Archive of SID

مدیریت آب و آبیاری
دوره ۱۰ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۹
صفحه‌های ۷۳-۶۱

طراحی، ساخت و ارزیابی کارایی لایسیمتر وزنی خودکار

واحدبردی شیخ[۱*]، حسن رضایی مقدم[۲]، رویا جعفری[۳]، زهره غلامی[۳]، جواد شیخ[۴]
۱. دانشیار، گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
۲. دانشجوی دکتری، گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
۴. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۰۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۸

چکیده
تبخیر و تعرق به‌عنوان یکی از اجزای مهم چرخه آب نقش بسیار بزرگی در بررسی بیلان آب حوزه‌های آبخیز دارد. تعیین دقیق میزان تبخیر و تعرق جهت مدیریت کارآمد آبیاری، برآورد نیاز آبی گیاه و طراحی سیستم‌های آبیاری ضروری است. هدف از انجام پژوهش حاضر طراحی و ساخت دستگاه لایسیمتر وزنی جهت پایش مستمر تبخیر و تعرق واقعی می‌باشد. لایسیمتر طراحی‌شده در اینپژوهش شامل دو استوانه هم‌مرکز است که استوانه درونی، مخزن اصلی لایسیمتر است و استوانه بیرونی نقش جدار محافظ را دارد تا از تماس مستقیم خاک‌های اطراف با بدنه لایسیمتر جلوگیری کرده و عملیات توزین را با خطای کم‌تر انجام دهد. سطح فوقانی مخزن اصلی باز می‌باشد. در کف مخزن منافذی برای زهکشی آب تعبیه شده است. بدنه مخزن با ورق فولادی به ضخامت سه و شش میلی‌متر به‌ترتیب برای دیواره‌ها و کف ساخته شد. قطر داخلی مخزن ٤٥ سانتی‌متر و ارتفاع آن ٦٠ سانتی‌متر می‌باشد. مخزن اصلی بعد از پرشدن با خاک روی چارچوب مجهز به حس‌گرهای وزن نسبتاً دقیق و ارزان‌قیمت مستقر می‌شود. برد الکترونیکی دستگاه که قابلیت پایش چهار لایسیمتر را به‌طور هم‌زمان دارد برای کالیبراسیون حس‌گرهای وزن و تنظیمات نحوه پایش و ثبت سیگنال‌های خروجی حس‌گرهای وزن به‌صورت فایل متنی ستونی روی حافظه جانبی طراحی گردید. این دستگاه قابلیت نمایش لحظه‌ای وزن مخازن و ثبت آن‌ها با فواصل زمانی دلخواه کاربر را دارا می‌باشد. نتایج ارزیابی عملکرد دستگاه نشان داد که لایسیمتر طراحی‌شده، تغییرات وزن رطوبت خاک را با دقت قابل‌قبولی اندازه‌گیری و ثبت می‌کند.

کلیدواژه‌ها: بیلان آب، پایش رطوبت خاک، تبخیر و تعرق، مدیریت آبیاری.

Design, Construction and Performance Evaluation of an Automatic Weighing Lysimeter

Vahedberdi Sheikh[1*], Hasan Rezaei Moghadam[2], Roya Jafari[3], Zohre Gholami[3], Javad Sheikh[4]
1. Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Range and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
2. Ph.D. Candidate, Department of Watershed Management, Faculty of Range and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
3. Former M.Sc. Student, Department of Watershed Management, Faculty of Range and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
4. M.Sc. Student, Department of Computer Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran.
Received: December 24, 2019 Accepted: March 08, 2020

Abstract
Evapotranspiration as an important component of the hydrologic cycle plays a large role in watershed's water balance study. Accurate estimation of evapotranspiration rate is essential for efficient management of irrigation, determination of plants water demand as well as design of irrigation systems. The aim of the current study is to design and construct a weighing lysimeter to address the need for accurate monitoring of evapotranspiration. The designed lysimeter in this research contains two concentric cylinders. The internal cylinder is the main container of the lysimeter and outer cylinder has the role of protection and isolation of the main container from surrounding soil media. The main container is open-ended from top, but sealed in sidewalls and bottom end, except for orifices at the bottom end to drain the saturation excess water from main container. The main container was made from 3 mm and 6 mm thick steel sheets for sidewall and bottom, respectively. The inner diameter and depth of the main container were 45 cm and 60 cm, respectively. After filling with soil, the containers were loaded on relatively precise and cheap loadcells fixed to a rigid metal framework. An electronic board, which can support four loadcells, was developed for calibration of loadcells and setting up the monitoring and recording the output signals of loadcells as a text file saved on an external memory card. The board can display the instantaneous weight of containers and save them at user defined intervals. The results of performance evaluation indicated that the developed lysimeter can measure and record temporal changes of soil moisture with an acceptable accuracy.

Keywords: Evapotranspiration, Irrigation management, Soil moisture monitoring, Water balance.

* نویسنده مسئول
Email: v.sheikh@yahoo.com

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

تبخیر و تعرق نقش قابل‌ملاحظه‌ای در اقلیم جهانی از طریق تأثیر بر چرخه هیدرولوژی ایفا کرده و برآورد آن کاربردهای زیادی در پیش‌بینی پدیده‌هایی هم‌چون خشک‌سالی، سیل، عملکرد محصول و تناسب کاربری اراضی دارد (۱۷). تخمین دقیق مقدار تبخیر و تعرق، اولین و مهم‌ترین قدم در طراحی، مدیریت و برنامه‌ریزی سیستم‌های آبیاری و سایر سیستم‌های توزیع و کاربرد آب، محاسبه تلفات تبخیری از سطح دریاچه‌ها و سایر منابع آب‌های سطحی، اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی، اگروهیدرولوژیکی، مطالعات بیلان آبی و محیط زیستی، مدیریت منابع آب و غیره می‌باشد (۱۱). روش‌هایی که برای برآورد تبخیر و تعرق به‌کار گرفته می‌شوند به دو گروه اصلی روش‌های مستقیم و غیرمستقیم یا محاسباتی تقسیم‌بندی می‌شوند. ساده‌ترین وسیله برای تعیین میزان تبخیر و تعرق در مقیاس کوچک لایسیمتر[1] است. لایسیمتر در حکم مخزنی از خاک با حجم ثابت است که میزان آب ورودی به و خروجی از لایسیمتر و هم‌چنین ظرفیت نگهداری خاک داخل آن کاملاً مشخص است. استفاده از لایسیمتر، به‌عنوان یک روش مستقیم و معتبر برآورد تبخیر و تعرق مطرح می‌باشد (۱۰). لایسیمترهای وزنی[2] دقیق‌ترین نوع لایسیمترها هستند که در آن‌ها مخزن محتوی خاک و گیاه روی حس‌گر وزنی دقیق[3] قرار گرفته و مقدار آبی که به مصرف تبخیر و تعرق می‌رسد با اندازه‌گیری تغییرات وزن مخزن به‌دست می‌آید. زیرا کاهش وزن مخزن در طی یک دوره زمانی مشخص برابر با مقدار آبی است که یا به‌صورت زه‌آب از انتهای مخزن زهکش شده و یا این‌که به‌صورت تبخیر و تعرق از سطح خاک مخزن و گیاهان موجود در آن خارج شده است. برای توزین لایسیمترهای وزنی، تکنیک‌های متعددی ازجمله روش‌های مکانیکی، الکترونیکی، بالشتکی و هیدرولیکی به کار گرفته می‌شود (٤). لایسیمترهای وزنی الکترونیکی از دقیق‌ترین نوع ادوات اندازه‌گیری نیاز آبی گیاه می‌باشند و می‌توانند مقدار تبخیر- تعرق را در فواصل زمانی کوتاه‌مدت (ساعتی یا دقیقه‌ای) برآورد کنند (۱۰ و ۱۷).

در سال ۱۸۷۵، ادوارد لوئیس استورتوانت، متخصص گیاه‌شناسی از ماساچوست، اولین لایسیمتر وزنی را در ایالات‌متحده ساخت. سالیسبوری و راس (۱۸) اولین مطالعه لایسیمتری انجام‌شده توسط ون هلمونت در اوایل قرن ۱۷ در هلند را گزارش کرده‌اند. کونکه و همکاران (١٤) و ابوخالد و همکاران (۱۲)، اولین کاربرد لایسیمتر وزنی برای مطالعه مصرف آب را از دیلاحایر فرانسه در اواخر قرن ۱۷ گزارش کرده‌اند. عبدالکریم و همکاران (۱۱) کاربرد انواع لایسیمترها برای مطالعات انتقال مواد محلول در پروفیل خاک را مرور کرده اند.

سهرابی و همکاران (٦) به‌منظور برآورد نیاز آبی گیاهان زراعی و گیاه مرجع دو عدد لایسیمتر وزنی به ابعاد ۲×۳×۳ متر و ۱×٤×٤ متر ساختند که سیستم توزین این لایسیمترها الکترونیکی بوده و دقت حس‌گرهای وزنی مورد استفاده را یک کیلوگرم بوده است.

راد و همکاران (۳) ده عدد لایسیمتر وزنی را در ایستگاه تحقیقات بیابان‌زدایی شهید قدوسی یزد طراحی و ساختند. لایسیمترهای طراحی‌شده دارای قطر ۱/۲ متر و ارتفاع ۱/۷ متر بودند. عملیات توزین را به‌وسیله دستگاه جرثقیل و یک دستگاه ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۱ درصد انجام دادند.

زردشتی و همکاران (۵) میکرولایسیمتر وزنی هوشمند قابل‌حمل با مخزنی به قطر ۲۷ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و محفظه خارجی به قطر ٤۰ سانتی‌متر و عمق ۵۰ سانتی‌متر طراحی و ساختند. سیستم توزین الکترونیکی بوده و از یک حس‌گر وزن تک‌نقطه از جنس

www.SID.ir

Archive of SID

آلومینیوم، با نرخ بارگذاری حداکثر ٦٠ کیلوگرم استفاده شده است.

بیگلویی و مقصودی (۲) ضمن اندازه‌گیری میزان تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه چمن توسط لایسیمتر وزنی در منطقه رشت، تعدادی از روش‌های محاسباتی تبخیر و تعرق را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج روش‌های محاسباتی را با نتایج لایسیمتر با استفاده از انحراف معیار تفاوت‌ها و معیار خطا مورد مقایسه قرار دادند و روش‌های محاسباتی را از نظر کارایی به‌ترتیب تورنت‌وایت، بلانی‌کریدل، SCS، پنمن-مانتیث و ایوانف اولویت‌بندی نمودند.

افتادگان خوزانی (۱) در ارزیابی داده‌های تبخیر و تعرق برآوردشده با روش پنمن‌مانتیث فائو و پهنه‌بندی منطقه‌ای آن در استان یزد به این نتیجه رسید که، روش پنمن‌مانتیث‌فائو همبستگی بالایی را با داده‌های برداشت شده توسط لایسیمتر وزنی در منطقه یزد نشان می‌دهد.

قمرنیا و همکاران (۹) در پژوهش خود به بررسی اثر بازه زمانی محاسباتی (روزانه، ۱۰ روزه و ماهانه) بر دقت برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از مدل‌های پنمن مانتیث فائو، تابش فائو، پنمن اصلاح‌شده، هارگریوز، مک کینگ و پریستلی تیلور در شهرستان سنندج با اقلیم سرد نیمه‌خشک پرداختند. برای ارزیابی دقت مدل‌ها، از داده-های لایسیمتری (لایسیمتر زهکش‌دار) اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه تحقیقاتی سنندج استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد مدل پنمن اصلاح‌شده برای تمامی بازه‌های زمانی محاسباتی، مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع را با دقت بالاتری پیش‌بینی می‌کند.

قمرنیا و لرستانی (۸) در بررسی کارایی روش‌های تجربی برآورد تبخیر-تعرق مرجع (بر پایه درجه حرارت) در اقلیم‌های مختلف در مقایسه با داده‌های لایسیمتری به این نتیجه رسیدند که برای اقلیم خشک، به‌ترتیب روش‌های هارگریوز-M4، هارگریوز، هارگریوز-M2، هارگریوز-M1، هامون۱۹٦۱، هامون۱۹٦۳و هارگریوز سامانی مناسب‌ترین روش‌ها می‌باشند. برای اقلیم نیمه‌خشک روش‌های هارگریوز-M4، هارگریوز، هامون۱۹٦۳ و هارگریوز سامانی مناسب‌ترین روش‌ها می‌باشند. برای اقلیم مدیترانه‌ای روش‌های هارگریوز-M4 و هارگریوز مناسب‌ترین روش‌ها هستند. در اقلیم نیمه‌مرطوب روش‌های هارگریوز-M4 و هارگریوز-M2 به‌عنوان مناسب‌ترین روش‌ها برگزیده شدند. در اقلیم مرطوب نیز به‌ترتیب روش‌های هارگریوز-M4، هارگریوز- M2 و هارگریوز-M1 مناسب‌ترین روش‌ها و در اقلیم‌های بسیار مرطوب به‌ترتیب روش‌های هارگریوز-M4، هارگریوز، هارگریوز-M1 و بلانی‌کریدل-٤ مناسب‌ترین روش‌ها و روش چندل نامناسب‌ترین روش برای همه اقلیم‌ها معرفی شد.

علی‌حوری (۷) در پژوهش خود به مقایسه روش‌های لایسیمتری (زهکش‌دار) و محاسبه‌ای در تعیین نیاز آبی خرما در شهر اهواز پرداخت. بررسی آماری با استفاده از رگرسیون خطی بین نتایج روش‌های محاسباتی تبخیر و تعرق و روش لایسیمتری نشان داد که رابطه همبستگی تمام روش‌های محاسباتی با روش لایسیمتری در سطح یک درصد معنی‌دار است. ضریب تعیین تعدیل شده (R^2_{adj}) بین ۰/۹٤ و ۰/۹۷ به‌ترتیب برای معادلات تشت تبخیر فائو و بلانی- کریدل فائو در نوسان بود، درحالی‌که ضریب کارایی (EF) از ۰/۹۳ در معادله پنمن- مانتیث فائو تا ۰/۹۵ در معادله بلانی-کریدل فائو متغیر بود. کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار بیشینه خطای نسبی (ME) به‌ترتیب به معادله هارگریوز- سامانی و تشت تبخیر فائو و حداقل و حداکثر تفاوت نسبی بین مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری‌شده (nRMSE) به‌ترتیب به معادله بلانی- کریدل فائو و پنمن- مانتیث فائو تعلق نسبت داده شده است.

لوریته و همکاران (۱۵) یک لایسیمتر وزنی بزرگ با طول و عرض سه متر و عمق ۲/۱۵ متر را برای

www.SID.ir

Archive of SID

اندازه‌گیری تبخیر و تعرق درختان باغی در یک مزرعه آزمایشی باغ بادام در اسپانیا طراحی کردند. نتایج اولیه از اندازه‌گیری تبخیر و تعرق درختان بادام جوان نشان داد که لایسمیتر وزنی می‌تواند برای اندازه‌گیری دقیق مقدار تبخیر و تعرق و تعیین نیاز آبی درختان بادام استفاده شود.

مارک و همکاران (١٦) با هدف تعیین عدم فایده آبیاری اراضی زراعی دشت‌های مرتفع ناحیه نیمه‌خشک تگزاس که کشاورزان معمولاً به‌خاطر ترس از کمبود آب و اعمال محدودیت‌های احتمالی پمپاژ آب از منابع آب زیرزمینی در فصل کشت، اقدام به آبیاری این اراضی قبل از فصل کشت می‌نمایند، با استفاده از لایسیمترهای وزنی بزرگ با طول و عرض سه متر و عمق ٢/٣ متر نسبت به اندازه‌گیری و تحلیل آمار تلفات تبخیر روزانه از سطح خاک لخت به‌مدت هفت روز متوالی بعد از وقوع بارش برای ٣٥ رخداد بارندگی در طول فصل پیش از کشت در سال‌های ٢٠٠٢، ٢٠٠٥ و ٢٠٠٩ اقدام نمودند. نتایج نشان داد که برای شرایط معتدل تقاضای تبخیر توسط اتمسفر (شرایط تبخیر و تعرق پتانسیل معتدل)، تمام بارش مؤثر (مقدار نفوذیافته) ناشی از رخدادهای بارش کم‌تر از ١٠ میلی‌متر، در همان روز اول بعد از وقوع بارش از سطح خاک تبخیر می‌شود و برای رخدادهای ٢٠ الی ٣٠ میلی‌متر، حداکثر سه الی چهار روز طول می‌کشد که تمام بارش مؤثر ناشی از این رخدادها از پروفیل خاک تبخیر شود. بنابراین نتیجه گرفتند که آبیاری‌های پیش از فصل کشت که از منابع آب زیرزمینی محدود پمپاژ می‌شوند، برای ذخیره رطوبت در پروفیل خاک مفید نبوده و اکثراً تلف می‌شود. جمع‌بندی مرور منابع نشان می‌دهد که پژوهش‌گران در نقاط مختلف دنیا، بسته به هدف و مقیاس تحقیقات خود، معمولاً خودشان نسبت به طراحی و ساخت لایسیمتر با ابعاد و ویژگی‌های متفاوت اقدام نموده‌اند. زیرا تعداد شرکت‌هایی که نسبت به تولید انبوه لایسیمترها در ابعاد مختلف اقدام می‌کنند بسیار محدود هستند، هم‌چنین قیمت نهایی برای خرید این‌گونه تجهیزات، به‌ویژه در ابعاد سفارشی بسیار بالا تمام می‌شود. بنابراین این پژوهش با هدف طراحی و ساخت یک لایسیمتر وزنی اتوماتیک متوسط مقیاس جهت پایش مستمر میزان نفوذ آب باران (بارش مؤثر)، رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و هم‌چنین مطالعات برآورد نیاز آبی گیاهان انجام شد.

مواد و روش‌ها

اجزای لایسیمتر طراحی‌شده

مخزن اصلی لایسیمتر

مخزن اصلی لایسیمتر طراحی‌شده در این پژوهش استوانه‌ای به قطر داخلی ٤٥ سانتی‌متر و ارتفاع ٦٠ سانتی‌متر می‌باشد که فقط سطح بالایی آن باز بوده و بقیه قسمت‌های آن به‌جز سوراخ‌های زهکشی که در کف مخزن قرار دارند کاملاً بسته می‌باشد. این لایسیمتر با ورق فولادی به ضخامت سه و شش میلی‌متر به‌ترتیب برای دیواره و کف ساخته شد. ضخامت دیواره در ١٠ سانتی‌متری انتهای بالایی مخزن شش میلی‌متر طراحی گردید تا به دلیل انعطاف‌پذیری ورق آهن، در موقع نصب تغییر شکل در مخزن ایجاد نشود و هم‌چنین امکان ضربه‌زدن با چکش برای کوبیدن مخزن به زمین برای تهیه خاک دست‌نخورده وجود داشته باشد (شکل ١).

محفظه قرارگیری لایسیمتر

این محفظه بیرونی برای حفاظت مخزن اصلی و جلوگیری از تماس مستقیم بدنه مخزن اصلی با خاک‌های اطراف و کاهش خطای اندازه‌گیری ساخته شده است. وجود این محفظه و فضای خالی (سه سانتی‌متر) بین آن و بدنه مخزن اصلی لایسیمتر باعث می‌گردد که فقط مخزن اصلی لایسیمتر روی سیستم توزین قرار گیرد و از خطاهای احتمالی اندازه‌گیری جلوگیری به‌عمل آید (شکل ٢).

www.SID.ir

Archive of SID

Figure 1. The way of taking undisturbed soil core with inner container of the lysimeter at two land uses of alfalfa and wheat

Figure 2. The outer container of lysimeter and metal foundation to install the loadcell

سیستم توزین لایسیمتر

برد الکترونیکی

لایسیمتر ساخته‌شده در این پژوهش دارای یک برد الکترونیکی مجهز به صفحه کلید، صفحه نمایشگر، حافظه جانبی و چهار پورت ورودی است که توانایی پایش چهار لایسیمتر را به‌طور هم‌زمان دارد (شکل ۳- الف). صفحه کلید برای واسنجی سنسورها و ایجاد تنظیمات نحوه پایش لایسیمترها مطابق نظر کاربر طراحی شده است. در حقیقت این دستگاه قابلیت تنظیم تاریخ، ثبت داده‌ها با فواصل زمانی ثانیه، دقیقه و ساعت و کالیبره‌کردن لایسیمتر برحسب گرم و کیلوگرم را دارا می‌باشد. صفحه نمایشگر الس‌ی‌دی ۲x۱۶ کاراکتری برای نمایش تنظیمات و مقادیر لحظه‌ای وزن لایسیمترها تعبیه شده است. حافظه جانبی، داده‌های لایسیمترها را به‌صورت فایل متنی در فواصل زمانی تنظیم‌شده توسط کاربر ثبت می‌نماید. هر کدام از پورت‌های ورودی به یکی از لایسیمترها وصل می‌شود.

حس‌گر وزنی

سیستم توزین طراحی‌شده برای این لایسیمتر از نوع حس‌گرهای وزنی تک‌نقطه‌ای یا چندنقطه‌ای فشاری می‌باشد (حس‌گرهای وزنی حساسه‌های الکترونیکی هستند که تغییرات فشار وارده را به تغییرات ولتاژ تبدیل می‌کنند) که روی یک بستر یا چارچوب مسلح در زیر مخزن اصلی لایسیمتر یا همان محفظه کشت نصب می‌شوند. حس‌گرهای مورداستفاده در این پژوهش قابلیت اندازه‌گیری تا ۱۰۰۰ کیلوگرم با دقت ۱۰ گرم را دارا می‌باشند. سیگنال‌های خروجی حس‌گرها که همان داده‌های وزنی اندازه‌گیری‌شده می‌باشند به برد الکترونیکی منتقل می‌شوند و در حافظه جانبی ذخیره می‌شوند. شکل ۳- ب نمونه‌ای از حس‌گرهای وزنی با جنس استیل را نشان می‌دهد.

پس از طراحی و ساخت لایسیمتر، جهت بررسی کارایی و دقت اندازه‌گیری، دو مورد آزمایش میدانی انجام شد و در طی هر دو آزمایش، یک دستگاه باران‌نگار جهت ثبت وقایع بارندگی، که تنها ورودی به داخل مخازن اصلی لایسیمتر می‌باشد، در مجاورت لایسیمتر نصب گردید. در آزمایش اول به‌منظور انجام آزمایش روی خاک دست‌نخورده، دو عدد مخزن اصلی لایسیمتر، یکی در کاربری یونجه و دیگری در کاربری گندم در مجاورت ایستگاه هواشناسی حوزه آبخیز معرف- زوجی کچیک در شمال‌شرق استان گلستان، به‌آرامی داخل خاک کوبیده شدند.

www.SID.ir

Archive of SID

C B A

Figure 3. Photos of monitoring parts of the designed lysimeter. A) Electronic board; B) A loadcell and C-installed lysimeters in the field alongside of a rain logger

قبل از کوبیدن مخازن لایسیمتر به داخل خاک، ابتدا خاک محل به‌تدیج (با پوشاندن سطح خاک با یک تکه موکت و ریختن آب روی آن) مرطوب شد تا کوبیدن مخازن اصلی به‌راحتی امکان‌پذیر گردد. بعد از دو روز، مخازن با محتوی خاک از خاک بیرون آورده شدند. برای بیرون‌آوردن مخازن ابتدا خاک‌های اطراف آن‌ها حفر شدند و بعد از خالی‌کردن فضای اطراف مخازن، با استفاده از یک جرثقیل دستی، مخازن حاوی خاک بالا آورده شدند و دهانه پایین آن‌ها با درپوش فلزی پوشانده شدند و به محل نصب (چاله‌هایی که برای استقرار لایسیمترها حفرشده و کف آن‌ها بتون‌ریزی شده بودند) در محوطه سایت هواشناسی منتقل شدند و بعد از استقرار روی حس‌گرهای وزن و انجام تنظیمات اولیه، به‌مدت ۱۲ روز متوالی مورد پایش قرار گرفتند. هم‌زمان با اندازه‌گیری تبخیر و تعرق واقعی در مخازن اصلی لایسیمتر، تبخیر و تعرق پتانسیل نیز با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی و روش پنمن‌مانتیث‌فائو به‌کمک نرم‌افزار REF-ET محاسبه گردید تا امکان مقایسه نتایج لایسیمتر با داده‌های تبخیر و تعرق محاسبه‌شده در ایستگاه هواشناسی فراهم گردد. متأسفانه به‌دلیل نوسانات جریان برق منطقه در روز سیزدهم پایش، برد الکترونیکی دستگاه و یکی از حس‌گرها آسیب دید و ادامه آزمایش برای مدت طولانی‌تر مقدور نگردید.

بعد از یک وقفه طولانی در تعمیر و بازطراحی دستگاه، آزمایش میدانی دوم در محوطه پردیس دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. در این مرحله، مخازن اصلی لایسیمتر با خاک دست‌خورده پرشدند و به‌مدت یک ماه در فضای باز گذاشته شدند تا ساختمان خاک تقریباً به شرایط طبیعی برگردد و سپس با حفر چاله و کف‌سازی بستر و نصب مخازن لایسیمتر، به‌مدت ۳۱۰ روز از تاریخ ۲۰ آبان ۱۳۹۷ تا ۲۵ شهریور ۱۳۹۸ تغییرات وزن مخازن مورد پایش قرار گرفتند (شکل ۳- ج). درنهایت با محاسبه وزن بارندگی ثبت‌شده توسط باران‌نگار نصب‌شده در کنار لایسیمتر و تغییرات وزن ثبت‌شده توسط لایسیمتر، صحت و دقت لایسیمتر طراحی‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که این دوره آزمایش بیش‌تر با هدف ارزیابی دقت عملکرد دستگاه در سنجش تغییرات وزن مخازن لایسیمتر درنتیجه تغییرات رطوبت خاک انجام شد و سطح مخازن لایسیمتر فاقد پوشش گیاهی نگه‌داشته شدند. شایان ذکر است که تغییرات وزن مخازن لایسیمتر تابع اختلاف بین ورودی‌ها (بارش) و خروجی‌ها (تبخیروتعرق و زهکشی) می‌باشد. برخلاف آزمایش اول، در آزمایش دوم به‌دلیل طولانی‌بودن دوره آزمایش و وقوع بارش‌های متعدد به‌ویژه در فصل پاییز و زمستان به

www.SID.ir

Archive of SID

احتمال زیاد از کف مخازن زهکش هم اتفاق افتاده است که مورد سنجش قرار نگرفته است. البته، در طراحی و ساخت این دستگاه، منافذی در کف مخازن اصلی لایسیمتر تعبیه شده است که امکان اندازه‌گیری رطوبت زهکشی‌شده را فراهم می‌کند. با توجه به این‌که، برد الکترونیکی لایسیمتر امکان پایش هم‌زمان چهار مخزن لایسیمتری را فراهم می‌کند رطوبت زهکشی‌شده می‌تواند به یک مخزن درپوشیده در زیر مخازن اصلی لایسیمتر هدایت شود و جرم آب زهکشی‌شده به‌صورت تجمعی در طول زمان توسط یک حس‌گر وزن[4] جداگانه با ظرفیت اندازه‌گیری پایین و دقت بالا (یک گرم) به‌طور مستمر پایش شود. با توجه به این‌که نصب این مخزن جانبی ممکن است فضای فیزیکی قابل‌ملاحظه‌ای اشغال کند، تیم پژوهش در حال طراحی پیمانه‌های مخصوص سنجش آب خروجی با اقتباس از باران‌نگارهای ترازویی[5] برای پایش نرخ خروجی زهکشی از کف مخازن اصلی لایسیمتر می‌باشد (۵).

نتایج و بحث

در این پژوهش، در آزمایش اول پس از اندازه‌گیری تبخیر و تعرق واقعی توسط گیاه یونجه و گندم در مخازن لایسیمتر، با استفاده از روش پنمن مانتیث فائو ٥٦، تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی برای این دو گونه گیاهی محاسبه شد. در ابتدا داده‌های لایسیمتری با داده‌های محاسباتی روش پنمن‌مانتیث فائو ٥٦ در گام‌های زمانی ساعتی و روزانه برای گیاه یونجه (به‌عنوان یکی از گیاهان مرجع در محاسبات تبخیر و تعرق) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. سپس با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی کچیک، میزان تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی در مقیاس ساعتی و روزانه محاسبه گردید. برای ارزیابی نتایج، از خط یک‌به‌یک برای تشخیص بیش‌برآورد یا کم‌برآورد مدل پنمن‌مانتیث فائو ٥٦ در مقایسه با تبخیر و تعرق اندازه‌گیری‌شده توسط لایسیمتر استفاده گردید و هم‌چنین از میزان تطابق بین منحنی تغییرات روزانه و ساعتی تبخیر و تعرق محاسبه‌شده توسط روش پنمن‌مانتیث فائو ٥٦ با تبخیر و تعرق به‌دست‌آمده توسط لایسیمتر جهت مقایسه بصری استفاده شد (شکل‌های ٤ تا ٧).

برای مقایسه آماری نتایج تبخیر و تعرق برآوردی با مدل پنمن‌مانتیث فائو ٥٦ و تبخیر و تعرق اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله لایسیمتر، از معیارهای آماری ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا، میانگین مطلق خطا، متوسط خطای تخمین، معیارهای جاکویدز و صباغ استفاده شده است (۱۳). معیار جاکویدز از تلفیق دو معیار جذر میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطا به‌دست می‌آید و معیار صباغ از نسبت معیار ضریب تبیین به معیار جاکویدز حاصل می‌شود. نتایج حاصل از این آزمون‌های آماری نشان داد که تطابق خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و مقادیر محاسباتی به‌روش پنمن مانتیث فائو وجود دارد (جدول‌های ۱ و ۲) که با نتایج افتادگان خوزانی (۱) و قمرنیا و همکاران (۹) مبنی بر همبستگی بالای روش پنمن مانتیث فائو با داده‌های اندازه‌گیری‌شده توسط لایسیمتر مطابقت دارد. در مقیاس روزانه (شکل ٤) و ساعتی (شکل ٦) نوسانات مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری‌شده بیش‌تر از محاسبه‌شده می‌باشد که بیانگر دقت بیش‌تر دستگاه لایسیمتر در سنجش تغییرات رطوبت خاک می‌باشد. هم‌چنین مدل پنمن‌مانتیث فائو مقادیر تبخیر و تعرق روزانه را اندکی بیش از مقادیر اندازه‌گیری‌شده، برآورد نموده است (شکل‌های ٤ و ٥). نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد لایسیمتر طراحی‌شده در مقایسه با لایسیمترهای طراحی‌شده با ظرفیت بالا در داخل کشور از جمله سهرابی و همکاران (٦) و راد و همکاران (۳)، هم از لحاظ دقت اندازه‌گیری

www.SID.ir

Archive of SID

و هم قابلیت ثبت داده در فواصل زمانی دلخواه، نتایج بهتری را ارائه می‌نماید. هرچند در مقایسه با لایسیمتر با ظرفیت پایین که توسط زردشتی و همکاران (۵) طراحی شده است دقت پایین‌تری را نشان می‌دهد.

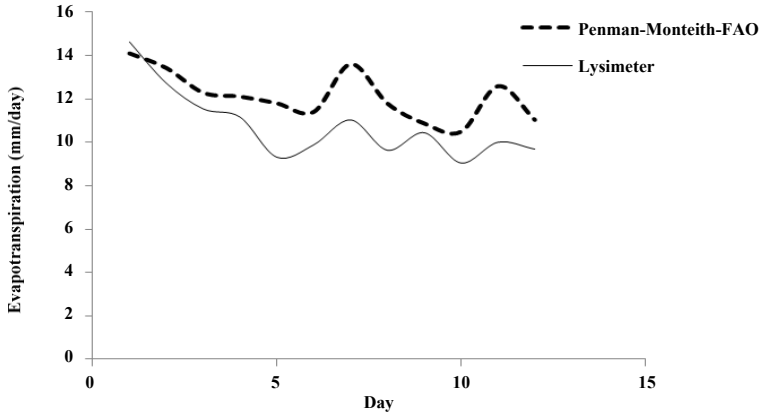

Figure 4. Comparing daily evapotranspiration calculated with Penman-Monteith-FAO and measured with lysimeter for alfalfa

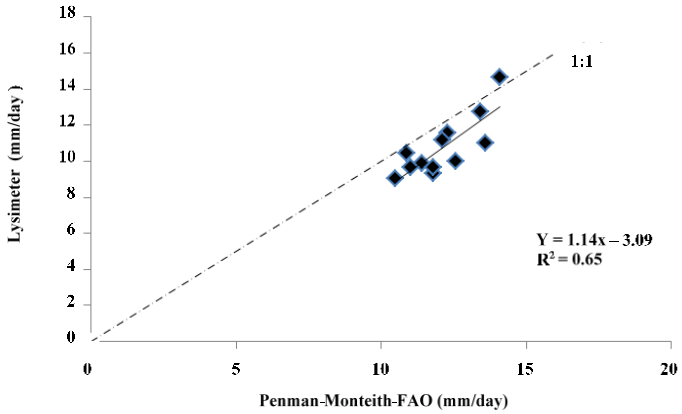

Figure 5. Fitted line between daily values of evapotranspiration calculated with Penman-Monteith-FAO and measured with lysimeter for alfalfa

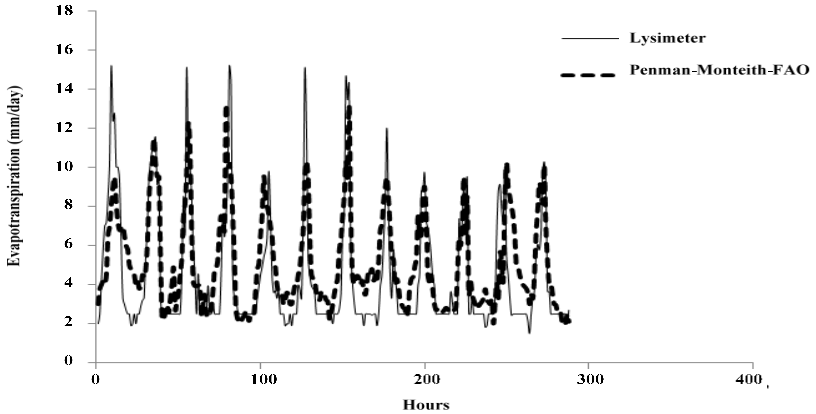

Figure 6. Comparing daily evapotranspiration calculated with Penman-Monteith-FAO and measured with lysimeter for alfalfa

www.SID.ir

Archive of SID

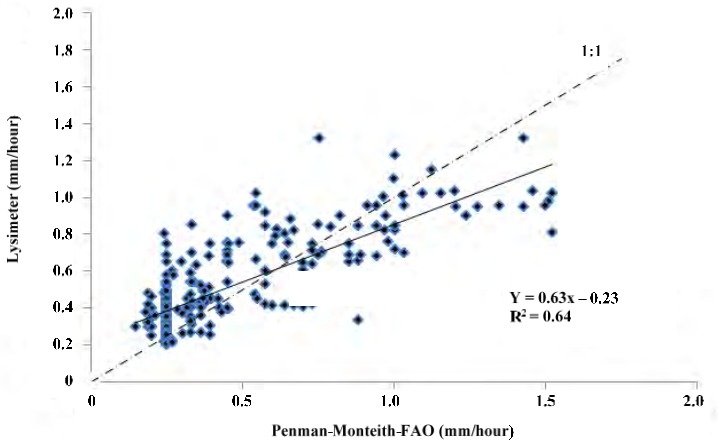

Figure 7. Fitted line between hourly values of evapotranspiration calculated with Penman-Monteith-FAO and measured with lysimeter for alfalfa

Table 1. Statistical criteria of comparing daily values of evapotranspiration calculated with Penman-Monteith-FAO and measured with lysimeter for alfalfa

Criteria / Method	R^2	RMSE	MBE	MAE	t	R^2/t
Penman-Monteith-FAO56	0.65	1.645	1.412	1.412	5.546	0.117

Table 2. Statistical criteria of comparing hourly values of evapotranspiration calculated with Penman-Monteith-FAO and measured with lysimeter for alfalfa

Criteria / Method	R^2	RMSE	MBE	MAE	t	R^2/t
Penman-Monteith-FAO56	0.64	0.95	3.52	1.38	4.59	0.13

در آزمایش دوم، لایسیمتر به‌مدت ۳۱۰ روز برای خاک بدون پوشش گیاهی مورداستفاده قرار گرفت که نمودار تغییرات آن به‌صورت ساعتی و روزانه در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. همان‌طورکه مقایسه این دو نمودار نشان می‌دهد میزان نوسانات مقادیر وزن لایسیمتر در نمودار ساعتی بیش‌تر از نمودار تغییرات روزانه است. به‌عبارتی دستگاه لایسیمتر طراحی‌شده قادر به ثبت تغییرات کوتاه‌مدت رطوبت خاک در نتیجه وقوع رگبارهای کوتاه و موقتی نیز می‌باشد.

در این پژوهش علاوه بر ترسیم نمودار تغییرات ساعتی و روزانه وزن لایسیمتر، جهت صحت‌سنجی این تغییرات، تعداد ۱۰ رخداد بارش متوسط از نظر تداوم و مقدار بارندگی در ایام مختلف سال انتخاب گردید که اطلاعات جزئی آن‌ها در جدول (۳) ارائه شده است. در انتخاب رخدادها، بارش‌های با مقادیر خیلی زیاد و یا طولانی‌مدت کنار گذاشته شدند. زیرا برای بارش‌های خیلی زیاد احتمال داده می‌شد که زهکشی از منافذ تعبیه‌شده در کف مخزن اصلی لایسیمتر، به‌ویژه برای ماه‌های مرطوب سال که رطوبت خاک بالا می‌باشد، اتفاق افتاده باشد. هم‌چنین برای رخدادهای طولانی‌مدت نیز، احتمال داده شد که در طول مدت رخداد بارش، تبخیر و تعرق اتفاق افتاده و باعث ایجاد خطا در آنالیز شود. همان‌طورکه اعداد جدول (۳) نشان می‌دهد حتی در مورد بارش‌های متوسط مقیاس نیز می‌توان اثر اندک تبخیر و تعرق در طول رخداد بارش را ملاحظه کرد؛ به‌طوری‌که برای تمام رخدادهای انتخاب‌شده میزان تغییر وزن ثبت‌شده توسط لایسیمتر اندکی کم‌تر از وزن بارش‌های اتفاق افتاده می‌باشد و هرچه مدت بارش طولانی‌تر باشد

www.SID.ir

Archive of SID

این اختلاف بیش‌تر است. وزن بارش اتفاق‌افتاده روی مخازن لایسیمتر از حاصل‌ضرب عمق بارش در مساحت مخازن لایسیمتر محاسبه شد و با تغییر وزن ثبت‌شده توسط لایسیمتر مقایسه گردید که نتایج آن به‌صورت نمودار پراکنش نقطه‌ای، خط رگرسیون و خط یک‌به‌یک در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

Table 3. Validation of lysimeter records for some short duration rainfall events

Date	Precipitation duration (hour)	Precipitation (mm)	Precipitation (kg)	Lysimeter weight change (kg)
3 - 1 - 2019	2.5	15.49	2.46	2.25
10 - 1 - 2019	6	25.65	4.07	3.42
17 - 1 - 2019	5	26.41	4.19	3.62
29 - 1 - 2019	12	19.01	3.02	2.72
4 - 3 - 2019	7	9.1	1.44	1.27
18 - 3 - 2019	15	70.4	11.19	7.55
20 - 4 - 2019	3	9.9	1.57	1.44
23 - 4 - 2019	2.5	5.3	0.84	0.63
31 - 5 - 2019	4.5	10.1	1.60	1.43
11 - 8 - 2019	4.5	8.89	1.41	1.27

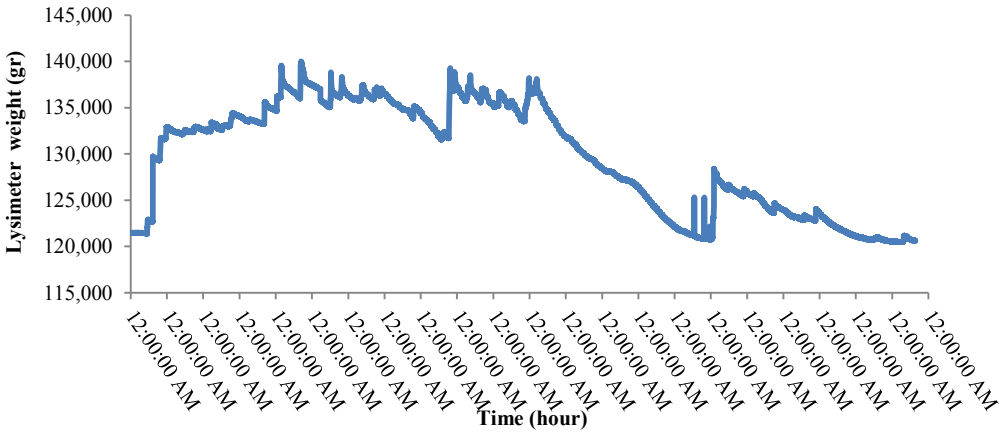

Figure 8. Hourly records of lysimeter weights during 18/11/2018 – 20/09/2019

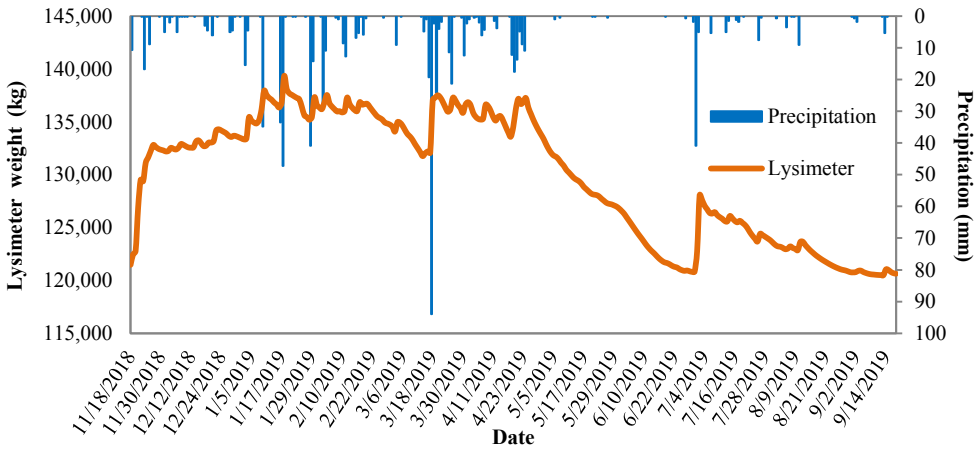

Figure 9. Daily records of precipitation and lysimeter weight

www.SID.ir

Archive of SID

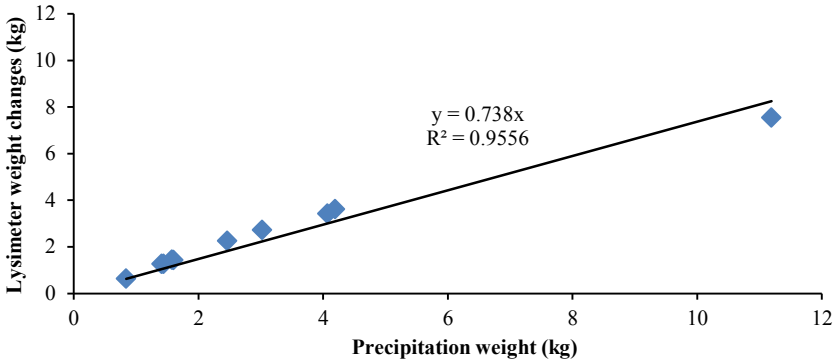

Figure 10. Comparing weights of precipitation and lysimeter moisture content change for some rainfall events

نظر به این‌که تمام مراحل طراحی و ساخت این دستگاه، توسط تیم پژوهش انجام‌شده و قطعات و ابزارهای مورداستفاده آن در بازارهای داخلی موجود می‌باشند هزینه تمام‌شده طراحی و ساخت این مجموعه لایسیمتری با دو مخزن اصلی از جنس ورق آهن، حدود ۸۰ میلیون ریال (کم‌تر از ۱۰۰۰ دلار آمریکا) برآورد می‌شود که اطلاعات ریزهزینه‌های آن در جدول (٤) خلاصه شده است.

Table 4. Costs analysis of designing and constructing the automated weighing lysimeter

Item	Rate (Rials)	Qty	Amount (Rials)
Inner container	3.500.000	2	7.000.000
Outer container	3.000.000	2	6.000.000
Metal foundation for loadcell	3.500.000	2	7.000.000
Loadcell	6.000.000	2	12.000.000
Electronic board	40.000.000	1	40.000.000
Spare parts	5.000.000	-	5.000.000
Total			77.000.000

نتیجه‌گیری

در مرحله اول، نتایج محاسبه تبخیر و تعرق حاصل از روش پنمن‌مانتیث فائو با تبخیر و تعرق اندازه‌گیری‌شده توسط لایسیمتر مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نتایج ارزیابی کارایی که براساس معیارهای ضریب تبیین، متوسط خطای تخمین‌ها، خطای مربع میانگین ریشه، میانگین مطلق خطا، معیار جاکویدز و معیار صباغ و همکاران در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است می‌توان گفت در تبخیر و تعرق روزانه و ساعتی روش پنمن‌مانتیث فائو تطابق قابل‌قبولی را با داده‌های لایسیمتری از خود نشان می‌دهد. در مرحله دوم، همان‌طورکه در نمودارهای ساعتی و روزانه نشان داده شده است روند تغییرات نمودار تبخیر و تعرق به ازای رخدادهای بارندگی ایجادشده قابل‌قبول می‌باشد که این خود نشان‌دهنده حساسیت و دقت قابل‌قبول دستگاه لایسیمتر طراحی‌شده می‌باشد. از طرفی با توجه به جدول (۳) مشخص شد که هرچه مدت‌زمان بارش کم‌تر باشد تفاوت بین وزن بارش و وزن محاسبه‌شده به‌وسیله لایسیمتر کم‌تر می‌باشد. به‌عبارتی، وقتی مدت‌زمان بارش کوتاه باشد تبخیر کم‌تری در طول رخداد بارش صورت می‌گیرد و هم‌چنین زهکش کم‌تری در این مدت اتفاق می‌افتد که باعث می‌شود اختلاف بین وزن بارش و وزن طوبت خاک محاسبه شد توسط لایسیمتر کم‌تر باشد که نشان‌دهنده کارایی بسیار بالای لایسیمتر طراحی‌شده می‌باشد (مثلاً برای رخداد بارش در تاریخ ۱۳۹۸/۱/۳۱). درنتیجه، با وجود ضریب همبستگی بسیار بالا بین مقادیر وزن بارش رخ داده و تغییرات وزن خاک ثبت‌شده توسط لایسیمتر، شیب خط همبستگی بین آن‌ها کم‌تر از یک به‌دست آمد (شکل ۱۰) که داده‌های جدول (۳) نیز این

www.SID.ir

Archive of SID

اختلاف را تأیید می‌کند. به‌طوری‌که برای تمام رخدادهای بارش انتخاب‌شده میزان تغییر وزن لایسیمتر اندکی کم‌تر از وزن بارش اتفاق افتاده می‌باشد و هرچه مدت بارش طولانی‌تر باشد این اختلاف بیش‌تر است. به‌عبارتی با افزایش مدت‌زمان بارش، به دلیل تبخیر اندک در طول رخداد و هم‌چنین با افزایش مقدار بارش و مدت‌زمان بارش به‌دلیل احتمال اشباع‌شدگی خاک و زهکشی از پایین لایسیمتر، تغییرات وزن ثبت‌شده توسط لایسیمتر بسیار کم‌تر از مقدار وزن بارش اتفاق افتاده می‌باشد (مثلاً برای رخداد بارش در تاریخ ۱۳۹۷/۱۲/۲۷).

از مزایای لایسیمتر طراحی‌شده در این پژوهش می‌توان به دقت بالای اندازه‌گیری با وجود ظرفیت بالا (۱۰۰۰ کیلوگرم) اشاره کرد و هم‌چنین این لایسیمتر قابلیت اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات را با فواصل زمانی دلخواه کاربر (حداقل یک دقیقه) دارد که امکان پایش لحظه‌ای وزن لایسیمتر را فراهم می‌کند. این ویژگی برای کنترل دقیق میزان رطوبت خاک و تنظیم خودکار زمان قطع و وصل آبیاری حائز اهمیت است. دیگر ویژگی برجسته این لایسیمتر، امکان تهیه خاک دست‌نخورده برای مخزن اصلی لایسیمتر می‌باشد تا زمینه کاربرد آن را در اکوسیستم‌های طبیعی که نیازمند انجام آزمایش‌های میدانی بدون به‌هم‌خوردگی پروفیل خاک است فراهم نماید.

تبخیر و تعرق در بررسی عکس‌العمل هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز، محاسبات بیلان آبی، برنامه‌ریزی‌های آبیاری و مدل‌های هیدرولوژیکی نقش مهمی دارد. لذا اندازه‌گیری دقیق و پایش مستمر تبخیر و تعرق واقعی کمک زیادی به پژوهش‌های علمی مرتبط با بیلان آب، حفاظت آب و خاک، تعیین نیاز آبی گیاهان مختلف و هم‌چنین اطلاعات ارزشمندی برای کارشناسان و تصمیم‌گیران بخش‌های دولتی، اداره منابع طبیعی، شرکت سهامی آب منطقه‌ای و جهاد کشاورزی فراهم می‌کند.

پی‌نوشت‌ها

1. Lysimeter
2. Weighing lysimeter
3. High precision load cell
4. Load cell
5. Tipping bucket rain gauge

منابع

۱. افتادگان خوزانی، ا. (۱۳۹۱). ارزیابی داده‌های تبخیر و تعرق برآوردشده با لایسیمتر و روش پنمن‌مانتیث فائو و پهنه‌بندی آن در استان یزد. خشک‌بوم یزد. ۲: ۲۸۰-۲۹۰.

۲. بیگلویی، م. و مقصودی، ا. (۱۳۸۲). تعیین مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع برای منطقه رشت. علوم خاک و آب. ۳: ۳٤-٤۳.

۳. راد، م.ه.، میرحسینی، س.ر.، مشکوه، م.ع. و سلطانی، م. (۱۳۸۷). طراحی، ساخت و نصب لایسیمترهای وزنی به‌منظور تعیین نیاز آبی درختان و درختچه‌ها در مناطق خشک، فصلنامه علمی- پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان. ۱۵(۱): ۵۸-۵۱.

٤. زارع ابیانه، ح.، سبزی پرور، ع. و معروفی، ص. (۱۳۹۰). ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع و پهنه‌بندی آن در ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ۷٤ : ۹۵-۱۱۰.

۵. زردشتی، ف.، بختیاری، ب.، قادری، ک.، خانجانی، م.ج. و بنایان، م. (۱۳۹۷). طراحی و ساخت لایسیمتر کوچک وزنی هوشمند قابل حمل به‌منظور اندازه‌گیری دقیق نیاز آبی گیاه، تحقیقات آب و خاک ایران. ٤۹(۳): ۷۰٤-٦۹۵.

٦. سهرابی، ت.، ابراهیمی، ع. ر.، رحیمی، ح. و خلیلی، ع.، (۱۳۸٤). طراحی، ساخت و نصب لایسیمتر وزنی به‌منظور تعیین نیاز آبی گیاهان زراعی، علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۲(۲): ٤۲-۳۳.

www.SID.ir

Archive of SID

۷. علی‌حوری، م. (۱۳۹۸). مقایسه روش‌های لایسیمتری و محاسبه‌ای در تعیین نیاز آبی خرما، مدیریت آب و آبیاری. ۹(۲): ۹٤-۸۱.

۸. قمرنیا، ه. و لرستانی، م. (۱۳۹۷). بررسی کارایی روش‌های تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع (بر پایه درجه حرارت) در اقلیم‌های مختلف (مطالعه موردی ایران)، مدیریت آب و آبیاری. ۸(۲): ۳۱۹-۳۰۳.

۹. قمرنیا، ه.، رضوانی، س.و.ا. و فتحی، پ. (۱۳۹۱). ارزیابی و واسنجی مدل‌های تبخیر و تعرق گیاه مرجع با توجه به اثر دوره محاسباتی برای اقلیم نیمه‌خشک سرد، مدیریت آب و آبیاری. ۲(۲): ۳۷-۲۵.

۱۰. مساعدی، ا. و قبائی‌سوق، م. (۱۳۹۱). ارزیابی معادله‌های مختلف تجربی برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در شرایط مختلف نبود پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری‌شده در چند ناحیه آب‌وهوایی ایران. دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۳ : ۵۰-۳۸.

11. Abdulkareem, J.H., Abdulkadir, A. & Abdu, N. (2015). A review of different types of lysimeter used in solute transport studies. *International Journal of Plant & Soil Science*, *8*(3), 1-14.

12. Aboukhaled, A., Alfaro, A. & Smith, M. (1982). Lysimeters. FAQ Irrig. And Drain. Paper No. 39. Rome.

13. Jacovides, C.P. (1977). Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models. *Agricultural Water Management*, *3*, 95-97.

14. Kohnke, H., Dreibelbis, F.R. & Davidson, J.M. (1940). A survey and discussion of lysimeters and a bibliography on their construction and performance (No. 372). US Department of Agriculture.

15. Lorite, I.J., Santos, C., Testi, L. & Fereres, E. (2012). Design and construction of a large weighing lysimeter in an almond orchard. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(1), 238-250.

16. Marek, G., Gowda, P., Marek, T., Auvermann, B., Evett, S., Colaizzi, P. & Brauer, D. (2016). Estimating preseason irrigation losses by characterizing evaporation of effective precipitation under bare soil conditions using large weighing lysimeters. *Agricultural Water Management*, 169, 115-128.

17. Norman, J.M., Kustas, W.P. & Humes, K.S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, *77*(3-4), 263-293.

18. Salisbury, F.B. & Ross, C. (1969). Plant physiology. Wadsworth Publ. Co., Inc., Belmonr, CA. 7& p.

www.SID.ir