامه‌ریزی آبیاری، آب قابل استفاده گیاه مقدار رطوبتی است که بین دو حد گنجایش مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی دائم قرار می‌گیرد. در شکل ۵ این حدود را برای انواع مختلف بافت خاک بر پایه درصد رطوبت حجمی نشان داده شده است.



شکل ۵- مقادیر تقریبی رطوبت گنجایش مزرعه‌ای، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس در انواع بافت خاک

۲- تانسیومتر (مکش سنج)

در روش‌های غیرمستقیم تعیین رطوبت خاک نخست باید یک عامل دیگر مانند مکش خاک، مقاومت، فرکانس امواج نفوذی که درصد رطوبت بر آن مؤثر است، اندازه‌گیری شده و سپس از روی آن مقدار رطوبت خاک تعیین شود. در مطالعه روابط آب-گیاه-خاک، اندازه‌گیری مکش خاک می‌تواند عامل مناسبی در محاسبه تنش آبی گیاه نیز باشد. پتانسیل ماتریک در اثر جذب مولکول‌های آب توسط ذرات جامد خاک به وجود می‌آید و ریشه برای جذب آب در خاک باید بر این نیرو غلبه کند. پس می‌توان نتیجه گرفت که زمان هر آبیاری بستگی به نوع گیاه و پتانسیل ماتریک خاک دارد.

منحنی مشخصه رطوبتی خاک، از مشخصه‌های مهم فیزیکی خاک و بیانگر رابطه بین پتانسیل ماتریک و رطوبت خاک است (George, 2006).

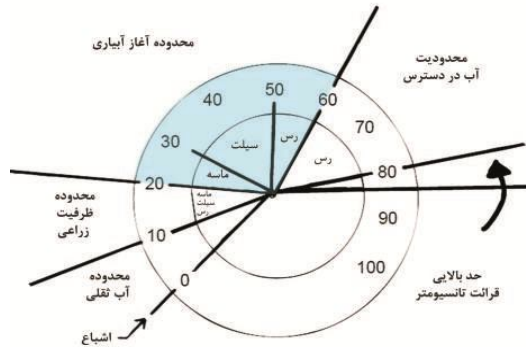
اندازه‌گیری پتانسیل ماتریک خاک با وسیله ساده‌ای به نام تانسیومتر انجام می‌شود. همه انواع تانسیومترها شامل جسم متخلخلی هستند که در تماس با خاک قرار می‌گیرند بطوریکه آب به راحتی می‌تواند از آن عبور کند. اگر خاک اطراف تانسیومتر خشک باشد پتانسیل ماتریک کاهش می‌یابد و آب از تانسیومتر خارج و وارد خاک می‌شود تا پتانسیل بین خاک و داخل تانسیومتر یکی شود. تا زمانی که تانسیومتر غیرقابل نفوذ به وسیله هوا باشد آب از آن خارج می‌شود و فشار منفی ایجاد می‌کند که این فشار منفی برابر پتانسیل ماتریک خاک است. اگر خاک اطراف تانسیومتر به تدریج مرطوب شود (برای نمونه باران ببارد یا آبیاری انجام شود)، حرکت آب به داخل کلاهک تانسیومتر باعث کاهش مکش داخل تانسیومتر می‌شود.

تانسیومترهای جیوه‌ای در کارهای آزمایشگاهی و پژوهشی و تانسیومترهای فلزی در کارهای صحرایی استفاده می‌شوند. تانسیومتر فلزی از یک لوله پر آب تشکیل شده است که قسمت پایین آن از یک کلاهک سرامیکی درست شده و قسمت بالای آن مسدود است، به طوری که اگر آب از کلاهک سرامیکی خارج شود در داخل لوله خلأ ایجاد می‌شود. به همین منظور در کنار لوله تانسیومتر، خلأسنجی به آن متصل بوده که قادر است مقدار خلأ یا فشار منفی را اندازه‌گیری کند. اگر کلاهک سرامیکی در داخل خاک قرار گیرد با خروج یا ورود آب به تانسیومتر، تعادل پتانسیلی بین آب داخل و خارج تانسیومتر برقرار می‌شود. در شکل ۶ نمونه‌هایی از تانسیومتر و اجزاء مختلف آن نشان داده شده است.



شکل ۶- نمونه‌هایی از تانسیومتر و اجزاء مختلف آن

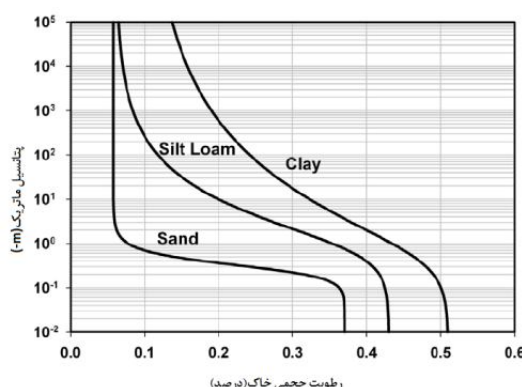
در بیشتر تانسیومترها درجه‌بندی خلا‌سنج بین ۰ تا ۱۰۰ بوده که هرکدام از درجات آن معادل ۱۰ سانتی‌متر مکش است. در برخی از نمونه‌های تجاری تانسیومتر برای سهولت کاربرد توسط بهره‌برداران و کشاورزان، خلا‌سنج تانسیومتر بر اساس بافت خاک مدرج شده و بر این اساس بهره‌بردار در صورت اطلاع از نوع بافت خاک به آسانی با توانایی بیشتری به تخمین وضعیت رطوبتی خاک می‌پردازد. در شکل ۷ نمونه‌ای از خلا‌سنج‌های که در تانسیومترها استفاده می‌شود نشان داده شده است.



شکل ۷- نمونه‌ای از خلاصنچ‌های استفاده شده در تانسیومترها

همان‌گونه که اشاره شد تانسیومتر پتانسیل ماتریک خاک را اندازه‌گیری می‌کند و با توجه به منحنی مشخصه رطوبتی خاک، رابطه بین پتانسیل ماتریک و رطوبت خاک برقرار می‌شود. شایان ذکر است منحنی مشخصه رطوبتی از مشخصه‌های مهم فیزیکی خاک بوده و در برنامه‌ریزی آبیاری از اهمیت زیادی برخوردار است. برای تعیین این منحنی مشخصه باید با اندازه‌گیری‌های زوجی، رطوبت خاک را در اندازه‌های مختلف مکش ماتریک تعیین کرد. از جمله عوامل مؤثر بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک می‌توان به بافت و ساختمان خاک، تخلخل، شکل خلل و فرج خاک، تراکم خاک، درجه حرارت و املاح موجود در خاک اشاره نمود. هر چه مقدار رس خاک بیشتر باشد، مقدار رطوبت موجود در مکشی معین بیشتر است. تغییرات شیب منحنی در خاک‌های رسی تدریجی است ولی در خاک‌های شنی به دلیل وجود خلل و فرج درشت ناگهانی است. منحنی مشخصه رطوبتی در مکش‌های کم، به‌طور عمده تابع ساختمان خاک است، اما در مکش‌های شدید تحت تأثیر

بافت خاک قرار می‌گیرد. در جدول ۳ تفسیر وضعیت رطوبت خاک براساس مقادیر مختلف مکش نشان داده شده است. در شکل ۸ نیز چند نمونه منحنی مشخصه رطوبتی برای خاک‌های مختلف ارائه شده است.



شکل ۸- نمونه‌ای از منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک

جدول ۳- تشخیص وضعیت رطوبتی خاک براساس مقادیر مکش خاک (برگرفته از منبع شماره ۲)

۰ سانتی بار	عدد صفر به این معناست که تمام خاک اشباع از آب است. اگر عدد صفر برای مدت طولانی ماندگار باشد، خاک دارای زهکشی ضعیفی است.
۱-۲۰ سانتی بار	آب زیادی در خاک وجود دارد و ثابت ماندن عدد در این محدوده ممکن است نشان‌دهنده مشکل زهکشی خاک باشد.
۲۰-۴۰ سانتی بار	آب و هوای کافی در خاک وجود دارد و توصیه می‌شود اگر تانسیمتر در این محدوده قرائت شد، عملیات آبیاری به‌جز در خاک‌های شنی، متوقف شود چرا که آبیاری مزرعه در این حالت، موجب افزایش تلفات آب در خاک‌های با بافت متوسط و ریز خواهد شد.
۴۰-۶۰ سانتی بار	آب و هوای کافی در خاک برای رشد گیاه وجود دارد. علاوه بر خاک‌های شنی برای خاک‌های رسی و سیلتی نیز (بسته به نوع گیاه) در این حالت آبیاری می‌تواند انجام شود.
۶۰-۸۰ سانتی بار	مقدار آب و هوای کافی در خاک‌های رسی و با بافت ریز برای رشد گیاه وجود دارد. در این شرایط آبیاری برای انواع بافت‌های خاک توصیه می‌شود.
۸۰-۹۰ سانتی بار	به‌جز خاک‌های سنگین رسی، آب کمی در خاک وجود دارد. توصیه می‌شود انجام عملیات آبیاری برای کلیه بافت‌های خاک، در مقادیر مکش کمتر از ۸۰ سانتی بار انجام گیرد. در خاک‌های شنی این مکش ممکن است به گیاه صدمه برگشت‌ناپذیر وارد نماید.

در جدول ۴ مقادیر رطوبت خاک در قرائت‌های مختلف تانسیومتر در بافت‌های شنی و رسی نشان داده شده است. برای انواع بافت‌های دیگر خاک می‌توان از روابط تجربی همانند مدل وان گنوختن، مدل وان گنوختن اصلاح شده، مدل بروکز و کوری و ... برای تعیین درصد رطوبت حجمی خاک استفاده نمود.

جدول ۴- مقایسه رطوبت در بافت‌های مختلف خاک توسط عدد خوانده شده با تانسیومتر
(برگرفته از منبع شماره ۸)

عدد خوانده شده توسط تانسیومتر (سانتی بار)	رطوبت حجمی در خاک شنی (درصد)	رطوبت حجمی در خاک رسی (درصد)
۰	۳۲	۵۸
۱۰	۱۵	۴۰
۲۰	۱۰	۳۰
۳۰	۹	۲۶
۴۰	۸	۲۳
۵۰	۷/۵	۲۱
۶۰	۷	۲۰
۷۰	۶/۵	۱۹
۸۰	۶	۱۸
۹۰	۵/۵	۱۷/۵
۱۰۰	۵	۱۷

نکات فنی در استفاده از تانسیومترها

۱- با هر بار خواندن درجه خلأسنج، باید آب داخل آن را کنترل کرد و اگر بیش از ۲-۵ سانتی‌متر آب نسبت به درپوش لاستیکی کم شده باشد، دوباره آن را پر از آب نمود.

۲- بهترین موقع برای اضافه کردن آب به دستگاه برای جلوگیری از ورود هوا، بعد از آبیاری و هنگام بازگشت آب به مکش‌سنج است زیرا به علت کم بودن مکش خاک، درپوش لاستیکی به راحتی جابجا می‌شود.

۳- تانسیومترها در پتانسیل بالاتر از یک اتمسفر کارایی ندارند زیرا در این پتانسیل حباب‌های هوا وارد تانسیومتر شده و عدد خوانده شده صحیح نخواهد بود.

۴- تانسیومترها نیازمند واسنجی نیستند ولی بعد از نصب تانسیومتر در خاک مزرعه پیش از خواندن باید مدت‌زمانی اجازه داد تا بین تانسیومتر و خاک تعادل برقرار شود.

۵- تانسیومتر می‌تواند به‌طور پیوسته اندازه‌گیری رطوبت خاک را انجام دهد اما پس از گذشت زمان طولانی از نصب تانسیومتر در خاک، دقت اندازه‌گیری کاهش خواهد یافت. از این رو میزان آب داخل دستگاه باید به‌صورت پیوسته کنترل شود.

روش صحیح نصب و استفاده از دستگاه تانسیومتر

قبل از نصب دستگاه در خاک مزرعه، برای اطمینان از درستی کار دستگاه آزمایش زیر را باید اجرا کرد:

۱- بعد از نصب کلاهک سرامیکی لازم است آن را به مدت چندین ساعت در آب مقطر یا آب جوشیده سرد شده قرار داد تا از لبریز شدن کامل کلاهک و رسیدن به حالت تعادل، اطمینان حاصل شود.

۲- پس از پر کردن لوله دستگاه از آب و بستن در لاستیکی آن، کلاهک مکش‌سنج را در داخل آب مقطر قرار می‌دهند، در این حالت عقربه باید عدد صفر را نشان دهد.

۳- کلاهک دستگاه را از آب مقطر خارج کرده و آن را بالای اجاق برقی روشن نگه می‌دارند. آب به آرامی از کلاهک سرامیکی خارج شده و بخار می‌شود و عقربه حرکت کرده و درجه‌های بالاتری را نشان می‌دهد. اگر دستگاه خراب باشد عقربه خلأسنج قبل از اینکه به ۸۵ سانتی بار برسد، به عقب بر می‌گردد که نشان‌دهنده ورود هوا به داخل دستگاه و خراب بودن آن است.

۴- پس از انجام مراحل سه‌گانه یادشده، در صورت سالم بودن دستگاه دوباره کلاهک را داخل آب مقطر قرار می‌دهند. آب از طریق کلاهک به آرامی وارد دستگاه شده و عقربه بعد از مدتی عدد صفر را نشان خواهد داد در غیر این صورت دستگاه خراب است.

برای نصب تانسیومتر در مزرعه، اقدامات زیر را باید انجام داد:

۱- برای استفاده از تانسیومتر، ابتدا اوگر یا مته‌ای که قطر آن به‌اندازه قطر لوله تانسیومتر یا کمی کمتر از آن باشد و طول آن کمی بیشتر از طول لوله تانسیومتر باشد انتخاب کنید (شکل ۹). پس از آن با استفاده از چکش، اوگر و یا میله را در زمین فرو ببرید (شکل ۱۰).



شکل ۹- انتخاب میله مناسب برای ایجاد چاهک برای نصب تانسیومتر در مزرعه



شکل ۱۰- ایجاد چاهک برای نصب تانسومتر با استفاده از میله و چکش

۲- مقداری از خاک نرم را برای ساختن دوغاب الک کنید (شکل ۱۱). سپس خاک الک شده را با آب مخلوط کنید تا دوغاب گل آماده شود (شکل ۱۲).



شکل ۱۱- الک کردن خاک نرم به منظور ساختن دوغاب



شکل ۱۲- مخلوط کردن خاک الک شده با آب به‌منظور ساختن دوغاب

۳- دوغاب گل را در حفره ایجاد شده برای نصب تانسومتر بریزید (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- ریختن دوغاب گل در سوراخ حفر شده برای نصب تانسومتر

۴- تانسومتر را در چاهک پر شده با دوغاب گل قرار دهید (شکل ۱۴).



شکل ۱۴- نصب تانسومتر در چاهک حفر شده

۵- با خاک در اطراف تانسومتر برآمدگی کوچکی بسازید تا از تجمع آب در اطراف لوله تانسومتر و نفوذ عمودی آن در طول لوله تانسومتر جلوگیری شود (شکل ۱۵). هنگام نصب تانسومتر در داخل حفره از زدن هرگونه ضربه به آن خودداری شود چون ضربه باعث کاهش دقت، شکستن دستگاه و غیرقابل استفاده شدن آن می‌شود.



شکل ۱۵- پر کردن اطراف لوله تانسومتر با خاک به منظور جلوگیری از تجمع آب در اطراف لوله

محل نصب تانسیومتر

برای انتخاب محل مناسب نصب تانسیومتر، نکته‌های زیر را باید رعایت کرد:

۱- تانسیومتر را در منطقه فعال ریشه نصب می‌کنند (شکل ۱۶). نکته دارای اهمیت آن است که عمق نفوذ و گسترش ریشه، در گیاهان مختلف باهم متفاوت است.



شکل ۱۶- محل نصب تانسیومتر در اطراف گیاه به منظور تعیین رطوبت خاک

۲- در آبیاری جوی و پشته‌ای، تانسیومتر را روی داغ آب نصب می‌کنند تا آب بتواند محیط اطراف آن را خیس کند.

۳- در روش آبیاری بارانی، تانسیومتر را در جایی نصب می‌کنند که شاخ و برگ گیاه مانع ریزش آب به محل نصب آن نشود.

۴- محل نصب را باید طوری انتخاب کرد که در مسیر کارهای زراعی نباشد. اما اگر مجبور به این کار شدیم لازم است تانسیومتر را بین دو میله محکم با رنگ روشن قرار

داد و یا از چوب و پرچم برای مشخص کردن آن استفاده نمود تا از وارد آمدن صدمات احتمالی به آن جلوگیری شود.

۳- بلوک گچی

استفاده از قالب یا بلوک‌های گچی یکی از روش‌های ساده برای اندازه‌گیری رطوبت خاک است که به نام بلوک‌های مقاومت نیز معروف هستند.

مراحل ساخت بلوک گچی

۱- دو پیچ فولادی ضدزنگ به طول ۵ سانتی‌متر را از یک صفحه پلاستیکی مستطیلی به ابعاد $3 \times 1/5$ با فاصله $1/5$ سانتی‌متر از هم عبور دهید. انتهای دو پیچ را در یک صفحه دایره‌ای شکل پلاستیکی (با قطر ۳ سانتی‌متر)، با استفاده از دو مهره ثابت کنید (شکل ۱۷).



شکل ۱۷- مرحله اول ساخت بلوک گچی

۲- یک لوله C.V.P یا لوله سفید (پلی‌پروپیلن) با قطر ۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر را از یک سمت برش داده و یک توری پلاستیکی را در درون آن و در حاشیه جدار لوله قرار دهید (شکل ۱۸).



شکل ۱۸- قرارگیری توری پلاستیکی درون لوله پلی‌پروپیلن

سپس آن دو پیچ و صفحات پلاستیکی را در درون لوله قرار دهید (شکل ۱۹).



شکل ۱۹- قرارگیری پیچ‌های فلزی درون لوله پلی‌پروپیلن

۳- پس از آماده شدن قالب و الکترودها گچ دندانپزشکی را به نسبت ۱ به ۱ با آب مقطر مخلوط کرده و خوب به هم زده و آن را یک‌دفعه اما به آرامی داخل قالب بریزد (شکل ۲۰).



شکل ۲۰- آماده‌سازی قالب‌ها به منظور ریختن گچ

۴- با ضربه زدن به قالب سعی کنید هوای محبوس شده را خارج کنید (شکل ۲۱).



شکل ۲۱- ریختن گچ در قالب‌های آماده شده

۵- پس از آن که گچ به اندازه کافی سفت شد می‌توان آن را از قالب خارج کرد.

۶- بلوک‌ها را دست‌کم به مدت یک شبانه‌روز در سایه خشک کنید و به انتهای دو پیچ دو سیم متصل کنید (شکل ۲۲).



شکل ۲۲- نمونه‌ای از بلوک گچی آماده شده

واسنجی بلوک‌های گچی

واسنجی بلوک گچی بدین معنی است که باید نخست یک منحنی برای هر خاکی که بلوک در آن استفاده می‌شود، تولید شود. به شیوه‌ای که در هر درصد رطوبت از آن خاک، شاخصی را که نشان‌دهنده مقاومت الکتریکی بلوک در آن درصد رطوبت است، نشان دهد (Hillel, 1998). واسنجی بلوک‌ها به شرح ذیل انجام می‌شود.

۱- بلوک‌ها را دست‌کم به مدت یک



شبانه‌روز در سایه‌خشک کنید. آنگاه آن‌ها را داخل آب قرار دهید تا به مدت نیم ساعت اشباع شوند و در همین وضعیت مقاومت دو سر الکتروود را با دستگاه مقاومت‌سنج اندازه‌گیری کنید. برای جلوگیری از پلاریزه شدن الکتروودها و امکان بروز اشتباه در اندازه‌گیری رطوبت توصیه می‌شود از مقاومت‌سنج‌هایی استفاده شود که در آن‌ها جریان برق مستقیم باطری به جریان متناوب تبدیل می‌شود. برای این منظور بیشتر مقاومت‌سنج‌های ۱۰۰۰ سیکی به کار برده می‌شود، زیرا با انجام این کار از عمل قطبی شدن جلوگیری شده و در اندازه‌گیری‌ها کمتر اشتباه پدیدار می‌شود. در شکل ۲۳ نمونه‌هایی از دستگاه مقاومت‌سنج نشان داده شده است.



شکل ۲۳- نمونه‌هایی از دستگاه مقاومت سنج بلوک گچی

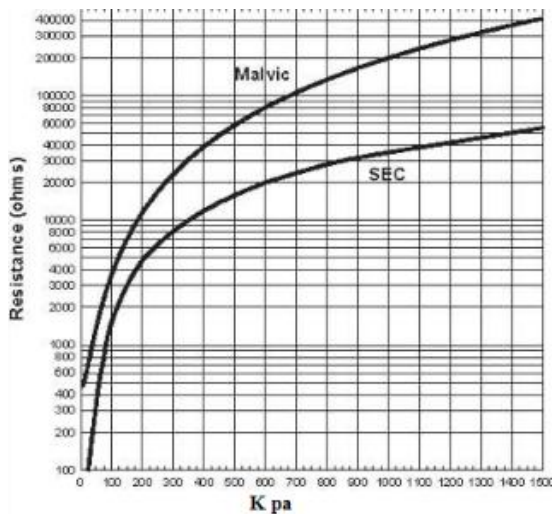
در زمان خواندن مقاومت بلوک‌های گچی با استفاده از دستگاه‌های قرائت سنج، اگر عدد خوانده شده در برخی از بلوک‌ها بیشتر از ۵ درصد میانگین خوانده‌ها بود، از آن‌ها استفاده نکنید.

۲- بلوک‌های آماده شده را داخل خاک گلدان قرار داده و پس از آبیاری مقاومت را در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری کرده و هم‌زمان با برداشت نمونه رطوبت خاک را به دست آورید.

۳- با رسم منحنی تغییرات مقاومت بلوک و درصد رطوبت خاک، بلوک‌ها واسنجی می‌شوند. در شکل ۲۴ نمونه‌ای از منحنی‌های کالیبراسیون برای دو بلوک گچ تجاری

نشان داده شده است به‌عنوان نمونه، اگر مقاومت ۱۰۰۰۰ اهم برای یک بلوک SEC (شرکت تجاری تولیدکننده تجهیزات رطوبت خاک) باشد، پتانسیل مکش خاک، ۳۴۵ کیلو پاسکال خواهد بود.

بدین ترتیب اگر بلوک‌ها را در خاک نصب کنیم کافی است فقط مقاومت را اندازه‌گیری کرده و از روی این نوع منحنی‌ها، می‌توان درصد رطوبت خاک را به دست آورد.



شکل ۲۴- نمونه‌ای از منحنی مقاومت دو بلوک گچی

نکات فنی در استفاده و نصب بلوک‌های گچی

۱- در هنگام آزمایش بلوک‌های گچی پس از آنکه آن‌ها را داخل آب قرار دادید تفاوت خواندن مقاومت الکتریکی بلوک‌ها نباید از ۵۰ اهم بیشتر باشد در این صورت بلوک‌ها یکنواخت نخواهد بود.

۲- اگر خواندن مقاومت الکتریکی بلوک‌ها در داخل آب همگی صفر باشند ایده‌آل است اما اگر خواندن مقاومت‌های الکتریکی تا حدود ۴۰۰ اهم را نشان دهند باز هم می‌توان با اعمال ضریب اصلاحی از آن‌ها استفاده کرد.

۳- اگر خواندن مقاومت الکتریکی بلوک در آب بسیار زیاد بود حتماً توصیه می‌شود که از آن استفاده نشود.

۴- برای جلوگیری از پلاریزه شدن الکترودها و امکان بروز اشتباه در اندازه‌گیری رطوبت، توصیه می‌شود از مقاومت‌سنج‌هایی استفاده شود که در آن‌ها جریان برق مستقیم باطری به جریان متناوب تبدیل می‌شود.

در جدول پنج مقادیر تقریبی رطوبت خاک بر اساس مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده در بلوک‌های گچی نشان داده شده است (قناد زاده، ۱۳۸۷).

جدول ۵- محدوده تقریبی برآورد رطوبت خاک با استفاده از بلوک گچی

محدوده تقریبی رطوبت خاک	محدوده مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده (اهم)
گنجایش مزرعه‌ای	۵۰۰ تا ۶۰۰
نقطه پژمردگی دائم	۷۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰

البته بلوک‌های گچی باید قادر باشند تا مقاومت الکتریکی ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلو اهم را هم اندازه‌گیری کنند.

۵- با توجه به نیاز تعادل پتانسیلی بین بلوک و خاک، لازم است که پس از نصب بلوک به مدت چندین ساعت صبر کرد تا این تعادل برقرار شود. برای این منظور بلوک‌ها قبل از آبیاری در خاک قرار داده می‌شوند و معمولاً در تمام فصل رشد در خاک باقی‌مانده و فقط سیم‌های متصل شده به الکترودها از خاک خارج است که در موقع اندازه‌گیری به دو سر مقاومت سنج وصل شوند.

۶- اگرچه در خاک‌های معمولی بلوک می‌تواند تا ۵ سال استفاده شوند ولی در خاک‌های شور یا آلی و خاک‌های مرطوب، بیش از یک سال عمر نخواهند کرد.

در نصب بلوک‌ها موارد ذیل باید در نظر بهره‌بردار باشد:

۱- بلوک‌ها باید به‌خوبی با خاک تماس داشته باشند و خاک به اطراف بلوک گچی فشرده شود (شکل ۲۵).



شکل ۲۵- نحوه جایگذاری بلوک گچی آماده شده در خاک

۲- محل مناسب برای قرار دادن دستگاه جایی است که وضعیت آن مشابه وضعیت بیشتر جاهای دیگر زمین باشد.

۳- با توجه به بیشینه عمق ریشه و نوع خاک، ممکن است به بیش از یک بلوک نیاز داشته باشیم. تمامی گیاهانی که دارای ریشه‌های عمیق هستند مانند درختان میوه، باید دارای دو بلوک رطوبت‌سنج یا بیشتر برای بررسی رطوبت باشند. به‌طورمعمول اگر عمق توسعه ریشه بیش از ۸۰ سانتی‌متر باشد باید حداقل دو بلوک گچی در ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر و یک بلوک گچی در پایین منطقه توسعه ریشه نصب شود.

نکته دارای اهمیت آن است که بلوک گچی مقادیر رطوبت خاک را به‌صورت نقطه‌ای برآورد می‌کند. از این‌رو یک بلوک گچی چند سانتی‌متری نمی‌تواند میانگین رطوبت یک محدوده از عمق خاک را اندازه‌گیری کند. به همین دلیل برای افزایش دقت تخمین رطوبت، بهتر است از چند بلوک گچی در هر عمق استفاده شده تا نمایانگر بهتری از وضعیت رطوبت خاک باشد.

برتری‌های بلوک گچی

۱- روش بلوک گچی کمابیش روش ساده‌ای به‌منظور تعیین رطوبت خاک است.

۲- این بلوک‌ها ارزان بوده و می‌توان تعداد زیادی از آن‌ها را با هزینه کم در داخل خاک نصب کرد.

کاستی‌های بلوک گچی

۱- حسگرهایی که با اندازه‌گیری مقاومت خاک، مقدار رطوبت خاک را اندازه‌گیری می‌کنند، تحت تأثیر شوری آب و خاک و یا حتی دمای خاک قرار می‌گیرند.

۲- هر بلوک گچی نیاز به واسنجی جداگانه‌ای دارد که انجام این کار زمان‌بر است.

۳- بلوک‌های گچی دارای زمان تاخیر برای رسیدن به تعادل رطوبتی هستند. از این‌رو بلوک گچی رفتار رطوبتی خاک را با تاخیر نشان می‌دهد.

۴- چون الکترودها داخل گچ قرار دارند از این‌رو تغییرات مقاومت بیشتر ناشی از رفتار رطوبتی گچ است تا خاک.

۵- چون بلوک‌های گچی با روش دستی ساخته می‌شوند از این‌رو خطای انسانی در ساخت آن و به دنبال آن نتایج حاصله وجود خواهد داشت. همچنین از سوی دیگر گچ بکار رفته در آن ممکن است دارای درصد مواد و نمک‌های زیاد و کم باشد که این عامل روی نتایج حاصله تأثیر خواهد داشت (Goodwin, 2000).

۶- هر چه شوری خاک بیشتر باشد، مقاومتی که به وسیله بلوک‌های گچی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک خوانده می‌شود، کاهش می‌یابد. در نتیجه شوری زیاد خاک به برآورد زیاد مقدار رطوبت خاک منجر می‌شود.

۷- بلوک‌های گچی به تدریج در خاک حل می‌شوند.

۴- اندازه‌گیری رطوبت با روش TDR

در روش رطوبت سنجی TDR دو میله موازی که بیشتر از جنس مس یا فولاد انتخاب می‌شوند به یک دستگاه گیرنده نشانه‌ها متصل هستند. این دو میله سپس به داخل خاک فرو برده می‌شوند. میله‌ها که عرضشان حدود ۵ میلی‌متر است به عنوان هادی عمل کرده و خاکی که بین میله و اطراف آن‌ها واقع شده است نقش محیط

دی‌الکتریک را انجام می‌دهد (دی‌الکتریک معیاری برای تمایل مولکول‌های ماده برای آرایش خود در هنگام قرار گرفتن در میدان نیروهای الکترواستاتیک است). در شکل ۲۶ نمونه‌ای از دستگاه trase جهت اندازه‌گیری رطوبت خاک نشان داده شده است.



شکل ۲۶- نمونه‌ای از دستگاه اندازه‌گیری رطوبت خاک

حال اگر دستگاه نشانه‌هایی را ایجاد و آن را در طول میله‌های موازی منتشر نماید، سرعت این نشانه‌ها که با فرکانس زیاد خارج شده‌اند توسط موادی مانند خاک مرطوب که ثابت دی‌الکتریک آن‌ها زیاد است کاهش پیدا می‌کند. امواجی که سرعت آن‌ها کم شده است از انتهای میله منعکس شده و پس از برگشت وارد دستگاه می‌شود. این دستگاه زمان بین فرستادن و دریافت نشانه‌ها منعکس شده را اندازه‌گیری می‌کند. به جای طول ثابت میله، سرعت انتشار نشانه‌ها به مقدار ثابت دی‌الکتریک خاک که تابعی از رطوبت است وابستگی دارد. و هر چه رطوبت خاک افزایش می‌یابد، ثابت دی‌الکتریک افزایش یافته و از این رو سرعت انتشار نشانه‌ها کاهش می‌یابد. در برخی دستگاه‌های استفاده شده دامنه تک موج برگشتی سنجیده و از روی ضعیف شدن موج برگشتی و تغییر فرکانس آن که به دلیل رطوبت است، رطوبت خاک تعیین می‌شود. در شکل‌های

۲۷ و ۲۸ نمونه‌ای از این دستگاه که به روش تغییر فرکانس تک موج برگشتی (FDR)، رطوبت خاک را اندازه‌گیری می‌کند نشان داده شده است.



شکل ۲۷- نمونه‌ای از دستگاه اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش FDR و تجهیزات نصب آن



شکل ۲۸- اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از روش TDR

همان‌گونه که اشاره شد مبنای اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش TDR براساس ویژگی آب از نظر ثابت دی‌الکتریک استوار است. با توجه به اینکه مولکول‌های آب دو قطبی هستند و به دلیل شیوه قرار گرفتن اتم‌های هیدروژن و اکسیژن نسبت به همدیگر، یک طرف مولکول دارای بار الکتریکی مثبت و طرف دیگر آن دارای بار الکتریکی منفی

است، ثابت دی‌الکتریک آب به مراتب بیشتر از خمیره خاک و هوای موجود در فضای متخلخل خاک است. به‌طوری‌که ثابت دی‌الکتریک آب ۸۰، خاک ۴ و هوا ۱ است. از این-رو مقدار ثابت دی‌الکتریک خاک به‌شدت به مقدار رطوبت وابسته است (متناسب با تغییر رطوبت خاک، ضریب دی‌الکتریک آن تغییر می‌کند و این تغییرات خطی نیست). رابطه بین مقدار ثابت دی‌الکتریک (K_a) و رطوبت حجمی، توسط نرم‌افزار دستگاه از طریق یک جدول از پیش برنامه‌ریزی‌شده تعیین می‌شود. معمولاً ۸ تا ۱۵ منحنی تبدیل ثابت دی‌الکتریک به رطوبت حجمی توسط شرکت‌ها برای دستگاه‌ها تعریف می‌شود که مبتنی بر نتایج پژوهشی بر روی خاک‌های مختلف بوده است. ثابت دی‌الکتریک برای خاک‌های کاملاً خشک ۲ تا ۴ است. اگر ۲۵ درصد حجم خاک را آب تشکیل دهد این مقدار ۱۱ تا ۱۲ خواهد بود. برای خاک‌های کشاورزی مقدار ثابت دی‌الکتریک اصولاً به درصد حجمی آب موجود در خاک بستگی داشته و تا حد زیادی به نوع خاک وابسته نیست (White and Zengelin, 1995).

برتری‌های کاربرد TDR

- ۱- تکرارپذیری
- ۲- سرعت و دقت تا کمابیش زیاد
- ۳- اندازه‌گیری رطوبت در اعماق مختلف خاک
- ۴- بی‌ضرر بودن کاربرد آن در مقایسه با نوترون‌متر
- ۵- امکان اندازه‌گیری شوری خاک به روش غیرمستقیم.

کاستی‌ها و محدودیت‌های دستگاه TDR

- ۱- گرانی حسگرهای تدفینی
- ۲- در حسگرهای تماسی رطوبت خوانده‌شده معرف میانگین رطوبت از سطح خاک تا عمق معادل طول حسگر است ولی در عرصه‌های منابع طبیعی، بافت اکثر خاک‌ها سبک

بوده و دارای قلوه‌سنگ هستند و امکان نصب آن‌ها مقدور نبوده و نتایج به‌دست‌آمده از این دسته از حسگرها دقیق نیست.

۳- انعکاس موج برگشتی تحت تأثیر محیط و سیستم اندازه‌گیری است از این‌رو احتمال بروز خطا در صورت عدم واسنجی دستگاه، بسیار زیاد خواهد بود. همچنین تماس ناقص حسگر با خاک و وجود هوا در اطراف آن، دقت خوانده‌های TDR را کاهش می‌دهد.

۴- تأثیرپذیری درصد رطوبت حجمی خوانده شده از درجه حرارت آب و خاک.

۵- رابطه بین مقدار ثابت دی‌الکتریک و درصد حجمی آب با اندازه‌گیری دقیق این مقدار در آزمایشگاه و با خاک‌هایی که میزان آب آن‌ها دقیقاً از قبل معلوم است به دست می‌آید، از این‌رو در صورت عدم تعیین دقیق ثابت دی‌الکتریک و یا محدودیت دستگاه از نظر منحنی تبدیل ثابت دی‌الکتریک به رطوبت حجمی، اعداد خوانده شده با خطا روبرو خواهد بود.

۶- محدودیت تعمیرات اساسی دستگاه و ارائه خدمات محدود توسط شرکت‌های فروشنده (وارداتی بودن تجهیزات)

۷- در خاک‌های یخ‌زده کاربرد دستگاه TDR دارای محدودیت است. چون ثابت دی‌الکتریک یخ خیلی کمتر از آب است.

۵- روش نوترون‌متری

در این روش نوترون‌های سریع از منبع رادیواکتیو موجود در پروب به داخل خاک منتشر می‌شوند. وقتی آن‌ها با ذراتی با جرم مساوی خودشان (بیشتر یون هیدروژن) برخورد می‌کنند و سرعتشان به‌شدت کاهش می‌یابد، توده‌ای از نوترون‌های کند شده را تشکیل می‌دهند. تا زمانی که آب به‌عنوان منبع اصلی هیدروژن در خاک باشد، تراکم نوترون‌های کند شده در اطراف میله پروب تا اندازه زیادی بستگی به میزان آب موجود در خاک خواهد داشت. به‌طور کلی نوترن‌متر از سه بخش تشکیل شده:

۱- منبع نوترون‌های با انرژی بالا

۲- دریافت‌کننده نوترون‌های حرارتی

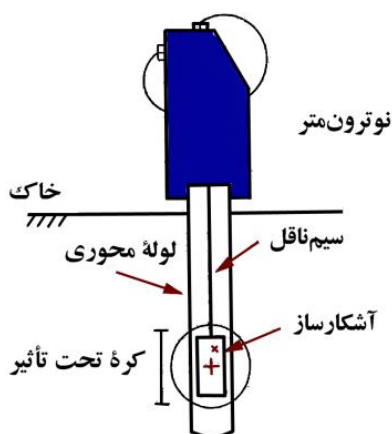
۳- شمارنده نوترون‌های حرارتی

در شکل ۲۹ نمونه‌ای از دستگاه نوترون‌متر به‌منظور تعیین رطوبت خاک، نشان داده شده است.



شکل ۲۹- نمونه‌ای از دستگاه نوترون‌متر به‌منظور تعیین رطوبت خاک

به‌منظور استفاده از دستگاه نوترون‌متر، یک لوله محوری (از جنس آلومینیوم یا ماده‌ای که فاقد هیدروژن در ترکیب خود باشد) در خاک قرار داده می‌شود و دستگاه بر روی آن نصب می‌شود. در هنگام خواندن شماره‌های نوترونی، منبع رادیواکتیو به همراه شمارشگر در داخل لوله به سمت پایین هدایت شده و در عمق خاصی از خاک قرار می‌گیرد (شکل ۳۰).



شکل ۳۰- طرح شماتیک اجزاء دستگاه نوترون متر

آلومینیوم، آلیاژ آلومینیوم، برنج و استیل ضدزنگ از جمله موادی هستند که به‌عنوان جنس لوله محوری در دستگاه نوترون متر استفاده می‌شوند. آلومینیوم، بیشترین ماده شفاف در برابر نوترون‌های حرارتی است. در خصوص لوله‌های برنجی اگرچه یک مقدار میزان شمارش را کاهش می‌دهند اما در برابر سدیم موجود در خاک، کمتر خورده می‌شوند. لوله استیل ضدزنگ، یکی از انواع لوله محوری است که می‌توان به‌دفعات از آن استفاده کرد. اما به خاطر سطح مقطع جذب بالای آن، میزان شمارش نوترون‌تری به مقدار معنی‌دار کاهش می‌یابد (Wood *et al.*, 1998). عوامل زیر در انتخاب جنس لوله مؤثر خواهند بود:

الف- ویژگی‌های شیمیایی خاک

ب- طول عمر و دوام لوله محوری

ج- عمق نصب لوله محوری

در دستگاه نوترون متر، تعداد نوترون‌های کند شده در واحد زمان اندازه‌گیری می‌شود. بدین سبب تشریح روابط متقابل نوترون‌های کند و خاک‌های مختلف آسان نخواهد بود. باید توجه نمود اعداد شمارش شده توسط دستگاه نوترون متر، آشکارا در معادله برازش داده شده قرار نمی‌گیرند، بلکه از نسبت‌های میزان شمارش نوترون (R)

به شمارش استاندارد استفاده می‌شود. تعداد نوترون‌های کند شده باید برای هر دستگاه نوترون‌متر، استاندارد شود زیرا منبع رادیواکتیو در هر دستگاه نوترون‌متر، بسته به میزان و سن منابع رادیواکتیو، مقدار متفاوتی از نوترون‌های سریع تولید می‌کند. همچنین برای خاک‌های مختلف باید نرمال‌سازی انجام شود، زیرا خاک‌ها دارای مقادیر مختلفی از اتم H و دیگر اتم‌های بزرگ هستند که به مقدار آب در داخل خاک مربوط نمی‌شود. به‌طور نمونه هیدروژن موجود در مواد آلی، کلر مرتبط با نمک و عنصر بور با مقدار آب موجود در خاک متفاوت خواهد بود (Hanson and Orloff, 2007). برای این منظور قبل از شروع خواندن‌های مزرعه‌ای، باید میزان شمارش نوترون در یک محیط استاندارد (که عموماً آب است) نیز اندازه‌گیری شود.

بدین ترتیب از تقسیم میزان شمارش نوترون در مزرعه به میزان شمارش آن در محیط استاندارد، نسبت‌های میزان شمارش نوترون (R) حاصل می‌شود. در نتیجه برای تبدیل داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه نوترون‌متر به رطوبت حجمی همسان در عمق مشخصی از خاک به یک منحنی واسنجی نیاز خواهد بود. از معادله زیر در واسنجی دستگاه نوترون‌متر استفاده می‌شود (رابطه ۱):

$$\theta = a + bR \quad (1)$$

که در آن، θ رطوبت حجمی خاک (cm^3/cm^3)، R نسبت میزان مقدار نوترون در خاک (C) به میزان مقدار آن در ماده استاندارد (CS) (معمولاً آب) و a و b ثابت‌های برازش هستند.

این امر نشان‌دهنده وجود رابطه خطی بین شمارش‌های نوترون‌متری و میزان حجمی رطوبت خاک است. از این رو در صورت برقراری رابطه واسنجی، می‌توان میزان رطوبت خاک را در ناحیه ریشه گیاه به‌طور پیوسته، تعیین نمود. باید توجه نمود منحنی‌های واسنجی فقط در نوع خاص خاک مورد آزمون معتبر خواهد بود (ترکیبات شیمیایی و چگالی خاک تأثیر معنی‌دار در منحنی واسنجی نوترون‌متر دارند). از این رو برای استفاده از این نوع دستگاه‌ها باید از منابع مختلف خطا در انجام فرآیند واسنجی آگاه بود. در این راستا گریکن و همکاران (۱۹۸۱) روش‌های مختلف واسنجی دستگاه نوترون‌متر را بررسی و منابع مختلف خطا را در این فرآیند آزمون و تحلیل کردند.

واسنجی مزرعه‌ای با قرار دادن لولهٔ محوری در خاک مزرعه انجام می‌گیرد. در این روش نخست میزان شمارش نوترون در عمق‌های مختلف خاک (که از نظر ترکیبات شیمیایی و چگالی ظاهری متفاوت به نظر می‌رسند) اندازه‌گیری می‌شود. سپس بلافاصله نمونه‌برداری حجمی از خاک و در عمق‌های یکسان (در همان خاکی که شمارش نوترون-متری صورت گرفته است) انجام می‌شود. در این راستا توصیه بر این است تا نمونه‌برداری از خاک، در نزدیک‌ترین فاصلهٔ ممکن به لولهٔ محوری صورت گیرد. به‌طوری‌که نمونهٔ برداشت شده، شاخصی از حجم خاک درون کره تحت تأثیر نوترون‌های حرارتی باشد. همچنین توصیه می‌شود که در هر عمق، یک زوج نمونه به‌صورت فاصلهٔ شعاعی از مرکز لولهٔ محوری برداشته شود. به‌بیان دیگر پس از هر نمونه‌برداری، با حرکت در جهت و یا خلاف جهت حرکت عقربه ساعت، یک نمونهٔ دیگر با فاصلهٔ مشخص از لولهٔ محوری صورت گیرد. بدین ترتیب میانگین رطوبت حجمی خاک (حاصل از اندازه‌گیری وزنی نمونه‌ها) با میزان شمارش‌های نوترون-متری (در عمق مشخص خاک) در یک معادلهٔ برازش داده شده، قرار می‌گیرند. در طی واسنجی مزرعه‌ای، داده‌های حاصل از یک منطقه، فقط نشان‌دهنده نسبت میزان رطوبت حجمی خاک به میزان شمارش نوترون در همان منطقهٔ خاص (مورد مطالعه) خواهد بود. برای توسعهٔ داده‌ها، می‌توان نقاط بیشتری را در منطقه مورد شناسایی قرار داد و به‌طور تصادفی انتخاب نمود. تعداد بهینهٔ نقاط در فرآیند واسنجی متغیر است و بستگی به تغییرپذیری مزرعه‌ای دارد. از این رو توصیه می‌شود تا منحنی واسنجی، دامنهٔ وسیعی از تغییرات در میزان رطوبت خاک را شامل شود.

نکات مهم در استفاده از دستگاه نوترون‌متر

- ۱- ضریب همبستگی منحنی واسنجی ممکن است در برخی از مواقع (به‌ویژه در خاک‌های سنگریزه‌ای) خیلی پایین باشد.
- ۲- در برخی از خاک‌ها به‌واسطهٔ انقباض و انبساط ناشی از چرخه‌های رطوبتی و خشکی، در خاک شیار ایجاد می‌شود. در این‌گونه شرایط به‌واسطهٔ شیار ایجاد شده، لولهٔ محوری در مجاورت هوا قرار می‌گیرد که این امر مشکل اندازه‌گیری رطوبت خاک را

پیچیده‌تر می‌نماید. از این‌رو کاربران دستگاه نوترون‌متر باید به منابع خطا و اندازه‌گیری‌های نادرست تحت چنین شرایطی توجه داشته باشند.

۳- انتهای لولهٔ محوری بهتر است توسط درپوش (با همان جنس لوله) بسته شود. همچنین پس از نصب لوله، مدخل ورودی آن نیز باید توسط درپوش مناسب بسته شود.

۴- برای نصب لوله محوری در خاک، توصیه بر این است تا از مته‌های دستی، برای حفر سوراخ استفاده شود. استفاده از مته‌های موتوری (به سبب امکان تخریب زیاد ساختمان خاک، در نتیجهٔ اصابت آن به قطعات سنگ، ایجاد تراکم و ایجاد سوراخ با قطر بزرگ‌تر) توصیه نمی‌شود.

۵- بسیار مهم است که تماس دیواره بیرونی لوله با خاک باید کامل باشد و هیچ‌گونه فضای خالی وجود نداشته باشد.

معایب روش نوترون متری

۱- گران بودن دستگاه

۲- نیاز به نیروی متخصص برای کار با دستگاه

۳- خطرات ناشی از قرار گرفتن در معرض تابش نوترون

۴- خطای زیاد اندازه‌گیری رطوبت در لایه سطحی خاک به دلیل فرار نوترون‌ها

۵- در خاک‌های محتوی مواد آلی نیازمند توجه و دقت زیاد در واسنجی است چون این خاک‌ها حاوی مقادیر زیادی اتم هیدروژن هستند.

۶- اگر خاک خیلی سنگریزه‌ای و یا سنگلاخی باشد، لزوماً اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک توسط دستگاه نوترون‌متر شاخص دقیقی از موجودی آب در محدودهٔ ریشهٔ گیاهان نخواهد بود. زیرا عدد خوانده شده توسط دستگاه نشان‌گر میانگین رطوبت خاک در حجم بزرگی از خاک، شامل قطعات سنگ نیز می‌شود. در صورتی که ذخیرهٔ آب در خاک و به دنبال آن جذب آب توسط ریشه‌ها، فقط تابعی از اجزاء ریز خاک خواهد بود. از این رو در شرایطی که ذرات ریز خاک، به‌عنوان شاخص در اندازه‌گیری رطوبت خاک مطرح باشد، به اصلاح منحنی واسنجی نیاز است.

نتیجه‌گیری و توصیه‌ها

برنامه‌ریزی آبیاری شامل روش‌های مختلف بوده و برای استفاده از هر روش نیز ابزارهایی وجود دارد. یکی از روش‌های برنامه‌ریزی آبیاری، پایش رطوبت خاک است که به روش‌های مختلف صورت می‌گیرد. هرچند با اندازه‌گیری پیوسته رطوبت خاک یا پارامترهای دیگر که نشان‌دهنده میزان رطوبت خاک هستند، می‌توان زمان شروع و مقدار آب آبیاری که نیاز است یا زمان خاتمه آبیاری را تعیین نمود. ولی توجه به برخی محدودیت‌های فنی تجهیزات یادشده، ضروری به نظر می‌رسد. به‌طورنمونه به‌کارگیری تجهیزات اندازه‌گیری رطوبت خاک در خاک‌های شور و قلیا و خاک‌های با درز و ترک زیاد با مقدار خطای زیادی روبرو خواهد بود. از سوی دیگر در برخی دستگاه‌های سنجش رطوبت خاک، امکان اندازه‌گیری همزمان رطوبت خاک در اعماق مختلف (هم در سطح و هم در عمق) و محدودیت اندازه‌گیری رطوبت در عمق بیش از دو متر وجود دارد. هر چند امروزه با استفاده از دستگاه‌های جدید و کارگذاری سنسورها در اعماق مختلف خاک و نصب یک دیتالاگر، بخش عمده‌ای از این محدودیت برطرف شده است. همچنین در برخی از دستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک همانند بلوک گچی، تانسومتر و نوترون-متر، امکان اندازه‌گیری همزمان مولفه‌های تأثیرگذار بر رطوبت خاک (مانند دما و شوری) توسط دستگاه وجود ندارد. هر چند امروزه حسگرهای مختلفی تولید شده که اندازه‌گیری همزمان این مولفه‌ها را در کنار اندازه‌گیری رطوبت خاک، میسر می‌کند.

علیرغم محدودیت‌های مذکور، سامانه‌های آبیاری مبتنی بر کاربرد حسگرهای رطوبتی خاک می‌توانند بیشترین بهره‌وری آب در مزرعه را با حفظ رطوبت خاک در سطح بهینه فراهم کنند. ولی برای انتخاب ابزار اندازه‌گیری رطوبت خاک، باید به ویژگی‌های هر وسیله و تناسب آن با شرایط بافت و شوری خاک توجه داشت و در انتخاب تجهیزات اندازه‌گیری رطوبت خاک به عواملی همچون دقت، سهولت، زحمت انجام کار، خطر سلامتی و قیمت نیز توجه نمود. از سوی دیگر به‌منظور شناخت هرچه بیشتر از وضعیت مزارع و باغات بهتر است اندازه‌گیری رطوبت خاک در طی یک فصل زراعی به‌طور پیوسته در چند مرحله حساس رشد انجام‌شده و یا تجهیزاتی که قابلیت اندازه‌گیری پیوسته رطوبت خاک را دارند، استفاده شود.

فهرست منابع

۱. قناد زاده م. ع. ۱۳۸۷. ساخت و واسنجی حسگر رطوبتی با استفاده از بلوک‌های گچی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
2. Alam, M. and Rogers, D.H. 1997. Tensiometer use in scheduling irrigation. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service, Manhattan, Kansas.
3. Gardner W.H. 1986. Water Content. In A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
4. Goodwin, I.T. 2000. Gypsum blocks for measuring the dryness of soil. Agriculture notes, AG0294.
5. Greacen, E.L., Correll, R.L., Cunningham, R.B., Johns, G.G. and Nicolls, K.D. 1981. Calibration, Chapter 6. In: Soil Mater Assessment by the Neutron Method. CSIRU Australia.
6. Hanson, B.R. and Orloff, S. 2007. Monitoring Soil Moisture for Irrigation Water Management. UC ANR Pub 21635.
7. Hillel, D. 1998. Environmental Soil Physics 1st Edition. Academic Press.
8. IAEA. 2008. Field Estimation of Soil Water Content A Practical Guide to Methods, Instrumentation and Sensor Technology. IAEA, VIENNA.
9. White, I. and Zegelin. S.J. 1995. Electric and Dielectric Methods for Monitoring Soil Water Content. Handbook of Vadose Zone Characterization & Monitoring, L. G. Everett, I., and S. J. Cullen, (Eds), CRC Press, Inc., Boca Raton, pp: 343-385.
10. Wood, M., Malano, H. and Turrall, H. 1998. Real Time Monitoring and Control of On-Farm Surface Irrigation Systems, Final Report, Department of Civil and Environmental Engineering the University of Melbourne, VIC.
11. Yuen, S.T.S., Styles J.R. and McMahon T.A. 2000. Monitoring in- situ moisture content of municipal solid waste landfills. Journal of Environmental Engineering, 126 (12): 1088-1095.