مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۱۱/ شماره ۳/سال ۱۳۸۹/ص ۸۶-۷۱

جداسازی تبخیر– تعرق به روش بیلان انرژی (نسبت بوون) در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

هانیه کوثری*، حسین دهقانی‌سانیج، فرهاد میرزایی و عبدالمجید لیاقت**

* نگارنده مسئول، نشانی: کرج، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ص. پ. ۴۱۱۱، تلفن: ۲۲۴۱۱۱۱۹(۰۲۶۱)، پیام‌نگار: hk_kosari@yahoo.com

** به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران؛ استادیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی؛ استادیار و استاد دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۱/۴؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۶/۶

چکیده

روش‌های دقیق و کاربردی در جداسازی تبخیر-تعرق، اطلاعاتی سودمند برای مدیریت آب در مزرعه در جهت بهبود کارایی مصرف آب فراهم می‌کند. شناخت این روش‌ها بالاخص در مورد سیستم‌های نوین آبیاری که با هزینه‌ای بالا اجرا می‌شوند با اهمیت است. به این منظور در تحقیقی که در تابستان ۱۳۸۸ در مزرعهٔ مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کرج اجرا شد، تبخیر-تعرق گیاه ذرت و جزء تبخیر خاک به طور همزمان به روش بیلان انرژی نسبت بوون اندازه‌گیری و از تفاضل این دو، تعرق گیاه محاسبه شد. بافت خاک مزرعهٔ محل آزمایش لوم بود و مزرعه با سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی آبیاری شد که در عمق ۱۵ سانتیمتری از سطح خاک نصب شده بود. در زمینهٔ مدیریت آبیاری تلاش شد تا گیاه ذرت دچار تنش نشود. اطلاعات مورد نیاز روش بیلان انرژی نسبت بوون از بالای آسمانهٔ گیاهی، آسمانهٔ گیاهی، و سطح خاک برداشت شد. نتایج نشان داد که برای یک روز نمونه در مرحلهٔ میانی رشد گیاه ذرت، از کل انرژی موجود در مزرعه (R_n-G) که می‌تواند صرف تبخیر- تعرق شود تنها ۱۵ درصد صرف گرمای محسوس هوا شده و بقیه صرف تبخیر- تعرق شده است. شار گرمای ورودی به سطح خاک کمتر از ۱۰ درصد شار تابش خالص است و ۹۳ درصد از انرژی موجود در سطح خاک صرف تبخیر از سطح خاک شده است. در سطح آسمانهٔ گیاهی، حدود ۱۹ درصد از انرژی صرف گرمای محسوس (H_c) شده است. از مقایسهٔ مقادیر ساعتی تبخیر-تعرق به روش بیلان انرژی نسبت بوون و روش پنمن- مانتیث مشخص شد که بین این دو همبستگی خوبی وجود دارد (R^2=۰/۹۵) و تغییرات تبخیر- تعرق به روش بیلان انرژی نسبت بوون نسبت به روش پنمن- مانتیث برابر ۱۰درصد است.

واژه‌های کلیدی

آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، بیلان انرژی نسبت بوون، تبخیر، تعرق، جداسازی

مقدمه

جداسازی تبخیر- تعرق به اجزای آن شامل تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه، پایه و اساس بسیاری از طرح‌های مدیریت آبیاری است. در مواردی، مانند طراحی سیستم‌های آبیاری، اندازه‌گیری تبخیر- تعرق کل کفایت می‌کند. اما زمانی که مطالعات در زمینه آب مصرفی گیاه دقیق‌تر می‌شود اندازه‌گیری یا تخمین هر دو جزء تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه اهمیت می‌یابد. با آگاهی از سهم هر یک از اجزای تبخیر- تعرق می‌توان با در پیش گرفتن روش‌های مدیریتی مناسب در کاهش تلفات تبخیری از سطح خاک و نیز افزایش تعرق گیاه، که رابطه مستقیمی با عملکرد آن دارد، گام برداشت. قرار گرفتن ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه خشک و نیز تلاش برای بالابردن کارایی مصرف آب، لزوم شناخت تبخیر- تعرق و اجزای آن را بیش از پیش با اهمیت می‌کند؛ هرچند کمبود ادوات اندازه‌گیری کافی و مناسب، محققان و پژوهشگران را برای

© 2013,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

تحقیق در این زمینه دچار محدودیت کرده است. تلاش‌های اولیه برای اندازه‌گیری جداگانهٔ تبخیر و تعرق شامل روش‌هایی است که در آن قسمتی از سطح زمین برای جلوگیری از تبخیر پوشانده می‌شود و از مقایسهٔ تبخیر- تعرق این منطقه (که به نوعی فقط بیانگر تعرق است) با تبخیر- تعرق منطقه بدون پوشش، میزان تبخیر از سطح خاک محاسبه می‌شود (Shaw, 1959; Peters & Russell *et al*., 1959; Harrold *et al*., 1959; Fritschen & Shaw, 1961). بررسی‌ها نشان می‌دهد که به کارگیری پوشش‌ها برای جداسازی تبخیر- تعرق، بیلان انرژی را در سطح خاک و مزرعه تغییر می‌دهد و تخمین درستی از تعرق گیاه در شرایط طبیعی ارائه نمی‌دهد. با گذشت زمان و توسعه میکرولایسیمترها (Boast & Robertson, 1982)، امکان اندازه‌گیری تبخیر روزانه از خاک مستقیما و بدون ایجاد تغییرات شدید در محیط خاک و مزرعه، که از به کارگیری پوشش‌ها ناشی می‌شود فراهم آمد (Shawcroft & Gardner, 1983). صحت و اعتبار استفاده از میکرولایسیمترها آزمایش شده است اما تنها داده‌های تبخیر روزانه نمی‌تواند اطلاعات کافی را برای مطالعه اثر متقابل گیاه- خاک فراهم کند و در بررسی‌هایی مانند توسعه و بازبینی مدل‌ها، اندازه‌گیری تقریباً همزمان تبخیر و تعرق لازم است (Ham *et al*., 1990). ساکوراتانی (Sakuratani, 1987) اولین کسی است که به طور روزانه داده‌های تبخیر و تعرق را گزارش داده است. در تحقیق وی تبخیر- تعرق به روش بیلان انرژی نسبت بوون و تعرق با اندازه‌گیری جریان شیره گیاهی محاسبه شده و سپس تبخیر از تفاضل این دو مقدار به دست آمده است. تحقیقات دیگری نیز بر پایه اندازه‌گیری مستقل جزء تعرق وجود دارد که در آنها تبخیر-تعرق کل به یکی از روش‌های مرسوم اندازه‌گیری و از تفاضل تعرق، مقدار تبخیر خاک محاسبه شده است (Ham *et al*., 1990; Wallace *et al*., 1993; Jara *et al*., 1998; Sauer *et al*., 2007).

در برخی از این مطالعات برای اطمینان از صحت اندازه‌گیری‌ها، تبخیر از سطح خاک نیز با میکرولایسیمتر اندازه‌گیری و با مقادیر محاسبه شده مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که یکی از مشکلات استفاده از میکرولایسیمترها این است که خاک در داخل این وسیله از نظر هیدرولیکی ایزوله شده است و بنابراین ممکن است متفاوت از محیط دست نخورده اطرافش خشک شود و دیگر اینکه در شرایط تبخیر پایین، میکرولایسیمترها نتایج درستی را نشان نمی‌دهند (Ham *et al*., 1990; Jara *et al*., 1998). اشک‌تراب و همکاران (Ashktorab *et al*., 1989) میزان تبخیر از خاک را به روش بیلان انرژی نسبت بوون اندازه‌گیری کردند. نتایج تحقیق آنها حاکی از دقت خوب این روش برای اندازه‌گیری تبخیر از سطح خاک بود. در تحقیق دیگر، مقادیر تبخیر از خاک با میکروبوون (اندازه‌گیری به روش بیلان انرژی در نزدیکی سطح خاک) و تبخیر- تعرق کل با استفاده از یک لایسیمتر وزنی اندازه‌گیری و از تفاضل آنها مقدار تعرق محاسبه شد (Ashktorab *et al*., 1994). از آخرین کارهای تحقیقاتی، جداسازی تبخیر- تعرق به روش بیلان انرژی نسبت بوون است که در آن تبخیر- تعرق کل و هم جزء تبخیر خاک به این روش اندازه‌گیری می‌شود (Zeggaf *et al*., 2008). نتایج این تحقیق که روی کشت ذرت به روش آبیاری بارانی انجام شده است نشان می‌دهد که روش بیلان انرژی نسبت بوون چارچوبی برای جداسازی تبخیر-تعرق در سطح مزرعه فراهم می‌کند و نیز می‌تواند برای مطالعهٔ فرایندهای تبادل انرژی در سطح مزرعه و بالاخص بین سطح خاک و آسمانهٔ گیاهی به عنوان روشی دقیق و ارزان قیمت (نسبت به سایر روش‌های پیشین) به‌کار گرفته شود. این روش همچنین می‌تواند برای برنامه‌ریزی آبیاری و بررسی روش‌های مدیریتی با هدف بهبود کارایی مصرف آب در سطح مزرعه به کارگرفته شود.

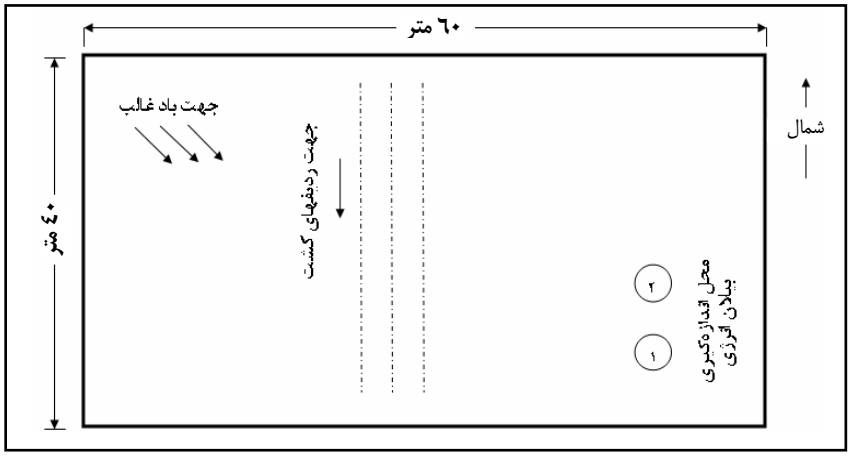
آبیاری قطره‌ای از جمله روش‌های آبیاری است که باعث بهبود عملکرد گیاه، راندمان آبیاری، و کارایی مصرف آب می‌شود. این موضوع بالاخص در مورد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با توجه به هزینه‌های زیاد اجرایی آن دارای اهمیت است. در آبیاری قطره‌ای، برخلاف آبیاری سطحی و بارانی، بخشی از سطح خاک مرطوب می‌شود و آب مورد نیاز گیاه نیز از همین بخش خیس شده تأمین خواهد شد. مطالعات نشان می‌دهد که تعرق بیشترین نقش را در عملکرد محصول دارد و لذا محققان تلاش می‌کنند که تا حد امکان سهم تعرق از تبخیر-تعرق کل افزایش یابد و این مورد در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مصداق عینی‌تری دارد. اما در مورد سهم تعرق و همین‌طور تبخیر در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نتایج تحقیقات چندانی در دست نیست. لاسکانو (Lascano, 2000)، به منظور ارزیابی سیستمی متشکل از تکنولوژی پیشرفته سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برای کنترل دقیق آب مصرفی گیاه و آبیاری دقیق و بهنگام، تعرق گیاه و تبخیر خاک را به طور مجزا در یک سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی به ترتیب توسط جریان‌سنج شیره گیاهی و میکرولایسیمتر اندازه‌گیری کرده و حاصل جمع آن را با نتایج به دست آمده از براورد آب مصرفی گیاه با استفاده از ضریب گیاهی و تبخیر-تعرق گیاه مرجع مقایسه کرد. نتایج بررسی‌های وی نشان داد در منطقه مورد مطالعه برای آبیاری متناوب گیاه پنبه با منابع آبی محدود، روش استاندارد دقت لازم را برای براورد تبخیر-تعرق روزانه ندارد.

بنابراین، با توجه به ضرورت تحقیق در زمینهٔ شناخت سهم هر یک از اجزای تبخیر- تعرق در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، هدف از این تحقیق ۱) جداسازی تبخیر- تعرق در یک سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به روش بیلان انرژی نسبت بوون و ۲) ارزیابی دقیق پارامترهای بیلان انرژی در داخل مزرعه به منظور بهره‌گیری بیشتر از منابع آب و انرژی است.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل اجرای طرح

تحقیق حاضر در تابستان سال ۱۳۸۸ در قطعه زمینی به ابعاد ۶۰×۴۰ متر (شکل ۱) در مزرعهٔ اختصاصی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی واقع در کرج (۳۵ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی) اجرا شد. ارتفاع این اراضی از سطح دریا ۱۳۱۲/۵ متر است. زمین در پاییز سال قبل زمین آزمایش شخم عمیق زده شده بود و در اواخر بهار سال ۸۸ و به محض فراهم شدن شرایط کشت ذرت اقدام به شخم سبک، کودپاشی، دیسک و ماله زدن برای تسطیح گردید. یک روز قبل از کاشت بذر، ۵۰ کیلوگرم کود پتاسیم به زمین داده شد. سپس بذر ذرت (دانه‌ای رقم دابل کراس ۳۷۰) در تاریخ ۸۸/۳/۲۵ با دستگاه پنوماتیک در ۸۰ ردیف ۴۰ متری و با فاصلهٔ ردیف‌های ۷۵ سانتی‌متری کاشته شد.



شکل ۱- شمائی از زمین مورد کشت ذرت و محل‌های اندازه‌گیری بیلان انرژی

نتایج آزمایش‌های خاکشناسی تا عمق ۸۰ سانتی‌متری از سطح خاک نشان می‌دهد که خاک مزرعه دارای بافت لوم (شن ۴۷، سیلت ۴۴، رس ۹ درصد) است و هدایت الکتریکی عصارهٔ اشباع خاک آن برابر ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر است. آب آبیاری از چاه تأمین شد و نتایج تجزیهٔ شیمیایی آب نشان داد که آب این منطقه از کیفیت خوبی برخوردار است (هدایت الکتریکی آب آبیاری ۰/۸دسی‌زیمنس بر متر و نسبت جذبی سدیم در آب آبیاری ۱/۹). در سیستم آبیاری زیرسطحی، از آبیاری قطره‌ای نواری با فاصله قطره چکان‌های ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد که با توجه به اهداف طرح نوارهای تیپ در زیر سطح خاک و در عمق ۱۵ سانتی‌متری و حتی المقدور نزدیک ردیف‌های کشت خوابانده شدند. در هنگام استقرار لوله‌های تیپ در داخل جویچه‌ها به ویژه دقت شد که لوله‌ها پیچ نخورند تا در انتقال آب مشکلی حاصل نشود. برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس آمار بلند مدت هواشناسی و به کمک نرم‌افزار NETWAT تعیین شد. حجم آب مصرفی با در نظر گرفتن ۲۰ درصد اضافی برای جلوگیری از وارد آمدن تنش به گیاه در هر دور آبیاری در اختیار گیاه قرار گرفت. مقادیر توصیه شده کود نیترات (که طبق آزمایش‌های خاکشناسی در منطقه، ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار است) در برابر فصل رشد از طریق سیستم آبیاری (کود آبیاری) در پای گیاه توزیع شد. شاخص سطح برگ در دوره آزمایش، در روزهای چهل و یکم تا چهل و چهارم و پنجاه و نهم تا شصت و دوم پس از کشت، و در روزهای ابتدا و انتهای هر مرحله از بررسی این تحقیق، اندازه‌گیری شد. برای این کار در هر بار ۳ تا ۵ بوته به طور تصادفی انتخاب و تمام برگ‌های روی بوته از محل رویش جدا و به آزمایشگاه منتقل شدند. در آزمایشگاه سطح برگ‌های هر بوته با دستگاه Leaf Area Meter (Area Measurement System, DELTA-T Devices LTD.ENGLAND) اندازه‌گیری و با توجه به تراکم کشت و سطوح گیاهی در مساحت مورد نظر، شاخص سطح برگ محاسبه شد. مقادیر میانگین ساعتی پارامترهای هواشناسی شامل تابش خورشیدی، دما، رطوبت، سرعت و جهت باد توسط ایستگاه هواشناسی خودکار که در داخل مزرعه نصب شده بود، اندازه‌گیری و ثبت شد.

اندازه‌گیری بیلان انرژی

در این طرح، شار گرمای نهان به طور همزمان از مزرعه ذرت و سطح خاک در یک سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با دو تکرار اندازه‌گیری شد. از تفاضل مقدار

گرمای نهان مزرعه ذرت (تبخیر-تعرق) از گرمای نهان سطح خاک (تبخیر)، تعرق گیاه محاسبه شد. تجهیزات اندازه‌گیری بیلان انرژی از یک رادیومتر خالص برای اندازه‌گیری شار تابش خالص، دو حسگر صفحه شار حرارتی برای اندازه‌گیری شار گرمای ورودی به سطح خاک، و مجموعه‌ای از حسگرها برای اندازه‌گیری نسبت بوون تشکیل شده است. دو تکرار (که با شماره‌های ۱ و ۲ در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند)، برای استقرار تجهیزات و اندازه‌گیری اجزای بیلان انرژی به فاصلهٔ ۵ متر از یکدیگر قرار گرفتند. تجهیزات اندازه‌گیری بیلان انرژی در فاصلهٔ ۹ متری از لبه شرقی مزرعه قرار گرفتند تا حداکثر نسبت فچ به ارتفاع در موقع اندازه‌گیری و وزش باد غالب منطقه (که شمال‌غربی به جنوب‌شرقی) است تأمین شود (شکل ۱). این نسبت بزرگتر از حداقل نسبت توصیه شده در تحقیق هیلمن و همکاران (Heilman *et al*., 1989) است. برای اندازه‌گیری نسبت بوون، ابزاری خاص شامل یک سری از حسگرها باید تهیه یا ساخته می‌شد. در این طرح برای این کار ۸ سایکرومتر تهویه‌دار ترموکوپلی ساخته و واسنجی شد. در هر تکرار، برای اندازه‌گیری نسبت بوون، ۴ سایکرومتر تهویه‌دار روی یک میله قرار داده شدند. دو سایکرومتر بالایی برای اندازه‌گیری گرادیان دما و فشاربخار در بالای آسمانه گیاهی استفاده شد. بر اساس منابع علمی مطالعه شده، این دو سایکرومتر به فاصله ۱ متر از یکدیگر در بالای آسمانه گیاهی طوری نصب شدند که سایکرومتر پایینی همیشه ۰/۲ متر بالای ارتفاع گیاه قرار گیرد. (Ham *et al*., 199; Jara *et al*., 1998; Zeggaf *et al*., 2008) این دو سایکرومتر در طول دوره رشد ذرت و با بلند شدن ارتفاع گیاه هفته‌ای یک بار جابه‌جا می‌شدند. دو سایکرومتر دیگر برای اندازه‌گیری گرادیان دما و فشاربخار در بالای سطح خاک استفاده شدند. فاصله بین این دو سایکرومتر ۰/۱ متر و سایکرومتر پایینی در ۵ سانتی‌متری از سطح خاک روی میله ثابت قرار داده شد (Ashktorab *et al*., 1989; Zeggaf *et al*., 2008). این دو سایکرومتر در طول دوره رشد در همین ارتفاع ثابت نگه داشته شدند.

مقدار تابش خالص موجود در مزرعه با رادیومتر خالص مدل CNR1, Kipp & Zonnen با قرارگیری در ارتفاع ۱ متری بالای آسمانه گیاهی اندازه‌گیری شد. شار گرمای ورودی به سطح خاک نیز با قرارگیری صفحات شار حرارتی MF-180M, EKO Japan در ۲ سانتی‌متری زیر سطح خاک، یکی روی ردیف‌های کشت و دیگری بین ردیف‌های کشت، اندازه‌گیری شد. تمامی داده‌ها به کمک دستگاه دیتالاگر CR23X, Campbell Scientific Inc. هر دقیقه یک بار اندازه‌گیری و میانگین ۳۰ دقیقه‌ای آن ذخیره می‌شد.

بیلان انرژی مزرعه ذرت

معادله بیلان انرژی در سطح مزرعه به صورت زیر تعریف می شود:

$$R_n = G + H + \lambda ET \qquad (۱)$$

که در آن، R_n= شار تابش خالص موجود در مزرعه؛ G= شار گرمای ورودی به سطح خاک؛ H= شار گرمای محسوس؛ و λET= شار گرمای نهان یا همان تبخیر- تعرق کل است (همگی برحسب وات بر مترمربع). به طور قراردادی، R_n وقتی به سمت پایین باشد مثبت، G هنگام انتقال گرما از سطح به پایین مثبت، و λET و H به سمت بالا مثبت در نظر گرفته می‌شوند. جداسازی انرژی بین λET و H از طریق نسبت بوون تعریف می‌شود (Bowen, 1926; Perez *et al*., 1999):

$$\beta = \frac{H}{\lambda ET} \qquad (۲)$$

با حل همزمان معادله ۱ و ۲ شار گرمای نهان و گرمای محسوس به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\lambda ET = \frac{R_n - G}{1+\beta} \qquad (۳)$$

$$H = \beta \frac{R_n - G}{1+\beta} \qquad (۴)$$

در یک دورهٔ زمانی و با فرض یکسان گرفتن ضرایب تبادل گرمای محسوس و بخار آب و اندازه‌گیری گرادیان دمای هوا و فشار بخار در دو سطح ارتفاعی مختلف، نسبت بوون از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\beta = \gamma \frac{(\delta T/\delta z)}{(\delta e/\delta z)} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \qquad (۵)$$

که در آن، ΔT و Δe به ترتیب گرادیان دما و فشار بخار در دو سطح اندازه‌گیری است؛ و γ= ضریب سایکرومتریک است که از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma = \frac{C_p P}{\varepsilon L_V} \qquad (۶)$$

که در آن، C_p= گرمای ویژه هوا در فشار ثابت (۱/۰۱ کیلوژول بر کیلوگرم بر درجه سانتی‌گراد)؛ P= فشار اتمسفر (کیلوپاسکال)؛ ε= نسبت وزن مولکولی بخار آب و هوا (۰/۶۲۲)؛ و L_v= گرمای نهان تبخیر (کیلوژول بر کیلوگرم) است (Zeggaf *et al.*, 2008). ضریب سایکرومتریک برای محل آزمایش ۰/۰۵۸ در نظر گرفته شد.

بیلان انرژی سطح خاک

معادلهٔ بیلان انرژی در سطح خاک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_{ns} - \lambda E_s - H_s - G = 0 \qquad (۷)$$

که در آن، R_{ns}= تابش خالص رسیده به سطح خاک؛ λE_s = شار گرمای نهان سطح خاک (یا همان جزء تبخیر از سطح خاک)؛ و H_s= شار گرمای محسوس از سطح خاک (همه بر حسب وات بر مترمربع) است.

R_{ns} با یک معادلهٔ تجربی بر حسب شاخص سطح برگ (LAI) و تابش خالص کل موجود در مزرعه (R_n) از معادلهٔ زیر محاسبه می‌شود (Uchijima, 1976):

$$R_{ns} = R_n \exp(-0.622LAI + 0.055LAI^2) \qquad (۸)$$

محققان دیگر نیز به همین روش تابش خالص رسیده به سطح خاک را تخمین زده‌اند. (Jara *et al.*, 1998; Gardiol *et al.*, 2003; Kato *et al.*, 2004)

همانند محاسبه بیلان انرژی در مزرعه، نسبت بوون در سطح خاک نیز از رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\beta_S = \frac{H_S}{\lambda E_S} \qquad (۹)$$

که با استفاده از معادلات ۵ و ۶ و اندازه‌گیری گرادیان دما و فشار بخار توسط سایکرومترهای تهویه‌دار نصب شده در ۵ و ۱۵ سانتی‌متری بالای سطح خاک، نسبت بوون در سطح خاک محاسبه می‌شود. به این ترتیب با حل همزمان معادله ۷ و ۹ شار گرمای نهان در سطح خاک از معادلهٔ زیر به دست می‌آید:

$$\lambda E_s = \frac{R_{ns} - G}{1+\beta_s} \qquad (۱۰)$$

بیلان انرژی در آسمانهٔ گیاهی

بیلان انرژی در آسمانهٔ گیاهی به صورت زیر بیان می‌شود (Heilman *et al.*, 1994 ، Zeggaf *et al.*, 2008):

$$R_{nc} = \lambda E_c + H_c \qquad (۱۱)$$

که در آن، R_{nc}= مقدار جذب شدهٔ R_n توسط آسمانهٔ گیاهی؛ و λE_c و H_c به ترتیب شدت گرمای نهان و محسوس از آسمانه است. به عبارت دیگر، λE_c همان جزء تعرق گیاه را نشان می‌دهد. مقدار R_{nc} از معادله زیر به دست آمد:

$$R_{nc} = R_n - R_{ns} \qquad (۱۲)$$

که در آن؛ مقدار R_n اندازه‌گیری و R_{ns} از رابطهٔ ۸ برآورد می‌شود.

سپس λE_c نیز از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\lambda E_c = \lambda ET - \lambda E_s \qquad (۱۳)$$

سرانجام مقدار H_cاز محاسبه باقیمانده رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

برآورد تبخیر-تعرق به روش پنمن- مانتیث

برای برآورد تبخیر- تعرق در منطقهٔ مورد مطالعه، بررسی‌ها نشان می‌دهد که روش پنمن- مانتیث (Allen *et al*., 1998) روشی قابل قبول است (Pourbanad kouki, 2009). نتیجهٔ تحقیقات پوربنادکوکی (Pourbanad kouki, 2009) در منطقهٔ کرج در خصوص روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و روی گیاه ذرت نیز نشان می‌دهد که برآورد ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به روش پنمن- مانتیث براساس داده‌های هواشناسی روزانه (Real Time) و اعمال آن، به گیاه هیچ تنشی وارد نمی‌شود و رطوبت خاک تا قبل از آبیاری در حد سهول‌الوصول باقی می‌ماند. بنابراین، در روزهای بررسی این تحقیق با استفاده از مقادیر ساعتی پارامترهای هواشناسی، تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از نرم‌افزار RefET به روش پنمن- مانتیث محاسبه و با استفاده از ضریب گیاهی ذرت به تبخیر- تعرق گیاه تبدیل شد. برای محاسبه ضریب گیاهی، مراحل مختلف رشد ذرت طبق جدول ۱ تعیین و ضریب گیاهی در روزهای بررسی این تحقیق طبق دستورالعمل موجود در نشریه ۵۶ فائو (Allen *et al*., 1998) تصحیح شد. مقادیر ضریب گیاهی در روزهای چهل و یکم تا چهل و چهارم پس از کشت ۰/۹ و برای روزهای پنجاه و نهم تا شصت و یکم پس از کشت ۱/۰۵ به دست آمد.

جدول ۱- مراحل مختلف رشد ذرت مورد مطالعه

روز پس از کشت				
سبز شدن	گل دهی	شروع پیری پوشش گیاهی	رسیدگی فیزیولوژیکی	طول دوره گل دهی
۵	۵۹	۹۷	۱۱۵	۱۵

مقایسه آماری

برای مقایسه مقادیر تخمینی به روش پنمن- مانتیث با مقادیر اندازه‌گیری شده بیلان انرژی نسبت بوون، از ۳ پارامتر آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، و میانگین انحراف (ME) استفاده شد که طبق روابط زیر تعریف می‌شوند (Dehghanisanij *et al*., 2004).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n}} \qquad (۱۴)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{n} \quad (۱۵)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |d_i|}{n} \quad (۱۶)$$

در این روابط، d_i= اختلاف بین iامین مقدار اندازه‌گیری و تخمین زده شده و n تعداد جفت داده‌هاست.

نتایج و بحث

اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی

مقادیر میانگین روزانه پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی خودکار در روزهای بررسی این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است. در روزهای چهل و یک تا چهل و چهارم پس از کاشت، گیاه در مرحلهٔ توسعه و در روزهای پنجاه و نهم تا شصت و دوم پس از کاشت، گیاه در مرحلهٔ میانی قرار داشت. قطعهٔ آزمایشی روزهای چهل و یکم، چهل و چهارم، پنجاه و نهم، و شصت و سوم پس از کاشت آبیاری شده است. روز شصت و سوم، مزرعه استثنائاً به دلیل برخی مشکلات پیش آمده با دور ۴ روزه آبیاری شده است. طی روزهای بررسی، بیشترین و کمترین انرژی تابشی ورودی طول موج کوتاه به ترتیب مربوط به روز چهل و دوم و شصتم بوده است.

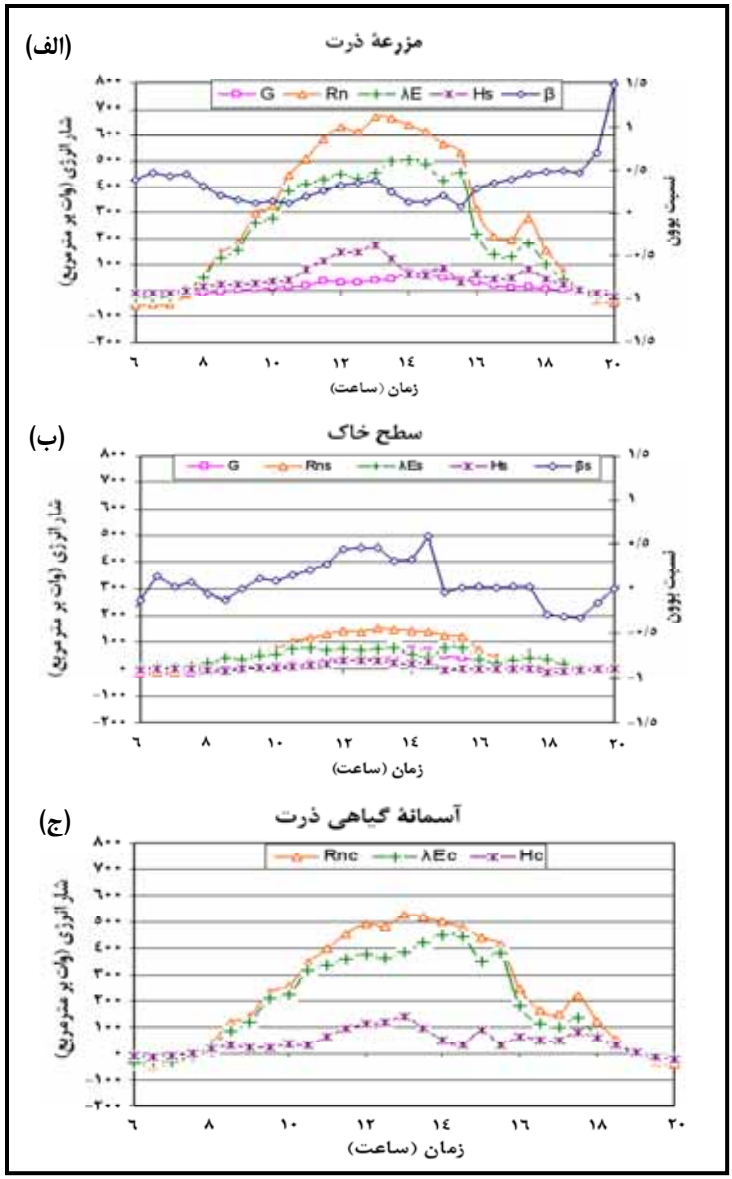
جدول ۲- میانگین روزانه پارامترهای هواشناسی در دورهٔ اندازه‌گیری

مرحلهٔ رشد	روز پس از کاشت	دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)			رطوبت نسبی (درصد)			سرعت باد (متر بر ثانیه)	تابش کلی خورشید (مگاژول بر متر مربع بر روز)
		کمینه	بیشینه	متوسط	کمینه	بیشینه	متوسط		
توسعه گیاه	۴۱	۱۶/۶۷	۳۴/۴۴	۲۴/۱۰	۱۸/۹۲	۷۸/۱۶	۵۳/۰۲	۲/۹۰	۴۵/۱۷
	۴۲	۱۶/۵۱	۳۴/۰۷	۲۴/۱۲	۱۵/۶۴	۸۳/۰۷	۵۲/۶۴	۳/۳۸	۴۶/۸۲
	۴۳	۱۶/۱۰	۳۳/۳۰	۲۳/۳۹	۲۶/۸۰	۷۷/۸۲	۵۴/۰۹	۲/۹۵	۴۶/۲۱
	۴۴	۱۶/۵۶	۳۲/۸۹	۲۳/۷۹	۲۸/۶۶	۷۴/۷۲	۵۲/۱۶	۲/۹۲	۴۴/۳۱
میانی	۵۹	۱۹/۹۱	۳۷/۳۸	۲۸/۳۰	۱۲/۴۲	۶۵/۵۱	۳۶/۴۰	۱/۴۸	۴۰/۹۷
	۶۰	۱۹/۹۶	۳۵/۶۴	۲۷/۴۲	۱۷/۷۸	۶۵/۹۸	۴۱/۶۷	۲/۳۳	۴۰/۱۴
	۶۱	۱۹/۰۹	۳۵/۵۷	۲۷/۰۰	۱۳/۲۹	۷۲/۴۰	۴۱/۶۸	۲/۰۵	۴۵/۱۸
	۶۲	۱۶/۰۰	۳۴/۴۵	۲۴/۲۴	۱۳/۰۶	۵۹/۶۹	۳۸/۴۳	۱/۹۰	۴۵/۰۷

بررسی اجزای بیلان انرژی در سطح مزرعه، آسمانه گیاهی و سطح خاک

روند تغییرات اجزای بیلان انرژی مزرعهٔ ذرت، سطح خاک، و آسمانهٔ گیاهی در روز شصتم پس از کاشت در شکل ۲ نشان داده شده است. این روز آفتابی کامل نبود و به همین دلیل انتخاب شد. در این روز، میانگین دما و رطوبت هوا به ترتیب ۲۷ درجه سانتی‌گراد و ۴۱ درصد و میانگین تابش خالص موجود در سطح مزرعه ۳۸۰ وات بر متر مربع بود. در شکل ۲ الف مشاهده می‌شود که روند تغییرات R_n زنگوله‌ای و متقارن نیست که نشان می‌دهد در برخی ساعات روز درصدی از پوشش ابر در آسمان وجود داشته و هوا کاملا آفتابی نبوده است. از کل انرژی موجود در مزرعه (R_n-G)، که می‌تواند صرف تبخیر-تعرق شود، تنها ۱۵ درصد صرف گرمای محسوس هوا و بقیهٔ آن صرف

تبخیر- تعرق شده است. در تحقیقات (Ritchi *et al.*, 1971; Ham *et al.*, 1991; Steduto & Hsiao, 1998; Zeggaf *et al.*, 2008) نتایجی مشابه گزارش شده است. نسبت بوون در طول روز بین صفر تا ۰/۷ متغیر است در صورتی که زقف و همکاران(Zeggaf *et al.*, 2008) مقادیری کمتر از ۰/۲۵ گزارش کرده‌اند که می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند متفاوت بودن مرحلهٔ رشد گیاه در زمان اندازه‌گیری یا تفاوت در این نوع خاک باشد (در این تحقیق، LAI گیاه ۶۰ روز پس از کاشت برابر بود با ۳/۵۳). مقدار میانگین شار گرمای ورودی به سطح خاک در این روز حدود ۲۹ وات بر مترمربع بوده است که با توجه به مقدار میانگین تابش خالص، شار گرمای ورودی به سطح خاک کمتر از ۱۰ درصد شار تابش خالص است. در منابع نیز همین مقدار برای میانگین روزانه شار گرمای ورودی به سطح خاک گزارش شده است (Allen *et al.*, 1998; Zeggaf *et al.*, 2008).



شکل ۲- روند تغییرات اجزای بیلان انرژی: (الف) مزرعه ذرت، (ب) سطح خاک و (ج) آسمانه گیاهی در روز شصتم پس از کاشت

به هنگام روز، مقدار شار گرمای نهان سطح خاک اندکی کمتر از مقدار انرژی موجود در سطح خاک است به عبارت دیگر ۹۳ درصد از انرژی موجود (R_{ns}-G)، صرف تبخیر از سطح خاک (شار گرمای نهان از سطح خاک) و ۷ درصد صرف گرمای محسوس سطح خاک شده است. مقادیر نسبت بوون در سطح خاک بین ۰/۵- تا ۰/۵ به دست آمده است. مقادیر مثبت H_s در سطح خاک نشان‌دهنده انتقال گرما از سطح خاک به بالاست (Zeggaf *et al*., 2008). این در حالی است که نتایج بررسی حاضر نشان می‌دهد که درصد کمی از انرژی موجود صرف گرمای محسوس شده است. مشاهدات مزرعه‌ای از سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نشان می‌دهد که عمق نصب نوارهای آبیاری (۱۵ سانتی‌متر) باعث شده تا در زمان آبیاری رطوبت به سطح خاک برسد و سطح خاک را نیز مرطوب کند. علت بالا بودن سهم شار گرمای نهان در سطح خاک از انرژی کل موجود (۹۳ درصد) به مرطوب شدن سطح خاک ارتباط داده شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وقتی نوارهای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برای زراعت‌ها و یا باغ‌ها در عمق بیشتر نصب شود و رطوبت به سطح خاک نرسد، گرمای سطح خاک افزایش می‌یابد و سهم گرمای محسوس خاک از انرژی کل بیشتر می‌شود. یادآوری می‌شود که سهم هریک از فاکتورهای بیلان انرژی در مزرعه تابع عوامل مختلفی مانند برنامه‌ریزی آبیاری و شاخص سطح برگ است که می‌تواند در مراحل مختلف رشد متفاوت باشد.

زقف و همکاران (Zeggaf *et al*., 2008) سهم شار گرمای نهان و گرمای محسوس را در سطح خاک در سیستم آبیاری بارانی روی کشت ذرت برای یک روز نمونه با LAI=۰/۵۸ را به ترتیب ۵۲ و ۴۸ درصد عنوان کرده‌اند. محققان دیگری نیز مقدار شار گرمای نهان سطح خاک را در تاکستان بین ۲۹ تا ۴۷ درصد از R_{ns} گزارش کرده‌اند (Heilman *et al*., 1994).

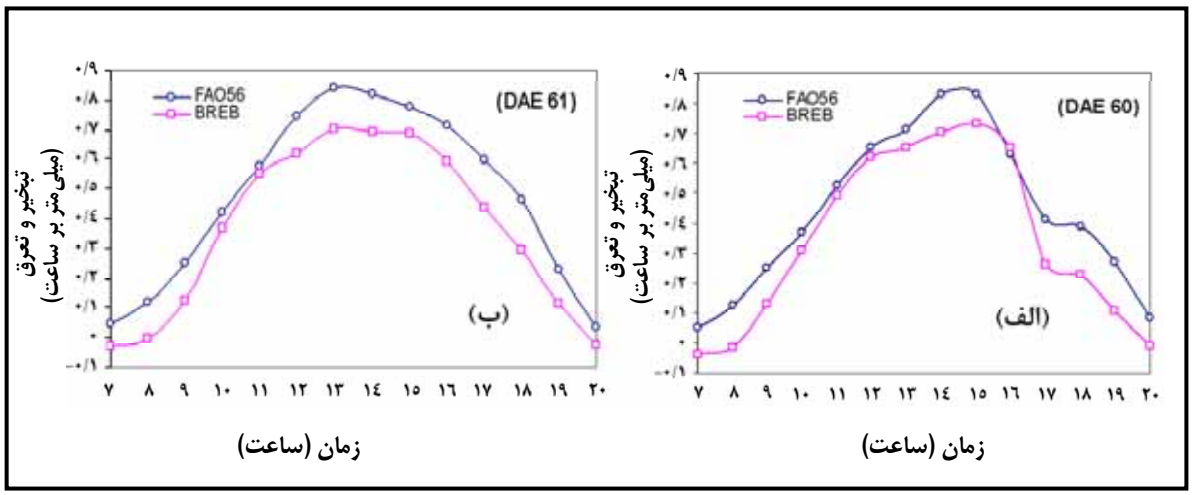
در سطح آسمانهٔ گیاهی جز در ساعات ابتدایی و انتهایی روز، مقدار شار گرمای نهان (λE_c) کمتر از مقدار انرژی موجود (R_{nc}) است (۸۱ درصد) به طوری که حدود ۱۹ درصد از انرژی صرف گرمای محسوس (H_c) شده است. این در حالیست که نتایج تحقیق زقف و همکاران (Zeggaf *et al*., 2008) نشان داد مقدار شار گرمای نهان در آسمانه گیاهی بیشتر از انرژی موجود بوده به طوری‌که ۳۲ درصد آن از طریق انتقال گرمای محسوس سطح خاک تامین شده است (مقادیر منفی H_c).

مقایسهٔ مقادیر تبخیر- تعرق محاسبه شده به روش پنمن- مانتیث و روش بیلان انرژی نسبت بوون

روند تغییرات روزانهٔ تبخیر-تعرق به دو روش پنمن-مانتیث و بیلان انرژی نسبت بوون در روز شصتم و شصت و یکم پس از کاشت در شکل ۳ نشان داده شده است. در این بررسی، روز شصتم نمایندهٔ روزی با درصدی از پوشش ابر در آسمان و روز شصت و یکم نمایندهٔ یک روز کاملاً آفتابی است. بقیهٔ روزها نیز روندی مشابه با روزهای فوق داشتند. نتایج آنالیز آماری نشان داد که $RMSE$= ۰/۱، ME= ۰/۰۷ و مقدار MAE= ۰/۰۱ است. بر همین اساس، تغییرات تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده با روش بیلان انرژی، نسبت به روش پنمن- مانتیث، برابر ۱۰ درصد است که می‌تواند قابل قبول باشد. در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود که هر دو روش تبخیر- تعرق را با روندی مشابه براورده می‌کنند و از همبستگی خوبی نیز برخوردارند (R^2=۰/۹۵). مقدار مثبت پارامتر ME نشان‌دهنده بیش تخمینی روش پنمن- مانتیث نسبت به روش بیلان انرژی است. اختلاف موجود بین مقادیر دو روش می‌تواند ناشی اندازه‌گیری‌های متفاوت پارامترهای مؤثر در دو روش باشد به طوری که در روش بیلان انرژی پارامترهای مورد نیاز مستقیماً در سطح خاک و بالای

آسمانه گیاهی اندازه‌گیری شده‌اند در حالی که در روش پنمن-مانتیث تخمینی از پارامترهای مؤثر از محدودهٔ آسمانه گیاهی و سطح خاک به طور تقریبی از طریق محاسبهٔ تبخیر- تعرق گیاه مرجع و ضریب گیاهی وارد محاسبات شده است.

اورتگا و همکاران (Ortega *et al*., 1995) نیز در تحقیقی مقادیر ساعتی تبخیر- تعرق به روش بیلان انرژی نسبت بوون را با مقادیر تبخیر-تعرق برآورده شده به روش پنمن مقایسه و همبستگی خوبی مشاهده کردند.



شکل ۳- تغییرات روزانهٔ تبخیر-تعرق به روش بیلان انرژی نسبت بوون (BREB) و روش پنمن- مانتیث (FAO56)، (الف) روز شصتم و (ب) روز شصت و یکم پس از کاشت

برآورد مقادیر میانگین روزانه تبخیر-تعرق و اجزای آن به روش بیلان انرژی نسبت بوون

مقادیر تبخیر-تعرق، جزء تبخیر، و جزء تعرق در دو مرحله اندازه‌گیری برحسب میلی‌متر در روز و همچنین سهم هر یک از دو جزء بر حسب درصد از تبخیر-تعرق کل و مقادیر متوسط عمق آب آبیاری در هر روز در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- مقادیر تبخیر-تعرق، تبخیر و تعرق به روش بیلان انرژی نسبت بوون

روز پس از کاشت	عمق آب آبیاری (میلی‌متر)	تبخیرتعرق (میلی‌متر بر روز)	تبخیر		تعرق	
			(میلی‌متر بر روز)	(درصد)	(میلی‌متر بر روز)	(درصد)
۴۱	۵/۴۷	-	۱/۲۸	-	-	-
۴۲	۶/۱۹	۴/۲۵	۱/۵۰	۳۵/۳	۲/۸	۶۴/۷
۴۳	۶/۱۹	۴/۳۵	۱/۱۰	۲۵/۳	۳/۳	۷۴/۷
۴۴	۶/۱۹	۵/۰۰	۱/۲۰	۲۴/۰	۳/۸	۷۶/۰
۵۹	۶/۷	۵/۰۰	۱/۰۰	۲۰/۰	۴/۰	۸۰/۰
۶۰	۶/۹	۴/۸۰	۰/۸۸	۱۸/۳	۳/۹	۸۱/۷
۶۱	۶/۹	۵/۱۰	۱/۰۰	۱۹/۶	۴/۱	۸۰/۴
۶۲	۶/۹	۵/۵۰	۰/۸۰	۱۴/۵	۴/۷	۸۵/۵

در روز چهل و یکم پس از کاشت، محاسبهٔ تبخیر- تعرق کل در این روز امکان‌پذیر نبود زیرا نسبت بوون در برخی ساعات روز نزدیک ۱- به دست آمد و طبق معادلهٔ ۳ برای تبخیر- تعرق مقدار نامتناهی به دست می‌آید، و لذا هیچ عددی برای این روز منظور نشده است. در جدول مشاهده می‌شودکه سهم جزء تعرق و نیز جزء تبخیر به طور میانگین در مرحلهٔ توسعهٔ گیاه به ترتیب ۷۵ و ۲۵ درصد و در مرحلهٔ میانی ۸۲ و ۱۸ درصد از تبخیر- تعرق کل است. نتایج، چنان‌که انتظار می‌رفت نشان می‌دهد که با کامل شدن رشد گیاه، سهم تلفات تبخیر از خاک کاهش می‌یابد و تعرق بیشتر می‌شود، چنان‌که در مرحله دوم اندازه‌گیری که گیاه تقریباً پوشش کاملی در سطح زمین ایجاد کرد (LAI=3.5)، تبخیر خاک حدود ۱۵-۲۰ درصد از تبخیر-تعرق کل را شامل شده است. به بیان دیگر، با رشد گیاه و بزرگتر شدن سطح برگ‌ها و سایه‌اندازی بیشتر مقدار انرژی رسیده به سطح خاک کمتر شده و تبخیر از سطح خاک نیز کاهش می‌یابد. مقایسه مقادیر آب آبیاری به کار رفته و تبخیر- تعرق صورت گرفته نشان می‌دهد گیاه در هیچ یک از روزها با تنش آبی مواجه نبوده بلکه مقداری از آب آبیاری نیز به صورت نفوذ عمقی به هدر رفته است.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف جداسازی اجزای تبخیر و تعرق در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به منظور بهره‌گیری بیشتر از منابع آب و انرژی اجرا شده است. به کارگیری روش بیلان انرژی نسبت بوون در سطح خاک و مزرعه توانست تبخیر- تعرق گیاه ذرت را به اجزای آن شامل تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه تقسیم کند. این روش، امکان بررسی هر یک از اجزای بیلان انرژی را در سطح مزرعه، آسمانهٔ گیاهی، و سطح خاک در مقیاس زمانی کوتاه فراهم کرد. بر اساس نتایج به دست آمده، در یک روز خاص از مراحل میانی رشد گیاه ذرت، از کل انرژی موجود در مزرعه (R_n-G) که می‌تواند صرف تبخیر- تعرق شود بخش کمی و تنها ۱۵ درصد صرف گرمای محسوس هوا و بقیه صرف تبخیر- تعرق شده است. شار گرمای ورودی به سطح خاک کمتر از ۱۰ درصد شار تابش خالص است. در طول روز مقدار شار گرمای نهان سطح خاک اندکی کمتر از مقدار انرژی موجود در سطح خاک است و به عبارتی دیگر درصد کمی از انرژی وارده شده به خاک صرف گرمای محسوس شده است که می‌تواند به علت مرطوب شدن سطح خاک در زمان آبیاری باشد. بر همین اساس زمانی که سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در عمق بیشتری نصب شود و رطوبت به سطح خاک نرسد، سهم گرمای محسوس خاک از انرژی کل بیشتر خواهد شد. در سطح آسمانهٔ گیاهی، حدود ۱۹ درصد از انرژی صرف گرمای محسوس (H_c) شده است. در مجموع، نتایج برآورد تبخیر- تعرق با دو روش پنمن-مانتیث و بیلان انرژی نسبت بوون همبستگی خوبی نشان می‌دهند و تغییرات روزانهٔ تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده با روش بیلان انرژی، در مقایسه با روش پنمن- مانتیث، ۱۰ درصد است.

قدردانی

راهنمایی‌های بی‌دریغ جناب آقای دکتر ادل تی زقف پژوهشگر مرکز تحقیقات مناطق خشک دانشگاه توتوری ژاپن، راهنمایی‌ها و همکاری‌های کارشناسان ادارهٔ کل فنی و عملیاتی سازمان هواشناسی کشور، و همکاری‌های کارشناسان بخش‌های آبیاری تحت فشار و ماشین آلات کشاورزیِ مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی در راه‌اندازی و اجرای این تحقیق سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop requirements. Irrig. Drain Paper No. 56. FAO. Rome, Italy.

Ashktorab, H., Pruitt, W. O. and Paw U, K. T. 1994. Partitioning of evapotranspiration using lysimeter and micro-bowen-ratio system. ASCE J. Irrig. Drain. 120(2): 450-464.

Ashktorab, H., Pruitt, W. O., Paw U, K. T. and George, W. V. 1989. Energy balance determination close to the soil surface using a micro-bowen ratio system. Agric. For. Meteorol. 46, 259-274

Boast, C. W. and Robertson, T. M. 1982. A micro-lysimeter method for determining evaporation from a bare soil: Description and laboratory evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J. 46, 689-696.

Bowen, I. S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface: In: Rosenberg, N. J. (Eds.) Microclimate: The Biological Environment. Wiley. New York.

Dehghanisanij, H., Yamamoto, T. and Rasiah, V. 2004. Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments. Agric. Water Manage. 64, 91-106.

Fritschen, L. J. and Shaw, R. H. 1961. Transpiration and evaporation of corn as related to meteorological factors. Agron. J. 53, 71-74.

Gardiol, J. M., Serio, L. A. and Della Maggiora, A. I. 2003. Modelling evapotranspiration of corn (Zea mays) under different plant densities. J. Hydrol. 271, 188-196.

Ham, J. M., Heilman, J. L. and Lascano R. J. 1990. Determination of soil water evaporation and transpiration from energy balance and stem flow measurements. Agric. For. Meteorol. 59, 287-301.

Ham, J. M., Heilman, J. L. and Lascano, R. J. 1991. Soil and canopy energy balances of a row crop at partial cover. Agron. J. 83, 744-753.

Harrold, L. L., Peters, D. B., Driebelbis, F. R. and Mc-Guiness, J. L. 1959. Transpiration evaluation of corn grown on a plastic-covered lysimeter. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 23, 174-178.

Heilman, J. L., Brittin, C. L. and Neale, C. M. U. 1989. Fetch requirements of Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. Agric. For. Meteorol. 44, 261-273.

Heilman, J. L., McInnes, K. J., Savage, M. J., Gesch, R. W. and Lascano, R. J. 1994. Soil and canopy energy balances in a west Texas vineyard. Agric. For. Meteorol. 71, 99-114.

Jara, J., Stockle, C. O. and Kjelgard, J. 1998. Measurement of evapotranspiration and its components in a corn (Zea Mays L.) field. Agric. For. Meteorol. 92, 131-145.

Kato, T., Kimura, R. and Kamichica, M. 2004. Estimation of evapotranspiration, transpiration ratio and water use efficiency from a sparse canopy using a compartment model. Agric. Water Manage. 65, 173-191.

Lascano, R. J. 2000. A general system to measure and calculate daily crop water use. Agron. J. 92, 821-832.

Ortega, F., Samuel O., Richard, H., Cuenca, M. and Englis. 1995. Hourly grass evapotranspiration in modified maritime environment. J. Irrig. Drain. ASCE. 121(6): 369-373.

Perez, P. J., Castellvi, F., Ibanez, M. and Rosell, J. I. 1999. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. Agric. For. Meteorol. 97, 141-150.

Peters, D. B. and Russell, M. B. 1959. Relative water losses by evaporation and transpiration in field corn. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 23, 170-173.

Pourbanadcouki, N. 2009. Impact of different irrigation levels, plant density and row spacing on yield and water productivity of corn (ksc 700) using subsurface drip irrigation (SDI, T-Tape). M.Sc. Thesis of Uremia University. (in Farsi)

Ritchie, J. T. 1971. Dryland evaporation flux in a sub-humid climate: I. Micrometeorological influences. Agron. J. 63, 51-55.

Sakuratani, T. 1987. Studies on evapotranspiration from crops. (2) Separate estimation of transpiration and evaporation from a soybean field without water shortage. In: Ham, J. M.(Eds.) Determination of soil water evaporation and transpiration from energy balance and stem flow measurements. Agric. For. Meteorol. 59, 287-301.

Sauer, T. J., Singer, J. W., Prueger, J. H., DeSutter, T. M. and Hatfield, J. L. 2007. Radiation balance and evaporation partitioning in a narrow-row soybean canopy. Agric. For. Meteorol. 145, 206-214.

Shaw, R. H. 1959. Water use from plastic-covered and uncovered corn plots. Agron. J. 51, 172-173

Shawcroft, R. W. and Gardner, M. H. 1983. Direct evaporation from soil under a row crop canopy. Agric. Meteorol. 28, 229-238.

Steduto, P. and Hsiao, T. C. 1998. Maize canopies under two soil water regimes: I. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy conductance. Agric. For. Meteorol. 89, 169-184.

Uchijima, Z. 1976. Maize and rice. In: Zeggaf, T. A. (Eds.) A Bowen Ratio Technique for partitioning energy fluxes between Maize transpiration and soil surface evaporation. Agron. J. 100, 1-9.

Wallace, J. S., Lloyd, C. R. and Sivakumar, M. V. K. 1993. Measurement of soil, plant and total evaporation from millet in Niger. Agric. For. Meteorol. 63, 149-169.

Zeggaf, T. A., Takeuchi, S., Dehghanisanij, H., Anyoji, H. and Yano, T. 2008. A Bowen ratio technique for partitioning energy fluxes between maize transpiration and soil surface evaporation. Agron. J. 100, 1-9.

Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.11/No.3/2010/P: 71-86

Evapotranspiration Partitioning Using the Bowen Ratio Energy Balance Method in a Sub-Surface Drip Irrigation System

H. Kosari*, H. Dehghanisanij, F. Mirzaei and A. M. Liaghat

* Corresponding Author: M.Sc. Student, Tehran University, P. O. Box: 4111, Karaj, Iran. E-mail: hk_kosari@yahoo.com

Applied and precise methods of evapotranspiration partitioning provide useful data for farm irrigation management and water use efficiency improvement. This knowledge is particularly important for modern irrigation systems that require high cost for implementation. Therefore, research was conducted in the summer of 1388 in the field at the Agricultural Engineering Research Institute in Karaj in which maize evapotranspiration and soil surface evaporation components were measured simultaneously using the Bowen ratio energy balance (BREB) method. Crop transpiration was then calculated by calculating the difference between these values. Soil type in the experimental field was loam texture irrigated with sub-surface drip irrigation installed 15 cm below the soil surface. Irrigation was scheduled to reduce water stress in the maize crop. Data for the BREB method were collected from above canopy level, at canopy level and at the soil surface. Results for a sample day of a mid-season crop growth period (day 60) showed that, of the total available energy for evapotranspiration, only 15% was used as sensible heat while the rest was used as evapotranspiration. Soil heat flux was less than 10% of net radiation, of which 93% of available energy was used as soil evaporation. At canopy level, about 19% of the available energy was used as sensible heat. A comparison between hourly values of evapotranspiration measured by the BREB and Penman-Monteith methods showed good correlation (R^2 = 0/95) where BREB evapotranspiration showed 10% variation as compared to the Penman-Montieth method.

Key Words: Bowen Ratio Energy Balance, Evaporation, Partitioning, Subsurface Drip Irrigation, Transpiration