

## تعیین شاخص‌های خاک و اندازه‌گیری بیلان آبی برای برنامه‌ریزی یک مرکز کنترل آبیاری

نایب عبدالرحمانی‌رزکه<sup>۱</sup>، رحمان فرخی تیمورلو<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۲/۱۶)

### چکیده

امروزه محدودیت منابع آب بر اهمیت برنامه‌ریزی دقیق مشتمل بر برآورد زمان و میزان آبیاری افزوده است. این امر با شناسایی شاخص‌های خاک و بیلان آبی مزرعه امکان‌پذیر است. مقدار ظرفیت زراعی خاک یک سری گلدان با دو روش اندازه‌گیری آزمایشگاهی و مزرعه‌ای به ترتیب ۲۱ و ۱۹/۸ درصد به دست آمد و نقطه پژمردگی دائم ۱۲ درصد تعیین شد. سپس مرکز کنترل آبیاری به روشی برنامه‌ریزی شد که وقتی رطوبت خاک گلدان‌ها به ۲۱ درصد رسید آبیاری قطع و با رسیدن به ۱۲ درصد آبیاری شروع شود. مرکز کنترل از رطوبت‌سنجی ارزان‌قیمت مدل YL-69 بهره می‌برد که با سنسور دقیق WET-2 کالیبره شده و همبستگی بین داده‌ها ۰/۹۹۴ است. ارزیابی دقت سنسور YL-69 در ۵ سطح رطوبتی (۲۱، ۱۸، ۱۵، ۱۲، و ۹ درصد) نشان داد که همبستگی ۰/۹۸ بین رطوبت اندازه‌گیری شده با مقدار واقعی وجود دارد و حاکی از امکان استفاده از آن در پایش رطوبت اطراف ریشه گیاه برای رشد مطلوب است.

**کلیدواژه‌گان:** بیلان آبی، رطوبت‌سنج، سنسور، سیستم کنترل، شاخص‌های خاک.

### مقدمه

با توجه به محوری بودن کشاورزی در برنامه توسعه اقتصادی کشور، بالا بردن میزان تولیدات کشاورزی برای تأمین نهاده‌های غذایی اهمیت ویژه‌ای دارد. در این زمینه باید به زیربنایی بودن مسئله آب و خاک توجه کرد و برنامه‌ریزی‌های لازم مبتنی بر استفاده بهینه از تمام پتانسیل آب و خاک صورت پذیرد. بررسی توانایی‌های مذکور حاکی از آن است که با توجه به کمبود آب در کشور باید در مصرف آن تدابیری اتخاذ شود تا عملکرد بالایی در تولید محصولات کشاورزی به عمل آید. کاربرد روش‌های آبیاری زیر فشار به عنوان یکی از راهکارهای استفاده بهینه از آب در بخش کشاورزی در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است اما مشکل اساسی در بهینه‌سازی این سیستم‌ها توجه نکردن به مصرف به موقع آب است که در پایان به مصرف بی‌رویه آن می‌انجامد. در این زمینه، تجهیز و نوسازی سیستم‌های آبیاری مزارع به سیستم‌های زیر فشار از یک سو و بالا بردن بازده این سیستم‌ها با استفاده از سامانه هوشمند از سوی دیگر اهمیت دارد.

برای افزایش باردهی مصرف آب در کشاورزی باید دو فاکتور طراحی سیستم‌های آبیاری و مدیریت صحیح آن‌ها در نظر گرفته شود. کنترل خودکار سیستم‌های آبیاری قطره‌ای

برای آبیاری دقیق و بهینه محصولات و باغات کشاورزی، یکی از روش‌های مدیریت مصرف آب کشاورزی است. اهمیت این کار با توجه به فرارگرفتن کشور ایران در منطقه کم‌آب و خشکسالی‌های سال‌های اخیر از یک طرف و افزایش استفاده کشاورزان از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای در کشور از طرف دیگر بیشتر نمایان می‌شود. برای کنترل خودکار سیستم‌های آبیاری باید مدت زمان آبیاری و همچنین شروع و خاتمه آن به صورت علمی تعیین شود. تعیین زمان شروع و پایان آبیاری به نحوی که همیشه رطوبت به میزان مطلوب در اطراف ریشه گیاه وجود داشته باشد، بدون استفاده از تجهیزات مناسب امکان‌پذیر نیست و کشاورزان به تجربیات خود در این زمینه اتکا می‌کنند که مسلماً اتلاف آب را به همراه دارد. همچنین بیشتر کشاورزان برای آبیاری کردن و به کار انداختن پمپ سیستم‌های آبیاری در مزرعه، زمان زیادی را صرف پیمودن مسافت شهر به مزرعه می‌کنند. استفاده از تایمرها به عنوان روش کنترلی نیمه خودکار راه‌حلی است که کشاورزان می‌توانند به کار برند، به صورتی که کشاورز با رفتن به مزرعه زمان شروع آبیاری را به صورت دستی آغاز و خاتمه آن را با تایمر تنظیم کند. معایب موجود در این روش مشهود است. بنابراین با به کار بردن دانش فنی در برنامه‌ریزی آبیاری هوشمند، بدون نیاز به کاربر و شروع خودکار آبیاری زمانی که گیاه نیاز به آب داشته باشد و خاتمه آبیاری بعد از رسیدن رطوبت خاک به حد مطلوب، امکان‌پذیر و ضروری

به نظر می‌رسد. تعیین زمان مناسب آبیاری متأثر از برخی شاخص‌های خاک، گیاه، و بیلان آبی است که باید اندازه‌گیری شوند.

برنامه‌ریزی آبیاری با استفاده از شاخص‌های خاک از روش‌های ساده و کاربردی است که محققان زیادی در این زمینه به آن توجه کرده‌اند. زیرا کمترین تغییر در فرم گیاه به رطوبت موجود در خاک بستگی دارد. به‌طور کلی خاک مخزن نگهداری رطوبت برای گیاه است و خاک‌های گوناگون، مقادیر متفاوتی آب در خود نگه‌می‌دارند که به بافت خاک و توزیع اندازه خلل‌و فرج آن بستگی دارد (Afyuni *et al.*, 1993). بافت خاک، مقاومت مکانیکی خاک، نقطه اشباع، ظرفیت زراعی (FC)<sup>۱</sup>، نقطه پژمردگی دائم خاک (PWP)<sup>۲</sup>، نفوذپذیری، و پیاز رطوبتی از شاخص‌های خاک‌اند که در تعیین زمان مناسب آبیاری دخالت دارند. حرکت آب و توزیع آن در خاک (بیلان آبی) به شاخص‌های مذکور و برخی شرایط آب‌وهوایی بستگی دارد (Ramah *et al.*, 2011). اهمیت اندازه‌گیری بیلان آبی خاک در تعیین محل کارگذاری سنسورها و برآورد میزان آبیاری است. سنسورهای رطوبت‌سنج خاک از سنسورهایی هستند که به این منظور می‌توانند استفاده شوند و محققان زیادی از آن در کنترل خودکار سیستم‌های آبیاری بهره‌گرفته‌اند. با استفاده از سنسورهای رطوبت‌سنج، رطوبت اطراف ریشه گیاه به‌صورت آنلاین اندازه‌گیری و از طریق آن عمل آبیاری خودکار صورت می‌گیرد (Coolong, 2013). نکته حائز اهمیت در استفاده از این سنسورها، هزینه بالای آن‌هاست که استقبال کشاورزان را کاهش می‌دهد.

افزون بر تلفات آب در عمق‌های خارج از محدوده ریشه گیاه، امکان ایجاد رواناب (مقدار آبی که بعد از آبیاری در خاک نفوذ نمی‌کند، این آب در سطح خاک جاری و بدون استفاده خارج می‌شود) است که باید کنترل شود. این مطلب در پارک‌ها و جنگل‌های طبیعی بسیار مشاهده می‌شود. توجه‌نکردن به متناسب‌بودن مشخصات خاک از نظر ظرفیت نگهداری و سرعت نفوذ آب در خاک با سیستم آبیاری باعث افزایش رواناب خواهد شد. کاهش رواناب از دیگر مزایای سیستم‌های هوشمند است که با دراختیار قراردادن آب لازم گیاه مانع مصرف بی‌رویه آب به نسبت سایر سیستم‌های آبیاری می‌شود.

بنابراین اندازه‌گیری و تعیین شاخص‌های خاک از اقدامات ضروری در برنامه‌ریزی مرکز کنترل سیستم هوشمند آبیاری

است که به اختصار تشریح می‌شود:

۱. بافت و نوع ساختمان خاک: ترکیب نسبی اجزای تشکیل‌دهنده خاک را بافت خاک گویند. مقادیر سه گروه اصلی اجزای تشکیل‌دهنده خاک را که شامل شن، سلیت، و رس است، با تجزیه آزمایشگاهی خاک اندازه‌گیری می‌کنند، با تعیین این مقادیر و از روی مثلث بافت خاک، نوع بافت خاک تعیین می‌شود. تأثیر بافت خاک بر خلل‌و فرج، آن را در زمره یکی از خصوصیات مهم جریان آب‌وهوا در خاک قرار می‌دهد (Mahmodi, 2007).

۲. ظرفیت زراعی: معمولاً یک تا سه روز پس از خیس‌شدن خاک به‌وسیله باران یا آبیاری، رطوبت موجود در خاک به شرایط نسبتاً پایداری می‌رسد. این حد رطوبت ظرفیت زراعی نامیده می‌شود در این حالت منافذ درشت خاک آب خود را از دست داده ولی منافذ ریز هنوز پر از آب است، و گیاهان می‌توانند از آن استفاده کنند. رطوبت ظرفیت زراعی حد بالایی از رطوبت قابل جذب گیاه را نشان می‌دهد و هرچه رطوبت خام از این حد بیشتر باشد تحت‌تأثیر نیروی ثقل از خاک و حوزه فعالیت ریشه‌ها خارج می‌شود (Theophilo and Marta, 2010).

۳. نقطه پژمردگی دائم خاک: محدوده‌ای که میزان رطوبت موجود در خاک به کمترین مقدار خود می‌رسد و ریشه‌ها قادر به جذب آن نیستند. در این حالت گیاه شروع به پژمرده‌شدن می‌کند.

۴. وزن مخصوص ظاهری خاک (Bulk density): عبارت است از وزن واحد حجم خاک خشک‌شده که برحسب گرم بر سانتی‌مترمکعب بیان می‌شود. این پارامتر تعیین‌کننده درصد تخلخل خاک است و با ضرب‌کردن آن در رطوبت وزنی، رطوبت حجمی محاسبه می‌شود. در بعضی از اندازه‌گیری‌ها، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم را براساس رطوبت حجمی ارائه می‌کنند که برای استفاده از این نتایج در برنامه‌ریزی سیستم هوشمند لازم است درصد رطوبت حجمی بر وزن مخصوص ظاهری خاک تقسیم شود تا درصد رطوبت به‌دست آید (Soltani, 2010).

۵. آب قابل دسترس گیاه<sup>۳</sup> (PAW): آب قابل استفاده گیاه همچنان که در رابطه ۱ نشان داده شده است مقدار رطوبتی است که بین دو حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم قرار می‌گیرد (Veihmeyer and Hendrickson 1949). شکل ۱ این حدود را برای انواع گوناگون خاک‌ها براساس رطوبت حجمی نشان می‌دهد (Zotarelli *et al.*, 2010) که با تقسیم‌کردن این

1. Field capacity , FC

2. Permanent Wilting Point , PWP

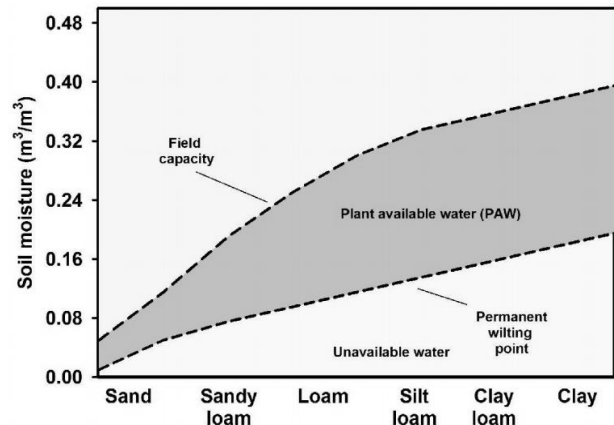
روی سطح خاک جریان می‌یابد و به تدریج در آن نفوذ می‌کند تا برای استفاده گیاه در خاک ذخیره شود. با توجه به اینکه یکی از هدف‌های آبیاری، ذخیره آب در درون خاک است، بنابراین نحوه ورود آب و سرعت آن به داخل خاک بسیار اهمیت دارد و از این پارامتر در تعیین نوع سیستم آبیاری استفاده می‌کنند که تابع بافت خاک است (Cheema et al., 2011). جدول ۲ قابلیت نفوذ آب در انواع خاک‌ها را نشان می‌دهد که خاک‌های با بافت لومی رسی نفوذپذیری مناسبی دارند و برای اجرای آبیاری قطره‌ای مناسب اند (Mahmodi, 2007).

جدول ۱. ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم در انواع خاک‌ها برحسب رطوبت جرمی (Miller, 1990)

درصد رطوبت		بافت خاک
در نقطه پژمردگی دائم (درصد)	در ظرفیت زراعی (درصد)	
۱/۷	۶/۸	شنی متوسط
۲/۳	۸/۵	شنی ریز
۳/۴	۱۱/۳	لوم شن
۴/۵	۱۴/۷	لوم شن ریز
۶/۸	۱۸/۱	لوم
۷/۹	۱۹/۸	لوم سیلتی
۱۰/۲	۲۱/۵	لوم رسی
۱۴/۷	۲۲/۶	رسی

حدود بر وزن مخصوص ظاهری خاک، این حدود برحسب درصد رطوبت جرمی به دست می‌آید (جدول ۱). در برنامه‌ریزی مرکز کنترل باید سعی شود که رطوبت خاک به نقطه پژمردگی دائم نرسد و از ظرفیت زراعی خاک بالاتر نرود. بدین ترتیب اطمینان حاصل می‌شود که گیاه تمام آب را مصرف می‌کند و اتلاف آبی وجود نخواهد داشت.

$$PAW = FC - PWP \quad (\text{رابطه ۱})$$



شکل ۱. ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم در انواع خاک‌ها برحسب رطوبت حجمی (Zotarelli et al., 2010)

۶. نفوذپذیری خاک: عبارت است از مقدار آبی که از سطح خاک به داخل آن برحسب ارتفاع آب در واحد زمان نفوذ می‌کند. در تمام روش‌های آبیاری، به جز آبیاری زیرسطحی، آب

جدول ۲. راهنمای طبقه‌بندی خاک‌ها از نظر آبیاری و تعیین کلاس استعداد آنها (Mahmodi, 2007)

بافت سطحی	ذرات درشت در خاک سطحی (درصد)	ظرفیت نگهداری آب قابل استفاده (mm/h)		عمق مؤثر (cm)	شوری یا خطر سدیم
		در 30cm فوقانی خاک سطحی	در طول پروفیل تا عمق 150cm		
لوم شن تا لوم رسی	< ۱۵	> ۴	> ۲۰	> ۱۰۰	خطر ندارد
تا لوم رسی سیلتی	۱۵-۳۵	۲/۵ - ۴	۱۲-۲۰	۷۵-۱۰۰	خفیف
شن لومی تا لوم رسی	> ۳۵	۲/۰-۲/۵	۱۰-۱۲	۵۰-۷۵	متوسط
شن تا رسی	حدی ندارد	< ۲	< ۱۰	< ۵۰	شدید
شن تا رسی	حدی ندارد	حدی ندارد	حدی ندارد	< ۵۰	حدی ندارد

۷. نحوه توزیع آب توسط قطره‌چکان (پياز رطوبتی): الگوی توزیع آب با قطره‌چکان در خاک باید اندازه‌گیری شود تا آب ریخته شده پای گیاه به تمامی توسط آن مصرف شود و تلفات آب کاهش یابد. شناخت الگوی خیس شدن خاک توسط قطره‌چکان (پياز رطوبتی)، نقش مهمی در طراحی آبیاری قطره‌ای هوشمند دارد و بر محاسبه عمق آبیاری و محل

قرارگیری انواع سنسورهای رطوبت‌سنج برای نشان دادن حد رطوبتی مؤثر است. داشتن اطلاعات کافی در زمینه نحوه توزیع رطوبت در خاک برای تضمین طراحی مناسب سیستم آبیاری و تعیین دقیق محل قرارگیری سنسور در سیستم‌های هوشمند الزامی است (Arbat et al., 2013). پياز رطوبتی ایجاد شده توسط قطره‌چکان در سیستم‌های هوشمند آبیاری باید به گونه‌ای

مشخص کردن الگوی پیاز رطوبتی و تعیین محل سنسور رطوبت-سنج در سیستم کنترل هوشمند به قدری اهمیت دارد که در تحقیقی در سال ۲۰۰۹ از دو سنسور رطوبت-سنج در عمق‌های ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری از سطح خاک با توجه به عمق نفوذ ریشه گیاه استفاده شد. داده دریافتی از دو سنسور توسط مرکز کنترل پردازش و از طریق دو محدوده رطوبتی، فرمان شروع و پایان آبیاری صادر می‌شد (Riquelme et al., 2009).

بهینه‌بودن مصرف آب در سیستم‌های آبیاری زیر فشار به دلیل عواملی همچون نداشتن برنامه‌ریزی صحیح در زمان شروع و پایان آبیاری باعث اهمیت‌بخشیدن به طراحی سیستم‌های هوشمند آبیاری برای افزایش کارایی مصرف آب شده است. از مشکلات موجود در هوشمند کردن سیستم‌های آبیاری قطره‌ای علاوه بر گران بودن رطوبت-سنج‌های رایج، تعیین زمان شروع و خاتمه آبیاری است که می‌تواند کارایی سیستم را تحت تأثیر قرار دهد. هدف از این تحقیق تعیین شاخص‌های یک نمونه خاک برای تعیین شروع و پایان آبیاری با یک سنسور رطوبت-سنج ارزان و ارزیابی کارایی آن برای تعیین امکان استفاده از آن در هوشمندسازی سیستم آبیاری قطره‌ای است.

### مواد و روش‌ها

اولین مرحله در شناسایی پارامترهای خاک، نمونه‌برداری از آن است تا در مراحل بعدی با تجزیه و تحلیل‌های لازم، خصوصیات خاک شناخته و از اطلاعات به‌دست‌آمده در برنامه‌ریزی مرکز کنترل سیستم هوشمند استفاده شود. خاک استفاده‌شده برای آزمایش از مزرعه‌ای واقع در دانشگاه ارومیه پردیس نازلو، که سیستم هوشمند آبیاری قطره‌ای برای آن طراحی خواهد شد، به‌صورت تصادفی از چند منطقه زمین جمع‌آوری و برای انجام آزمایش‌های لازم به آزمایشگاه گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی انتقال یافت. چند آزمایش با اهداف متفاوت به این شرح صورت گرفت:

۱. تعیین بافت خاک به روش هیدرومتری: با مشخص کردن درصد رس، سلیت، و شن موجود در خاک بافت آن تعیین می‌شود، بنابراین برای تعیین مقادیر این ذرات، خاک نمونه‌برداری‌شده، ابتدا خشک شد. مقدار معینی از خاک خشک‌شده و الک‌شده با ذرات کوچکتر از ۲ میلی‌متر در یک بشر ریخته و روی آن مقداری آب اضافه شد. محلول با همزن الکتریکی (shaker) به مدت سه دقیقه به هم زده شد. در مرحله بعد، حجم محلول به یک لیتر رسانده شد. پس از گذشت ۴۰ ثانیه توسط هیدرومتر غلظت محلول قرائت و قرائت بعدی بعد از گذشت ۴ ساعت انجام گرفت. هیدرومتر دستگاهی است که

باشد که ریشه گیاه قابلیت حداکثر استفاده از آب موجود را داشته باشد. پایش این پیاز رطوبتی با سنسور امکان‌پذیر است. در طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای، میزان حجم خاک خیس‌شده نشانگر مقدار آبی است که در ناحیه ریشه گیاه ذخیره شده است. به‌طور کلی افزایش میزان دبی قطره‌چکان فقط بر درصد رطوبت نقاط نزدیک به قطره‌چکان می‌افزاید، تولید رواناب می‌کند، و از گسترش افقی و عمودی رطوبت می‌کاهد. بنابراین با کاهش میزان دبی، الگوی پخش آب در خاک افزایش می‌یابد و توزیع رطوبت مناسب‌تری حول قطره‌چکان خواهیم داشت (Revol et al., 1991).

در سال ۲۰۱۳ تحقیقی در زمینه اندازه‌گیری آزمایشگاهی ظرفیت زراعی و مقایسه آن با فرمول‌های تعیین ظرفیت زراعی براساس مشخصات خاک در کشور مالی و نیجریه صورت گرفت. نتایج حاکی از آن است که برای اندازه‌گیری ظرفیت زراعی و تعیین رطوبت مطلوب برای رشد گیاه از طریق آن نمی‌توان به روش آزمایشگاهی اکتفا کرد، به‌طور کلی برای تعیین این محدوده باید ترکیبی از دو روش آزمایشگاهی و مزرعه‌ای صورت گیرد (Diallo and Marico, 2013).

در سال ۲۰۱۳ تحقیقی در زمینه ارزیابی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برای عملکرد رشد گیاهان صورت گرفته است. مبنای آزمایش‌های آنها نحوه حرکت آب به سمت ریشه براساس مشخصات خاک بوده است. براساس این تحقیق، با اندازه‌گیری مشخصات خاک همچون بافت خاک، رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی، و نقطه پژمردگی و وارد کردن آن در نرم‌افزار Hydrus-2D (این نرم‌افزار دارای انواع مدل یک‌بعدی، دوبعدی، و سه‌بعدی است که این مدل‌ها قادر هستند حرکت یک‌بعدی، دوبعدی، و سه‌بعدی آب، املاح، حرارت، جذب آب توسط ریشه، و همچنین رشد ریشه را در شرایط اشباع و غیراشباع در خاک شبیه‌سازی کنند) نحوه حرکت آب در مدت زمان معین در داخل خاک شبیه‌سازی شده است. با در دسترس بودن الگوی پخش ریشه درخت مورد نظر و پیاز رطوبتی شبیه‌سازی‌شده توسط نرم‌افزار Hydrus-2D در مدت زمان‌های معین، زمان آبیاری برای حالتی که حداکثر آب در اختیار گیاه قرار داده شود، تعیین شد. همچنین از طریق نرم‌افزار و با انجام چند تکرار نسبت به محل‌های متفاوت قطره‌چکان، محل دقیق آن نسبت به پایه گیاه مشخص شد که مصرف بهینه آب را به دنبال داشته است (Phogat et al., 2013). واضح است که با استفاده از سنسور رطوبت-سنج و قرارگیری آن در محل مناسب امکان شروع و پایان آبیاری بدون دخالت اپراتور وجود دارد که این امر موجب مصرف بهتر آب می‌شود (Dursun and Ozden, 2011).

دلیل لازم بود وزن ظاهری مخصوص خاک نیز اندازه‌گیری شود. برای این آزمایش ظرف‌های ۱۰۰ سانتی‌مترمکعبی در داخل خاک قرار داده شد (شکل ۲)، سپس ظرف‌ها خارج شدند به طوری که حجم خاک داخل ظرف به صورت دست‌نخورده باقی بماند. نمونه‌ها در مایکروبو و در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده و سپس وزن شدند، این آزمایش در سه تکرار انجام گرفت، برای اندازه‌گیری چگالی خاک با در نظر گرفتن حجم ظرف مورد نظر و وزن خاک خشک‌شده، وزن ظاهری مخصوص خاک با رابطه ۸ محاسبه شد (Mahmudi and Hakimiyan, 2007).

$$\rho = \frac{m(gr)}{V(cm^3)} \quad (\text{رابطه ۸})$$

۴. تعیین ظرفیت زراعی به روش غرقابی: به‌رغم اینکه ظرفیت زراعی در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد اما همچنانکه قبلاً ذکر شد باید آزمایش مزرعه‌ای نیز صورت گیرد. برای به‌دست‌آوردن ظرفیت زراعی در مزرعه قطعه زمینی به مساحت ۲ مترمربع به شکل حوضچه در آورده و تا عمق ۳۰ سانتی‌متری پر از آب شد (شکل ۳). سپس روی آن با پلاستیک پوشانده شد. پس از ۲۴ ساعت و فروکش کردن آب، اولین نمونه‌گیری از محل مورد نظر صورت گرفت، نمونه برای تعیین رطوبت در پلاستیک در بسته قرار داده و در آزمایشگاه مقدار رطوبت وزنی اندازه‌گیری شد. در فواصل زمانی ثابت ۱۲ ساعت نمونه‌برداری ادامه یافت تا سرانجام مقدار رطوبت در دو اندازه‌گیری پشت‌سرهم تقریباً با هم برابر شد. این مقدار رطوبت برابر با رطوبت ظرفیت زراعی بود (Alizadeh, 2008; Miller, 1990).



شکل ۳. آبیاری حوضچه ایجادشده در سطح مزرعه

کشاورزی نسبت به این سیستم‌ها شده است. به‌همین دلیل پس از تحقیقات صورت‌گرفته و با توجه به امکانات موجود یک سنسور ارزان‌قیمت مدل YL-69 برای استفاده در سیستم

مقادیر رس، سیلت، و شن خاک را برحسب گرم در لیتر با استفاده از روابط ۲ تا ۵ اندازه‌گیری می‌کند و با استفاده از مثلث بافت خاک، بافت مزرعه سنجیده می‌شود (Bouyoucos, 1964).

(رابطه ۲) سیلت+رس) = قرائت اولیه (۴۰ ثانیه)

(رابطه ۳) سیلت+رس) - وزن اولیه خاک = درصد شن

(رابطه ۴) درصد رس = قرائت ثانویه (۴ ساعته)

(رابطه ۵) رس - (سیلت+رس) = درصد سیلت

۲. تعیین ظرفیت زراعی: به‌منظور تعیین ظرفیت زراعی، به مقداری از خاک خشک‌شده با وزن معلوم آب اضافه شد تا به حد اشباع برسد. گل اشباع حاصل، ۲۴ ساعت به حالت خود رها شد تا آب کاملاً جذب دانه‌های خاک شود، سپس ۵۰ گرم از نمونه گل اشباع به داخل ظرف فلزی با وزن معلوم ریخته و در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد در مایکروبو قرار داده شد. پس از ۲۴ ساعت نمونه از مایکروبو بیرون آورده و توزین شد. با استفاده از رابطه ۶ میزان رطوبت اشباع خاک مشخص و به صورت تقریبی  $0.65-0.7$  آن به عنوان ظرفیت زراعی انتخاب می‌شود (Alizadeh 1387). با مشخص شدن ظرفیت زراعی به روش تقریبی با استفاده از رابطه ۷ نقطه پژمردگی دائم نیز تعیین می‌شود (Diallo and Marico, 2013).

$$\theta = \frac{w_w - w_b}{w_b} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$\frac{FC}{PWP} = 1/6 \quad (\text{رابطه ۷})$$

در این رابطه:  $(W_w)$  وزن تر نمونه و  $(W_b)$  وزن خشک نمونه است.

۳. تعیین وزن مخصوص ظاهری خاک: گاهی برای طراحی سیستم‌های آبیاری از رطوبت حجمی استفاده می‌کنند به‌همین



شکل ۲. قراردادن ظرف‌های فلزی در خاک برای نمونه‌برداری

با توجه به اینکه برای پایش رطوبت خاک در سیستم‌های آبیاری هوشمند از سنسور رطوبت‌سنج استفاده می‌شود، افزایش هزینه این سنسورها باعث کاهش استقبال متصدیان بخش

شرایط کاملاً کنترل شده و برای ۱۱ سطح رطوبت گوناگون خاک صورت گرفت (شکل ۵).

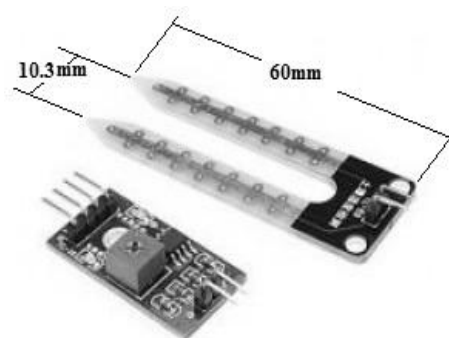
۷. اندازه‌گیری دقت سنسور در اندازه‌گیری حداکثر و حداقل رطوبت مطلوب خاک برای رشد گیاه: پس از کالیبراسیون سنسور مورد نظر و با اندازه‌گیری خصوصیات خاک و مشخص شدن محدوده رطوبتی خاک که گیاه در آن بهترین رشد را دارد، در راستای دقت سنسور در اندازه‌گیری حداقل و حداکثر رطوبت، آزمایشی در ۵ سطح رطوبتی صورت گرفت. برای این کار نمونه خاک در مایکروبیو (دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد) خشک شد. حال با استفاده از رابطه ۲ و در دسترس بودن وزن خشک خاک میزان آبی که باید به آن برای ۵ سطح رطوبتی (۲۱، ۱۸، ۱۵، ۱۲، و ۹ درصد) اضافه شود، محاسبه شد. برای اینکه رطوبت دقیق حاصل شود نمونه خاک‌های خشک در یک سینی پهن و روی ترازو قرار داده شد و وزن آن صفر شد، سپس با استفاده از آبپاش میزان آبی که باید برای سطح رطوبتی اضافه شود به نمونه خاک پاشیده شد (شکل ۶)، به محض رسیدن آب به وزن مورد نظر عمل آبپاشی متوقف و نمونه‌ها بعد از زیرروشدن در ظرف‌های پلاستیکی قرار داده و رطوبت آن با سنسور رطوبت‌سنج مدل YL-69 اندازه‌گیری شد (شکل ۷).

هوشمند تهیه شد، این سنسور دارای خروجی آنالوگ (حداکثر ۵ ولت در محیط خشک) و دیجیتال (صفر یا یک) با ولتاژ عملیاتی ۳/۳ تا ۵ ولت است، به گونه‌ای که با قراردادن سنسور در اطراف ریشه گیاه در عمق مورد نظر، اندازه‌گیری رطوبت خاک وجود داشته باشد. این سنسور دو پایه با فاصله ۱/۳ سانتی‌متر از هم و یک برد آردینو کوچک با ۴ پایه در خروجی (AO, DO, VCC, GND) و دو پایه در ورودی (اتصال به ماژول قرار گرفته در خاک) دارد (شکل ۴). برای بررسی نحوه عملکرد سنسور، آزمایش کالیبراسیون و ارزیابی دقت آن صورت گرفت.

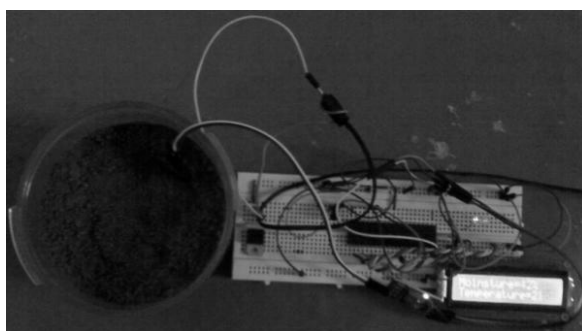
۶. کالیبراسیون سنسور YL-69 با رطوبت‌سنج WET-2: به منظور کالیبراسیون صحیح سیستم رطوبت‌سنج YL-69 یک سری آزمایش اندازه‌گیری برای ارزیابی و به دست آوردن دقت سنسور در شرایط واقعی در دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه اجرا شد. برای اینکار آزمون مقایسه‌ای بین سیستم طراحی شده با رطوبت‌سنج WET-2 انجام شد. برای بررسی نحوه به کارگیری سنسور و رفع اشکالات ابتدایی (از قبیل تأثیر قرارگیری دو سنسور در کنار هم و سنجش زمان پاسخ برای داده برداری)، ابتدا اندازه‌گیری‌هایی در یک سری گلدان انجام شد. پس از یادگیری نحوه استفاده و اندازه‌گیری از سنسور، کالیبراسیون رطوبت‌سنج YL-69 در مقایسه با رطوبت‌سنج WET-2 در



شکل ۵. نحوه قرارگیری دو سنسور در داخل خاک



شکل ۴. سنسور رطوبت‌سنج مدل YL-69 و برد آردینو



شکل ۷. اندازه‌گیری رطوبت توسط سنسور YL-69



شکل ۶. عمل آبپاشی برای تهیه سطوح رطوبتی گوناگون

## نتایج و بحث

غلظت سوسپانسیون خاک که در زمان‌های ۴۰ ثانیه و ۴ ساعته توسط هیدرومتر قرائت شد به ترتیب برابر ۷۹ و ۲۹ گرم در لیتر بود که با استفاده از این دو مقدار میزان رس ۲۹ درصد، شن ۲۱ درصد، و سیلت ۵۰ درصد برآورد شد، با محاسبه این درصدها و با استفاده از مثلث تعیین بافت خاک نوع خاک لومی رسی-لوم گزارش شد.

با استفاده از رابطه ۵ و اندازه‌گیری وزن تر و خشک گل اشباع که به ترتیب ۷۱/۶۳ و ۵۵/۲۷ گرم بود، رطوبت اشباع ۳۰ درصد محاسبه شد و با توجه به اینکه ۰/۷ رطوبت اشباع محدوده ظرفیت زراعی است، بنابراین ظرفیت زراعی خاک ۲۱ درصد و نقطه پژمردگی دائم ۱۳ درصد در روش آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری چگالی خاک سه نمونه گرفته و با میانگین‌گیری از آنها چگالی خاک ۱/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب برآورد شد (جدول ۳). با مشخص شدن وزن مخصوص ظاهری خاک و با ضرب آن در داده‌های به دست آمده، مقدار رطوبت حجمی ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم به ترتیب برابر است با ۲۷/۷۲ درصد و ۱۶/۹ درصد که این حدود به دست آمده در شکل ۱ نیز نشان داده شده است که با مشخص شدن بافت خاک و اندازه‌گیری وزن مخصوص ظاهری

خاک نتایج به دست آمده با آنچه در شکل نشان داده شده است همخوانی دارد.

جدول ۳. وزن نمونه‌های خشک شده به همراه چگالی هر نمونه موجود در داخل ظرف‌های فلزی

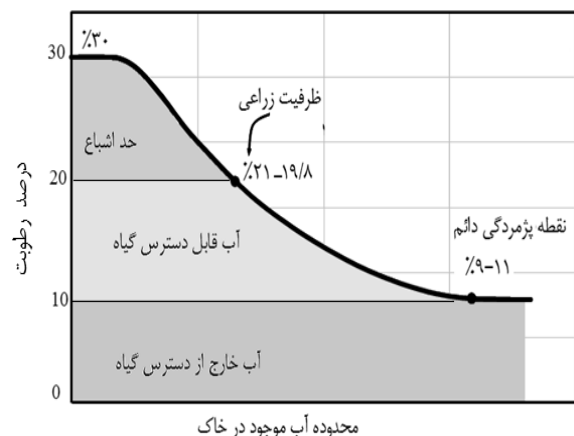
نمونه	وزن نمونه (گرم)	حجم نمونه (سانتی‌متر مکعب)	چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۱	۱۳۶/۵	۱۰۰	۱/۳۶۵
۲	۱۲۲/۷	۱۰۰	۱/۲۲۷
۳	۱۳۶/۹	۱۰۰	۱/۳۶۹

با اندازه‌گیری رطوبت نمونه خاک‌های دریافتی از حوضچه تعیین ظرفیت زراعی به روش غرقایی، داده‌های دریافتی ثبت و در جدول ۴ مقدار این داده‌های اندازه‌گیری شده برای ۶ نمونه در مدت زمان ۸۴ ساعت نشان داده شده است. همانطور که قابل انتظار بود، رطوبت دو نمونه پشت سرهم پس از چند نمونه‌گیری با هم برابر شدند. با برابری سطح رطوبت دو نمونه پشت سرهم این مقدار به عنوان ظرفیت زراعی مزرعه‌ای گزارش شد که ۱۹/۸ درصد است و با استفاده از رابطه ۶ نقطه پژمردگی دائم ۱۲ درصد محاسبه شد. در شکل ۸ حدود رطوبتی برای خاکی با بافت لومی رسی-لوم نشان داده شده است.

جدول ۴. رطوبت نمونه‌های نمونه‌برداری شده از حوضچه مورد نظر در سطح مزرعه

نمونه	زمان (ساعت)	وزن ظرف + خاک مرطوب (گرم)	وزن ظرف + خاک خشک (گرم)	رطوبت (درصد)
۱	۲۴	۳۲۵/۱	۲۶۳/۴	۲۳/۴
۲	۳۶	۳۲۵/۶	۲۶۶/۹	۲۲
۳	۴۸	۳۲۶/۵	۲۷۱/۷	۲۰/۲
۴	۶۰	۳۲۲/۱	۲۶۸/۷	۱۹/۸
۵	۷۲	۳۲۰/۶	۲۶۷/۵	۱۹/۸

داده‌های دریافتی از سنسور YL-69 و WET-2 در رطوبت‌های گوناگون در شکل ۹ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که یک رابطه درجه دوم همپوشانی مناسب با داده‌های دریافتی دارد که دارای همبستگی ۹۹/۴ درصد بین داده‌های دو سنسور است. بنابراین، این رابطه در برنامه‌ریزی نهایی سنسور و اندازه‌گیری رطوبت خاک و ارزیابی آن استفاده شد. اندازه‌گیری‌های انجام گرفته توسط سنسور YL-69 در ۵ سطح رطوبتی مشخص، در جدول ۵ نشان داده شده است. با استفاده از این داده‌ها مشخص شد که دقت سنسور در اندازه‌گیری رطوبت خاک همبستگی ۹۸ درصد با سطوح رطوبتی دارد و از آن می‌توان در طراحی سیستم هوشمند برای پایش رطوبت خاک استفاده کرد.

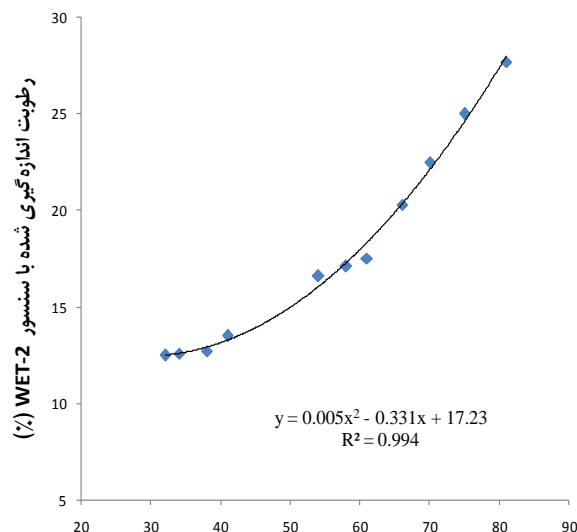


شکل ۸. محدوده ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی در خاک لومی رسی-لومی

شد، به طوری که سنسور رطوبت سنج همیشه و به طور مداوم رطوبت خاک را در بین این محدوده (آب قابل استفاده گیاه) نگاه داشت.

### نتیجه گیری

در طراحی سیستم آبیاری قطره‌ای هوشمند، تعیین زمان و مدت آبیاری برای دراختیار قراردادن آب لازم گیاه اهمیت دارد. به طور کلی قدم اصلی در تعیین این زمان، دانستن حداکثر و حداقل رطوبت مطلوب برای رشد گیاه است که برای به دست آوردن این مقادیر باید خصوصیات خاک مشخص شود. در این تحقیق، پارامترهای تأثیرگذار خاک برای برنامه ریزی در مرکز کنترل سیستم هوشمند آبیاری قطره‌ای اندازه گیری شد. با اندازه گیری بافت خاک به روش هیدرومتری، بافت خاک لومی رسی-لوم گزارش شد، سپس برای تعیین حدود رطوبتی خاک که گیاه در آن بهترین رشد را داشته باشد، آزمایش تعیین ظرفیت زراعی به روش آزمایشگاهی و مزرعه‌ای صورت گرفت که در روش آزمایشگاهی ۲۱ درصد و در آزمایش مزرعه‌ای ۱۹/۸ درصد گزارش شد، از طریق روابط نقطه پژمردگی دائم برای دو روش به ترتیب ۱۳ و ۱۲ درصد محاسبه شد. با استفاده از این داده‌ها، مقدار رطوبتی که در آن باید عمل شروع و پایان آبیاری توسط سیستم هوشمند آبیاری انجام شود، مشخص و از آن در برنامه ریزی مرکز کنترل استفاده شد. با توجه به استفاده از سنسور رطوبت سنج برای پایش رطوبت خاک در سیستم هوشمند آبیاری، کالیبراسیون یک سنسور ارزان قیمت مدل YL-69 با سنسور گران قیمت مدل WET-2 صورت گرفت که همبستگی بین داده‌های ثبت شده ۰/۹۹۴ گزارش شد. ارزیابی دقت سنسور در محدوده رطوبتی مطلوب رشد گیاه ۰/۹۸ نشان داده که حاکی از این است که این سنسور قابلیت کنترل رطوبت مطلوب رشد گیاه را دارد.



رطوبت اندازه گیری شده با سنسور YL-69 (%)

شکل ۹. همبستگی بین داده‌های دریافتی از دو سنسور YL-69 و سنسور WET-2

جدول ۵. داده‌های اندازه گیری شده از ارزیابی دقت سنسور در محدوده‌های رطوبتی مورد نظر

نمونه ها	وزن خاک خشک (گرم)	آب اضافه شده (گرم)	رطوبت واقعی (درصد)	وزن تر خاک (گرم)	اندازه گیری شده (درصد)	رطوبت
۱	۳۵۰	۷۳/۵	۲۱	۴۲۳/۵	۲۲	
۲	۳۵۰	۶۳	۱۸	۴۱۳	۱۸	
۳	۳۵۰	۶۲/۵	۱۵	۴۱۲/۵	۱۵	
۴	۳۵۰	۴۲	۱۲	۳۹۲	۱۲	
۵	۳۵۰	۳۱/۵	۹	۳۸۱/۵	۱۰	

ارزیابی دقت سنسور در رطوبت بهینه رشد گیاه نشان داد که می‌توان از سنسور رطوبت سنج مدل YL-69 در سیستم‌های هوشمند استفاده کرد. بعد از کالیبراسیون و ارزیابی سنسور، از دو حد رطوبتی ۲۱ و ۱۲ درصد اندازه گیری شده در برنامه ریزی سیستم هوشمند برای دراختیار قراردادن آب لازم گیاه استفاده

### REFERENCES

- Afyuni, M., Cassel D.K. & Robarge W.P. (1993) Effects of landscape position on soil water and corn silage yield. Soil science society american journal (Vol. 57). (pp.1573-1580).
- Alizadeh, A. (2008) Water, soil, plant. Astane ghodse razavi, 8<sup>th</sup> edition. (In Farsi)
- Arba G., Puig-Bargués J., Duran-Ros M., Barragán J. & Ramirez F. (2013) Drip-irriwater: computer software to simulate soil wetting patterns under surface drip irrigation. Computers and electronics in agriculture (Vol. 93). (pp. 183-192)
- Bouyoucos, G.J. (1964) Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. American society of agronomy (Vol. 54). (pp. 464-465)
- Cheema, I., Chow, A. & Hansson, D. (2011) Soil Infiltration. Lund institute of technology, Lund University.
- Coolong, T. (2013) Using irrigation to manage weeds : a focus on drip irrigation. Weed and pest control-conventional and new challenges- Chapter 7.
- Diallo D. & Marico A. (2013) Field capacity (FC) and permanent wilted point (PWP) of clay soils developed on quaternary alluvium in niger river loop (Mali). International journal of engineering research and applications. 3(1), 1085-1089.



- Dursun M. and Ozden S., 2011. A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors, *Scientific Research and Essays*, Vol. 6(7), pp. 1573-1582.
- Mahmodi, Sh. & Hakimiyan, M. (2007) *Pedology principle*. University of Tehran press. 8<sup>th</sup> edition. (In Farsi)
- Miller, R.W. (1990) *An introduction to soils and plant growth*. Prentice hall international editions.
- Phogat V., Skewes M.A., Mahadevan M. & Cox J.W. (2013) Evaluation of soil plant system response to pulsed drip irrigation of an almond tree under sustained stress conditions. *Agricultural water management* (Vol. 118) (pp. 1– 11).
- Ramah, K., Santhi P. & Thiyagarajan G. (2011) Moisture distribution pattern in drip irrigated maize based cropping system. *Madras agricultural journal*. 98(1/3), 51-55.
- Revol, P.H., Clothier BE., Vachaud G. & Thony J.L. (1991) Predicting the field characteristics of trickle irrigation. *Soil technology* , 4(2), 125-134.
- Riquelme A.J.L., Soto F., Suardíaz J., Sánchez P., Iborra A. and Vera J.A., (2009), *Wireless Sensor Networks for precision horticulture in Southern Spain*, *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(1), 25–35.
- Soltani, A. & Faraji, A. (2010) *Water, soil, plant*. Jahad daneshgahi Mashhad, second edition. (In Farsi)
- Theophilo B. and Marta V. (2010), A variation of the Field Capacity (FC) definition and a FC database for Brazilian soils, *World Congress of Soil Science*, VOL:1-4.
- Veihmeyer F.J. & Hendrickson A.H. (1949) Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentages of soils. *Soil science*, 68(1), 75-94.
- Zotarelli L., Dukes, M.D., Kelly and Morgan T.K. (2009) Interpretation of soil moisture content to determine soil field capacity and avoid over-irrigating sandy soils using soil moisture sensors. *Institute of food and agricultural sciences*, University of Florida. AE460.