

توسعه یک سیستم داده برداری رایانه ای برای لایسیمترهای وزنی

یاسین اسروش

دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه بوعلی سینا، ossroosh@yahoo.com

علی سبزی پرور

دانشیار گروه آب، دانشگاه بوعلی سینا، sabziparvar@yahoo.co.uk

عقیل یاری

کارشناس ارشد پژوهشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، aghilyari@yahoo.com

عبدالمجید لیاقت

دانشیار گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، aliaghat@ut.ac.ir

چکیده

امروزه از لایسیمترها جهت انجام تحقیقات بر روی میزان تبخیر و تعرق گیاهان، فرسایش، نفوذ و نگهداری آب، بهینه سازی عمق آب برای گیاهان مختلف و بررسی های کیفی آب استفاده های فراوانی می شود. در پژوهش حاضر، به منظور داده برداری از لایسیمترهای وزنی، یک سیستم رایانه ای طراحی و ساخته شده است. برد الکترونیکی دستگاه با نام ایندیکاتور شامل یک مبدل آنالوگ به دیجیتال 24 بیت، یک میکروکنترلر و یک سنسور دماسنج می باشد. نرم افزار دستگاه امکان برنامه ریزی فواصل زمانی داده برداری از لایسیمتر و ذخیره آنها در رایانه را فراهم می نماید. برای بهبود پردازش داده های لایسیمتری تمهیدات مختلفی به صورت نرم افزاری و سخت افزاری پیش بینی گردید. روش های بکار رفته برای به حداقل رساندن تاثیر دریافت، تغییرات تصادفی و یا با فرکانس مشخص در اندازه گیری های دستگاه، شامل طراحی ریشیومتریک، میانگین گیری متحرک-غلطان، تبدیل فوریه گسسته، اصلاح نیروی ثقل و کالیبراسیون ویژه دما و وزن می باشند.

کلید واژه ها: لایسیمتر، لودسل، مبدل آنالوگ به دیجیتال، کالیبراسیون، نرم افزار

مقدمه

لایسیمترها جعبه های کشت بزرگی هستند که با خاک پر شده و در مزرعه، زیر سطح زمین قرار می گیرند تا نماینده مزرعه باشند و در آن وضعیت، آب، خاک و گیاه به آسانی و بسیار دقیق تر از محیط طبیعی خاک تنظیم و

بررسی می‌گردد. امروزه از لایسیمترها جهت انجام تحقیقات بر روی میزان تبخیر و تعرق گیاهان، درختان، فرسایش، نفوذ و نگهداری آب، بهینه سازی عمق آب برای گیاهان مختلف و بررسی‌های کیفی آب استفاده‌های فراوانی می‌شود (میگلیاسو و همکاران، 2006). تخمین تبخیر و تعرق (یا تبخیر در مورد خاک بدون پوشش گیاهی) از طریق اندازه‌گیری و موازنه اجزای دیگر بودجه آبی لایسیمتر مانند بارندگی، آب زهکشی و تغییر در ذخیره رطوبتی خاک انجام می‌شود. لایسیمترها داده‌های مبنا جهت بررسی اعتبار سایر روش‌های برآورد تبخیر و تعرق را نیز فراهم می‌کنند (فرداد، 1375).

جعبه‌های کشت یا لایسیمتر از زمان‌های قدیم به اشکال ساده و ابتدایی مورد استفاده قرار می‌گرفته است و امروزه با پیشرفت تکنولوژی انواع مدرن لایسیمتر ساخته شده که بیشتر در تحقیقات پایه‌ای کاربرد دارد. سابقه استفاده از لایسیمتر برای تعیین نیاز آبی گیاهان، به بیش از 300 سال پیش بر می‌گردد. لیکن، از 50 سال پیش امکان استفاده از لایسیمترهای دقیق برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق فراهم شده است. فناوری‌های جدید کمک کرده تا طراحی و ساخت لایسیمترها متناسب با نیازهای تحقیقاتی صورت گیرد (میگلیاسو و همکاران، 2006 و کوروی و لی‌مرت، 1994). مروری بر تاریخ لایسیمترها نشان می‌دهد که اولین لایسیمتر توسط دلاهر در سال 1688 در پاریس مورد استفاده واقع شد. اولین لایسیمتر وزنی به وسیله سل هورست در سال 1906 در آلمان طراحی و نصب گردید و اولین لایسیمتر وزنی با خاک دست نخورده بوسیله ویو و کریست در ایالات متحده در سال 1923 ساخته شد. اولین لایسیمتر با خاک دست نخورده و با ثبت خودکار در کوشو کتون اوهایو در سال 1936 نصب شد. از آن زمان به بعد طراحی لایسیمتر وزنی و نوع مکانیزم وزن کردن با توجه به اهداف مورد نظر متفاوت بوده است. لایسیمتر وزنی یک نوع کاملاً اتوماتیک لایسیمتر است که به منظور پایش تغییرات وزن در سیستم‌های رویش گیاهی طراحی شده است و همانطور که اشاره شد، به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا به اطلاعاتی از قبیل تبخیر و تعرق و نحوه جابجایی مواد مغذی خاک دسترسی یابند (هاول و همکاران، 1983، فن و همکاران، 1989 و 1991 و ایاز و همکاران، 1996).

در پژوهش حاضر، یک سیستم رایانه‌ای با هدف داده‌برداری از لایسیمترهای وزنی، همچنین پایش و فیلتراسیون داده‌های بدست آمده به صورت به‌هنگام طراحی و ساخته شده است. شایان ذکر است پیش از این طراحی و نصب لایسیمتر وزنی در ایران انجام شده است (بارانی و خانجانی، 2002) ولی طراحی و ساخت تجهیزات الکترونیکی و نرم‌افزار پایش لایسیمترهای وزنی برای نخستین بار است که در کشور صورت می‌گیرد. این سیستم در قالب اختراع با شماره 47221، در دفتر ثبت اختراعات اداره مالکیت صنعتی ایران به ثبت قانونی رسیده است.

مواد و روشها

شرح مدارات الکترونیکی

برد الکترونیکی دستگاه با نام ایندیکاتور شامل یک مبدل آنالوگ به دیجیتال دلتا-سیگما با قدرت تفکیک 24 بیت و یک میکروکنترلر با معماری ریسک¹ می‌باشد. واحد میکروکنترلر تابع اصلی سنسجش وزن را اجرا کرده و داده‌های بدست آمده از مبدل آنالوگ به دیجیتال را برای تجزیه و تحلیل بیشتر به یک رایانه شخصی ارسال می‌کند. داده‌های بدست آمده به صورت به‌هنگام بر روی رایانه و با استفاده از یک نرم‌افزار اختصاصی (رابط کاربر گرافیکی) قابل مشاهده هستند. میکروکنترلر دستگاه، بدلیل قیمت ارزان، سرعت بالای پروسور، توان مصرفی پایین، توسعه نرم‌افزاری سریع و سادگی ترکیب با مدارات جانبی مورد نظر انتخاب شد. مبدل آنالوگ به دیجیتال، سیگنال‌های ضعیف را مستقیماً از لودسل‌ها پذیرفته و یک کلمه دیجیتالی سریال را نتیجه می‌دهد. رابط سریال قطعه با میکروکنترلرها و پردازشگرهای دیجیتال سازگار است. این مبدل قابلیت انواع روش‌های کالیبراسیون را داراست و از ثبات دمایی بی‌نظیری برخوردار می‌-

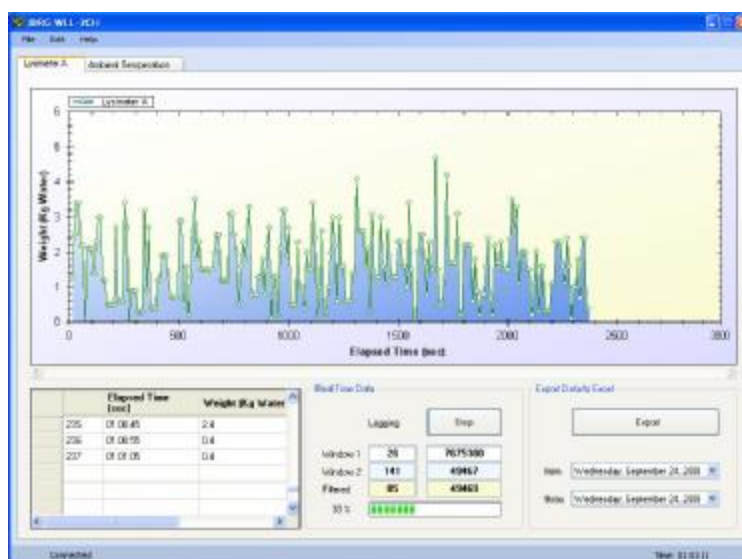
1 -Risc

باشد. در طرح حاضر، مبدل آنالوگ به دیجیتال، بوسیله میکروکنترلر برای عملیات تبدیل و قرائت پیوسته برنامه‌ریزی شده است.

لودسل‌ها

قلب سیستم توزین یک سری سنسورهای لودسل است که با آرایشی مشخص در زیر ظرف لایسیمتر کار گذاشته می‌شوند و سیگنال خروجی آنها با همدیگر موازی می‌شود. انواع مختلفی از سنسورها وجود دارند که بر پایه آرایش پل وتسون¹ بنا شده‌اند. گیج‌های کششی² در زمره چنین سنسورهایی قرار می‌گیرند. چنانچه یک ماده کشیده شود، تغییری متناظر در مقاومت آن بوجود می‌آید. در بسیاری موارد، هر چهار طرف پل وتسون ممکن است با کم یا زیاد کردن مقاومت به کشش اعمال شده واکنش نشان دهد. لودسل یک وسیله الکترونیکی است که تغییر شکل یک تکه از فلز را بوسیله یک گیج کششی اندازه‌گیری می‌کند (یعنی تغییرات مقاومت هنگامیکه کشیده شد). پارامترهای مهم بسیاری در ارتباط با لودسل وجود دارند که از جمله آنها امپدانس ورودی و خروجی است. بعلاوه، تغییر در خروجی لودسل در برابر هر ولت تهیج، در برابر دما بدون بار و در برابر دما در شرایط بار کامل حیاتی است. لودسل‌ها یک حد اطمینان برای اضافه بار دارند و ماکزیمم بارگذاری بر روی آنها محدود است. اگر وزن بار از این مقدار تجاوز کند ممکن است لودسل به صورت دائمی خراب شود. بعلاوه، لودسل‌ها ممکن است خطای خطی بودن و مشخصه هیسترسیس، تکرار پذیری و خزش³ داشته باشند (هورن و گلیسون، 2006).

لودسل‌ها از لحاظ شکل، اندازه، ظرفیت و هزینه بسیار متنوع می‌باشند. برای کاربردهای لایسیمتری، تمرکز بر روی زیر مجموعه‌ای از لودسل‌ها است که کاملاً فعال (چهار سمت پل وتسون دارای گیج کششی است) بوده و دارای مکانیزم خنثی‌سازی اثر تغییر دما هستند. در طراحی حاضر، یک مجموعه از چهار لودسل از نوع حلقوی فشاری⁴ استفاده شده است.



شکل (1): صفة اصلی رابط کاربر گرافیکی (نرم‌افزار) سیستم

- 1 - Wheatstone bridge
- 2 - Strain gauge
- 3 - Creep
- 4 - Compression ring

نرم افزار (رابط کاربر گرافیکی)

نرم‌افزار دستگاه (شکل 1)، امکان برنامه‌ریزی فواصل زمانی داده‌برداری از لایسیمتر و ذخیره داده‌های برداشت شده در رایانه را فراهم می‌نماید. داده‌ها با تفکیک¹ قابل تنظیم و بر حسب میلی‌متر آب (داده‌های وزن لایسیمتر تقسیم بر مساحت آن) ثبت می‌شوند. در بخش تنظیمات و برنامه‌ریزی نرم‌افزار امکان تعیین فواصل داده‌برداری وجود دارد. فاصله بین داده‌برداری‌ها از 10 ثانیه تا 24 ساعت قابل برنامه‌ریزی می‌باشد. فرکانس نمونه‌برداری با فرکانس داده‌برداری متفاوت بوده و به صورت سفت‌افزاری²، 14 هرتز (چهارده قرائت در ثانیه) تعیین شده است. از دیگر قابلیت‌های نرم‌افزار حاضر امکان ارسال داده‌های برداشت شده به نرم‌افزار مایکروسافت اکسل جهت تجزیه و تحلیل بیشتر است.

نتایج و بحث

متاسفانه، علیرغم قدرت تفکیک بسیار بالای دستگاه ساخته شده، فاکتورهای بسیاری دقت نهایی داده‌های تبخیر و تعرق بدست آمده از لایسیمتر را محدود می‌کنند (راپ و همکاران، 2006a و 2006b). برای مثال، لودسل‌ها، خصوصاً آنهایی که در محدوده 10 کیلوگرم یا کمتر (در مورد میکرو- لایسیمتر) کار می‌کنند، مستعد تبدیل شدن به لرزه‌نگارهای عالی هستند. حتی جریان‌های هوا باعث خواهد شد تا خروجی لودسل تغییرات معنی‌داری داشته باشد. تاثیرات دیگر شامل آنهایی هستند که بوسیله باد (نوسان لایسیمتر)، افزایش مقطعی وزن (بعلت عبور حیوانات و غیره) یا تغییرات دما (تاثیر بر روی لودسل‌ها و دستگاه‌های الکترونیکی) ایجاد می‌شوند. در این میان، تغییرات دما بیش از سایر عوامل بر دقت داده‌های لایسیمتری تاثیرگذار است. خوشبختانه بسیاری از این تاثیرات با بکارگیری شیوه‌های مناسب قابل حذف یا تخفیف هستند. موسسه کنترل و اندازه‌گیری انگلیس (2000) عوامل تاثیرگذار بر دقت سیستم‌های توزین را بررسی و راه‌کارهای مختلفی جهت غلبه بر آنها ارائه نموده است. در این تحقیق، به منظور بهبود فرایند پردازش داده‌های لایسیمتری، حذف داده‌های غیرصحیح و به حداقل رساندن تاثیر تغییرات تصادفی در اندازه‌گیری‌های دستگاه تمهیدات مختلفی به صورت نرم‌افزاری و سخت‌افزاری پیش‌بینی گردیده است که در ذیل می‌آیند.

طراحی ریشیومتری³

در یک طراحی اصولی، طول کابل سیگنال و تهییج لودسل‌ها نباید از حد مشخصی بیشتر گردد. چراکه دقت سیگنال خروجی لودسل بوسیله ولتاژ تهییج⁴ پل و تسون متناظر تعیین می‌شود. خروجی پل مستقیماً متناسب است با ولتاژ تهییج، بنابراین هرگونه انحراف⁵ در ولتاژ تهییج یک انحراف متناظر در ولتاژ خروجی ایجاد می‌کند. این انحراف معمولاً به دلیل افت ولتاژ ناشی از مقاومت سیم ایجاد می‌شود که به دلیل وابستگی به دمای محیط پیرامون متغیر است. برای تخفیف این اثر در صورت طولانی شدن کابل و به منظور بهترین عملکرد، تکنیک اندازه‌گیری ریشیومتری (منبع مرجع ولتاژ یکسان برای تهییج پل و مرجع مبدل آنالوگ به دیجیتال) (روچا و همکاران، 2000) در طراحی مرجع مدار به کار برده شده است. از طریق بکار بردن ولتاژ یکسان برای تهییج پل و مرجع مبدل آنالوگ به دیجیتال، چنانچه ولتاژ حقیقی تهییج پل تغییر کند، کاهش کمی در دقت اندازه‌گیری خواهیم داشت. این اتصال ریشیومتری همچنین تاثیر انحراف‌ها و نویزهای با فرکانس پایین در منبع تهییج را حذف کرده و بعلاوه، اجازه می‌دهد تا طول کابل بین لودسل‌ها و دستگاه طولانی‌تر انتخاب شود.

- 1 - Resolution
- 2 - Firmware
- 3 - Ratiometric design
- 4 - Excitation voltage
- 5 - Drift



شکل (2): صفحه تنظیمات نرم‌افزار

میانگین‌گیری متحرک - غلتان¹

در این روش (اسلاتری و نی، 2005)، به منظور کاهش بعضی از تاثیرات خارجی ذکر شده (مثلاً تغییر وزن مقطعی ناشی از باد یا عبور حیوانات)، از تعدادی داده متوالی، به روش متحرک - غلتان T دقیقه‌ای (قابل تنظیم) میانگین‌گیری می‌شود. این فیلتر نرم‌افزاری، به صورت به‌هنگام² از داده‌های ورودی میانگین گرفته و داده‌های خروجی را تولید می‌کند. ورودی فیلتر مستقیماً از ایندیکاتور - که نتیجه قرائت سیگنال لودسل‌ها را به رایانه ارسال می‌کند - برداشته می‌شود. با انجام عملیات بر روی جدیدترین M مجموعه داده، N داده که بزرگتر یا کوچکتر از آستانه تعیین شده باشند از پنجره داده‌ها حذف خواهند شد. همانگونه که در معادله 1 آمده است، M-N داده باقیمانده میانگین‌گیری می‌شوند:

$$y[i] = \frac{1}{M-N} \sum_{j=0}^{M-(N+1)} x[i+j] \quad (1)$$

در معادله (1)، y: نتیجه میانگین‌گیری M-N داده می‌باشد.

تبدیل فوریه گسسته³

در برخی موارد جهت بالابردن دقت داده‌برداری از لایسیمترهای وزنی، تکنیک فیلتراسیون با رویکرد فرکانسی ابزار مناسبی بشمار می‌رود. این روش در اصل جهت حذف یا ابقای تغییرات از سری زمانی (به عبارت دیگر، داده‌های تغییرات وزن لایسیمتر که در یک دوره زمانی جمع‌آوری شده‌اند) در باندهای فرکانسی خاص بکار برده می‌شود. البته، مشروط به وجود اطلاعات کافی درباره منابع فاکتورهای دخیل، دستکاری و پالایش داده‌ها (توسط نرم‌افزار) به صورت به-هنگام نیز می‌تواند درستی داده‌های برداشت شده را بهبود بخشد.

طبق بررسی واگان و همکاران (2007)، ارتعاش مکانیکی در سیستم توزین، ناشی از وزش باد یک فاکتور عمده محدود کننده دقت در تعیین تبخیر و تعرق با استفاده از لایسیمترهای وزنی می‌باشد. آنها اظهار می‌دارند بهره‌گیری از

1 - Rolling-moving average

2 - Real-time

3 - Discrete Fourier Transform (DFT)

الگوریتم تبدیل فوریه گسسته نسبت به میانگین‌گیری متحرک ابزار مناسب‌تری برای حذف این تاثیر می باشد. در نرم-افزار سیستم حاضر، الگوریتمی متکی به فیلتر پایین‌گذر سینک¹ تعبیه شده است که به صورت به‌هنگام فرکانس‌های بالاتر از یک فرکانس قطع (قابل برنامه‌ریزی) را از داده‌ها حذف می‌کند (شکل 2).

اصلاح نیروی ثقل

به منظور بالابردن درجه دقت، نیروی ثقل برای دو فاکتور موثر یعنی عرض جغرافیایی و هوای آزاد باید تصحیح گردد. نیروی ثقل در مدار استوا حداقل است، چراکه سطح زمین در این ناحیه دورترین فاصله را از مرکز ثقل خود دارد. همچنین مولفه عمودی نیروی گرینز از مرکز به دلیل چرخش زمین به دور خود ماکزیمم می‌باشد. نیروی ثقل در قطب‌های زمین حداکثر می‌باشد چراکه آنها کمترین فاصله را از مرکز ثقل زمین داشته و مولفه عمودی نیروی گرینز از مرکز صفر است. اصلاح نیروی ثقل برای عرض جغرافیایی معمولاً با استفاده از فرمول بین‌المللی گرانش² (معادله 2) انجام می‌شود:

$$g = 9.7803267714 \left(\frac{1 + 0.00193185138639 \sin^2 I}{\sqrt{1 - 0.00669437999013 \sin^2 I}} \right) \quad (2)$$

در معادله (2)، g : گرانش تئوریک (متر بر مجذور ثانیه) و I : عرض جغرافیایی بر حسب درجه است. اصلاح هوای آزاد، در واقع به حساب آوردن تغییرات نیروی گرانش با فاصله گرفتن از مرکز کره زمین می‌باشد که بدلیل نیاز به فرضیات مختلف در اینجا از آن صرف‌نظر شده است.

تنظیم خودکار برای تغییرات دما

تغییرات دمای محیط می‌تواند به شکل معنی‌داری دقت داده‌های وزن قرائت شده را تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین، نصب کلیه ادوات اندازه‌گیری در زیر سطح زمین، در اتاقک دسترسی لایسیمتر یا اتاقکی که برای این منظور در مجاورت لایسیمتر در زیر سطح زمین ساخته می‌شود (آنولد، 2006) روش رایج برای کاهش شدت این تاثیر می‌باشد. ایزوله کردن بخش‌های الکترونیکی سیستم شامل بدنه لودسل‌ها، کابل سیگنال و تهییج لودسل‌ها و دستگاه اندازه‌گیری نیز مکمل این کار بوده و سبب افزایش دقت نهایی خواهند شد. علاوه بر بکارگیری این تمهیدات سخت‌افزاری، مدل کردن تاثیر نوسانات دما بر داده‌های قرائت شده نیز یک راه موثر برای افزایش دقت سیستم می‌باشد. به این منظور، نرم‌افزار سیستم به صورت به‌هنگام دمای پیرامون را اندازه‌گیری نموده و توانایی برنامه‌ریزی برای تنظیم خودکار با تغییرات دما را دارا می‌باشد.

کالیبراسیون نرم‌افزاری سیستم توزین

قرائت دستگاه به صورت اعداد خام بوده و نیاز به کالیبراسیون می‌باشد. در این رابطه یک روش کالیبراسیون خطی بکار برده می‌شود. دستورالعمل کالیبراسیون به اینصورت است که وزن‌های معلوم بر روی لایسیمتر قرار داده شده و سپس تغییرات فشار برآیند ثبت می‌گردند (ویانا و همکاران، 2004). اندازه‌گیری‌ها برای هر دو حالت گذاشتن و برداشتن وزن‌های معلوم انجام می‌شوند. پس از تکرار نتایج برای چندین وزن معلوم، به روش رگرسیون خطی بین داده‌های خام قرائت شده توسط دستگاه و مقادیر مشخص وزن یک رابطه همبستگی بدست می‌آید. ضرایب این معادله وارد

1 - Sinc Filter

2 - World Geodetic System 1984 (WGS84)

دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، 8 الی 10 بهمن 87

توسعه یک سیستم داده‌برداری رایانه‌ای برای لایسیمترهای وزنی

نرم افزار سیستم می‌شوند تا به صورت به‌هنگام بر روی داده‌های برداشت شده اعمال گردند. داده‌هایی که پس از این توسط نرم‌افزار بر روی رایانه ذخیره می‌شوند اصلاح شده و دارای واحد مشخص لیتر یا میلی‌متر آب خواهند بود. چنانچه لایسیمتر مرطوب باشد، تغییر وزن تدریجی لایسیمتر ناشی از تبخیر و تعرق باعث ایجاد خطا در هنگام کالیبراسیون می‌گردد. الگوریتمی با عنوان ردیابی صفر¹ در نرم‌افزار گنجانده شده است که انحراف تدریجی در داده‌های برداشت شده را از وزن‌هایی که به منظور کالیبراسیون گذاشته و برداشته می‌شوند، تفکیک و حذف می‌نماید.

نتیجه‌گیری

متأسفانه، تاکنون روش موثری برای حذف کامل تاثیرات باد بر لایسیمترهای وزنی ارائه نشده است. تاثیر سایر عوامل نظیر دما نیز، هرچند کم، ولی همچنان وجود دارد. بنابراین فواصل بین داده‌برداری باید به گونه‌ای انتخاب شود که نوسان داده‌ها تنها به سبب آبیاری، بارندگی و تبخیر و تعرق از سطح لایسیمتر باشد. راپ و همکاران (2006) حداقل زمان داده‌برداری² را برای حذف تاثیر باد 15 دقیقه پیشنهاد کرده‌اند.



شکل (3): نمایی از ایستگاه لایسیمتر وزنی کرج

در نهایت می‌توان گفت، در صورت تنظیم دقیق نرم‌افزار حاضر، اطلاعاتی که توسط سیستم جمع‌آوری می‌شود، امکان تعیین و ثبت دقیق آب مصرفی و مشاهده تغییر تدریجی نرخ مصرف آب (همچنانکه تنش آبی بوجود می‌آید) توسط گیاه را فراهم می‌کند. دقت سیستم توزین حاضر به اندازه‌ای است که می‌تواند افزایش وزن کمی که برای نمونه می‌تواند به تشکیل شبنم نسبت داده شود را اندازه‌گیری کند. چنانچه دمای سطح به زیر دمای نقطه شبنم برسد، تشکیل شبنم اتفاق می‌افتد. به منظور بررسی اینکه آیا افزایش وزن برآستی نتیجه تشکیل شبنم بوده است، مینیمم دمای مشاهده شده و دمای نقطه شبنم بدست آمده از داده‌های دمای هوا و رطوبت نسبی مقایسه می‌شوند.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران بخاطر تامین هزینه و امکانات این پروژه سپاسگذاری می‌گردد.

1 - Zero-tracking

2 - Time interval

مراجع

- 1- فرداد، ح. 1375. آبیاری عمومی. انتشارات دانشگاه تهران، 620 ص.
- 2- Ayars J.E., Mead R.M., Soppe R., Clark D.A. and Schoneman R.A. 1996. Weighing lysimeters for shallow ground water management studies. (Evapotranspiration and Irrigation scheduling.) Proceedings of the Conference November 3-6, San Antonio, Texas. pp. 825-837.
- 3- Barani, G.A. and Khanjani, M.J. 2002. A large electronic weighing lysimeter system: Design and installation. J. American Water Resources Association, 38 (4), 1053-1060.
- 4- Corwin D.L. and LeMert R.D. 1994. Construction and evaluation of an inexpensive weighing lysimeter for studying contaminant transport. Journal of Contaminant Hydrology, 15: 1077-123.
- 5- Horn J. and Gleason G. 2006. Weigh scale applications for the MCP3551. Microchip Technology Inc., AN1030.
- 6- Howell T.A., McCormick R.L. and Phene C.J. 1983. Design and installation of large weighing lysimeters. Presentation, Paper No. 83-2060, Bozeman, MT, June 26-29.
- 7- Migliaccio K.W., Li Y., Trafford H. and Evans E. 2006. A simple lysimeter for soil water sampling in south Florida. ABE 361, Department of Agricultural and Biological Engineering, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- 8- Phene, C.J., McCormick R.L., Davis K.R., Pierro J. and Meek D.W. 1989. A Lysimeter feedback irrigation controller system for evapotranspiration measurements and real time irrigation scheduling. Transactions of the ASAE 32(2):477-484.
- 9- Phene, C.J., Hoffman G.J., Howell T.A., Clark D.A., Mead R.M., Johnson R.S. and Williams L.E. 1991. Automated lysimeter for irrigation and drainage control. Proceedings, International Symposium on Lysimetry, Evapotranspiration and Environmental Measurements, IR Div/ASCE, Honolulu, HI, 23-25 July, pp. 28-36.
- 10- Rocha J.G., Couto C. and Correia J.H. 2000. Smart load cells: an industrial application. Sensors and Actuators 85: 262-266.
- 11- Rupp H., Seeger J., and Seyfarth M. 2006b. Innovation in lysimeter techniques. 18th World Congress of Soil Science, July 9-15, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- 12- Rupp H., Meissner R., Seeger J., and Seyfarth M. 2006a. Accuracy of soil water balance parameters measured by large weighing lysimeters. 18th World Congress of Soil Science, July 9-15, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- 13- Slattery C. and Nie M. 2005. A reference design for high-performance, low-cost weighs scales. Available online at: http://analog.com/library/analogDialogue/archives/39-12/weigh_scale.pdf
- 14- The Institute of Measurement and Control. 2000. A Guide to the specification and procurement of industrial process weighing systems. ISBN 0 904457 32 X.
- 15- Unold G.V. 2006. Water balancing precision weighable lysimeters. 18th World Congress of Soil Science, July 9-15, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- 16- Vaughan P.J., Trout T.J. and Ayars J.E. 2007. "A processing method for weighing lysimeter data and comparison to micrometeorological ETo predictions" J. Agricultural Water Management, 88: 141-146.
- 17- Vaughan P.J. and Ayars J.E. 2007. Enhancing accuracy of weighing lysimeters by real-time data filtering. International Annual Meetings, November 4-8, New Orleans, Louisiana.
- 18- Viana, T.V. de A., Azevedo, B.M. de, Bomfim, G.V. do, Oliveira, J. J.G., Borges, R.L.M. 2004. Calibration of a weighting lysimeter after two years of use. Revista Civia Agronma, Vol. 35, No. Numero Especial, 284-290.