تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۲، شماره ۵، مرداد ۱۴۰۰ (ص ۱۲۳۷-۱۲۲۳)
DOI: 10.22059/ijswr.2021.316676.668865
(علمی – پژوهشی)

Determination of Silage Maize Crop Coefficient under Pulsed Drip Irrigation using Water Balance Method in Varamin

SANAZ MOHAMMADI[1], SEYED MAJID MIRLATIFI[1*], MEHDI HOMAEE[1], HOSSEIN DEHGHANISANIJ[2], IMAN HAJIRAD[1]

1. Water Management and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

(Received: Jan. 11, 2021- Revised: Jan. 26, 2021- Accepted: Apr. 3, 2021)

ABSTRACT

Due to the scarcity of water around the world especially in arid and semi-arid regions, accurate determination of crop water requirement is essential for proper irrigation planning and management. One of the common methods for estimating crop evapotranspiration is the use of reference evapotranspiration and crop coefficient (Kc) (or the FAO-56 Kc-ETo approach). Different climatic conditions, plant variety, and differences in crops, soils and irrigation management practices result in variations in crop coefficient for the same crop between the locations, therefore locally developed Kc values are necessary for more accurate estimation of crop evapotranspiration. The aims of this research were to estimate silage maize crop coefficient using water balance method under pulsed drip irrigation system during two growing seasons (spring and summer) and to develop an equation to calculate silage maize crop coefficient based on growing-degree-days in Varamin. Silage maize actual evapotranspiration based on water balance method was 465 and 373 mm for spring and summer growing seasons respectively. Silage maize crop coefficient for initial, mid and late growth stages of spring and summer growing seasons were calculated 0.24-0.27, 1.28-1.3 and 0.8-0.88 respectively. The results showed that using silage maize crop coefficient proposed by FAO-56 caused 8% underestimation in crop evapotranspiration. Significant difference ($P < 0.05$) was found between $ET_{c\,(FAO)}$ and $ET_{c,a}$, while using the equation presented in this study estimates silage maize evapotranspiration reasonably well, with the mean absolute error (MAE) of 0.53 mm/day, the root mean square error (RMSE) of 0.7 mm/day and the agreement index (d) of 0.98. Therefore, using developed regionally based and growth-stage-specific Kc helps in irrigation management and provides precise water applications for this region.

Keywords: Actual Evapotranspiration, Crop Water Requirement, FAO-Penman-Monteith, Growing-Degree-Days, Soil Moisture Monitoring.

* Corresponding Author's Email: Mirlat_m@modares.ac.ir

تعیین ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای در سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی به‌روش بیلان آب خاک در منطقه ورامین

ساناز محمدی[۱]، سید مجید میرلطیفی[۱*]، مهدی همایی[۱]، حسین دهقانی سانیج[۲]، ایمان حاجی‌راد[۱]

۱. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۷- تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱/۱۴)

چکیده

باتوجه به کمبود منابع آب در جهان به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تعیین دقیق تبخیر-تعرق گیاه به‌منظور برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح آبیاری در مزرعه ضروری است. یکی از روش‌های معمول برآورد تبخیر-تعرق گیاه، استفاده از پارامترهای تبخیر-تعرق گیاه مرجع و ضریب گیاهی است. پارامتر K_c بسته به واریته گیاهی، شرایط آب و هوایی، نوع مدیریت آب و خاک و گیاه می‌تواند متغیر باشد بنابراین، برای برآورد هرچه دقیق‌تر تبخیر-تعرق گیاه نیاز به استفاده از ضرایب گیاهی محلی است. هدف از این تحقیق تعیین ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای تحت یک سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی به روش بیلان آب خاک و ارائه معادله برآورد ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای بر اساس درجه-روز-رشد برای دو دوره رشد بهاره و تابستانه در منطقه ورامین است. بدین منظور تبخیر-تعرق واقعی ذرت علوفه‌ای به‌روش بیلان آب خاک طی دو دوره رشد بهاره و تابستانه به ترتیب برابر با ۴۶۶ و ۳۷۳ میلی‌متر تعیین و سپس پارامتر ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای بر اساس آن ($K_{c\,(WB)}$) برای مرحله ابتدایی، میانی و انتهایی دو دوره رشد بهاره و تابستانه به ترتیب ۰/۲۴-۰/۲۷، ۱/۲۸-۱/۳ و ۰/۸-۰/۸۸ به‌دست آمد. نتایج نشان داد که استفاده از مقادیر ($K_{c\,(FAO)}$) در برآورد تبخیر-تعرق ذرت علوفه‌ای باعث حدود ۸ درصد کم‌برآورد نسبت به مقادیر $ET_{c,a}$ می‌شود. هم‌چنین نتایج آزمون تی‌استیودنت نیز بیان‌گر اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین مقادیر $ET_{c\,(FAO)}$ و $ET_{c,a}$ بود، درحالی‌که استفاده از معادله درجه سوم ارائه شده در این پژوهش مقادیر تبخیر-تعرق ذرت علوفه‌ای را با دقت قابل قبولی (RMSE=0.7 , MAE=0.53, d=0.98) در منطقه مطالعاتی برآورد می‌کند. بنابراین استفاده از مقادیر ضرایب گیاهی محلی بر مبنای مراحل رشد گیاه باعث مدیریت صحیح آبیاری و کاربرد دقیق‌تر آب آبیاری در منطقه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق واقعی، پایش رطوبت خاک، فائو-پنمن-مانتیث، درجه-روز-رشد، نیاز آبی گیاه.

مقدمه

برآورد دقیق تبخیر-تعرق گیاه به‌همراه یک برنامه‌ریزی آبیاری مناسب می‌تواند مدیریت استفاده از منابع آبی را بهبود بخشد، ضمن این‌که برای تدوین معیارهای مدیریت آبیاری فصلی، تخصیص آب، تخمین بلندمدت وضعیت منابع آبی، عرضه و تقاضای آب و مدیریت بیلان آب ضروری است (Irmak and Irmak, 2008). اندازه‌گیری دقیق پارامتر تبخیر-تعرق گیاه به‌روش‌های لایسیمتر وزنی، ادی کوواریانس[۱] و بیلان انرژی (نسبت باون[۲]) قابل انجام است ولی کاربرد عملی و گسترده این روش‌ها عمدتاً به علت هزینه‌های بالا و نیاز به نیروهای متخصص جهت نصب و نگهداری تأسیسات و تفسیر داده‌های حاصل محدود است. علاوه بر روش‌های مذکور پارامتر تبخیر-تعرق گیاه را می‌توان با استفاده از روش بیلان آب[۳] به‌طور مستقیم تعیین کرد یا با روش ساده‌تر و غیرمستقیم نشریه فائو-۵۶ به‌دست آورد (Doorenbos, 1975; Allen *et al.*, 1998).

در روش بیلان آب تمامی اجزای معادله بیلان به‌جز پارامتر تبخیر-تعرق واقعی گیاه، اندازه‌گیری شده و پارامتر تبخیر-تعرق واقعی گیاه به‌عنوان جزء باقی‌مانده‌ی معادله بیلان آب تعیین می‌گردد. در روش نشریه فائو-۵۶ مقدار تبخیر-تعرق گیاه از حاصل-ضرب تبخیر-تعرق گیاه مرجع در پارامتر ضریب گیاهی برآورد می‌شود (Allen *et al.*, 1998). مقدار ضریب گیاهی برای یک گیاه مشخص به علت اختلاف در واریته گیاهی، ویژگی‌های خاک، روش و دور آبیاری، آب و هوا و به‌ویژه شیوه‌های مدیریت محصول می‌تواند در موقعیت‌ها و مکان‌های مختلف متفاوت باشد. استفاده

* نویسنده مسئول: Mirlat_m@modares.ac.ir

1. Eddy Covariance
2. Bowen Ratio
3. Water Balance Method

از مقادیر ضرایب گیاهی گزارش شده در مطالعات انجام شده قبلی در صورتی که شرایط رشد گیاه، متفاوت با منطقه‌ای باشد که مطالعات قبلی در آن انجام شده است، ممکن است باعث ایجاد خطا در برآورد تبخیر-تعرق گیاه گردد. بنابراین برای برآورد هرچه دقیق‌تر پارامتر تبخیر-تعرق گیاه به روش فائو نیاز به استفاده از ضرایب گیاهی محلی است (Payero *et al.*, 2011).

شرایط محیطی مختلف به‌خصوص تفاوت قابل توجه در نوع خاک، گیاه و عملیات مدیریت آبیاری بین مناطق گوناگون باعث انتخاب تاریخ کشت متفاوت و رقم‌های کشت مختلف با دوره‌های رشد متفاوتی می‌گردد که بر روی پارامتر ضریب گیاهی موثر است. درنتیجه باعث ایجاد تفاوت در مقادیر ضرایب گیاهی برای یک محصول یکسان در مکان‌های کشت مختلف می‌گردد. به‌عنوان مثال Piccinni *et al.* (2009) حدود ضریب گیاهی ذرت تحت سیستم آبیاری بارانی لپا را برای منطقه تگزاس امریکا ۰/۲-۱/۲ گزارش کردند. پژوهشگران اظهار داشتند که مقادیر ضرایب گیاهی به‌دست آمده در این پژوهش در مرحله میانی رشد کم‌تر و در مرحله پایانی رشد بیش‌تر از مقادیر ضرایب گیاهی پیشنهادی نشریه فائو-۵۶ بود. Gao *et al.* (2009) مقدار متوسط ضریب گیاهی ذرت بهاره تحت سیستم آبیاری سطحی را در چین در ابتدا، اواسط و اواخر فصل رشد به ترتیب ۰/۳۶-۰/۳۷، ۱/۱۸-۱/۱۹ و ۰/۲۲-۰/۲۸ گزارش کردند. Kang *et al.* (2003) نیز مقدار متوسط سالانه، حداقل و حداکثر ضریب گیاهی ذرت را در منطقه‌ای نیمه‌خشک در شمال‌غربی چین ۱/۰۴، ۰/۴۵ و ۱/۴۳ گزارش کردند.

تفاوت در مقادیر ضرایب گیاهی باعث ایجاد اختلاف در مقادیر تبخیر-تعرق برآوردی گیاه در مقایسه با مقادیر تبخیر-تعرق واقعی گیاه می‌شود. Djaman and Irmak (2013) مقدار تبخیر-تعرق واقعی ذرت تحت سیستم آبیاری سنترپیوت را در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ با استفاده از روش بیلان آب ۶۲۰ و ۶۳۵ میلی‌متر و مقدار تبخیر-تعرق برآوردی ذرت به‌روش نشریه فائو-۵۶ را ۷۳۲ و ۷۶۶ میلی‌متر گزارش کردند که بیان‌گر اختلاف ۱۸ و ۲۱ درصدی طی دو سال بین دو روش مورد استفاده بود. Djaman *et al.*, (2018) نیاز آبی ذرت تحت سیستم آبیاری سنترپیوت را در شرایط استفاده از ضریب گیاهی محلی ۶۴۱ میلی‌متر و درصورت استفاده از ضریب گیاهی پیشنهادی فائو ۷۳۰ میلی‌متر گزارش کردند. Irmak *et al.*, (2008) عملکرد ضعیف روش فائو در برآورد تبخیر-تعرق گیاه را به عدم قطعیت موجود در مقادیر ضریب گیاهی نسبت دادند و بیان کردند در مواقعی که تلفات گرمای محسوس قابل توجه است و اغلب در اوایل و اواخر فصل رشد به‌علت نبود پوشش گیاهی کافی رخ می‌دهد، استفاده از روش فائو مناسب نیست. آن‌ها هم‌چنین دلیل دیگر اختلاف روش فائو و بیلان آب را استفاده از ضرایب گیاهی ثابت در روش فائو برای مراحل اولیه، توسعه، میانی و انتهایی رشد گیاه بیان کردند، در حالی‌که می‌دانیم در واقعیت این مقادیر در مراحل مختلف رشد عددهای ثابتی نیستند.

Dehghanisanij *et al.*, (2020) تبخیر-تعرق ذرت علوفه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴ تحت سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی را با استفاده از لایسی‌متر ۴۲۳/۴ میلی‌متر در منطقه کرج اندازه-گیری کردند. پژوهشگران میانگین ضریب گیاهی ذرت را در طول دوره رشد ۰/۴۷ و حداکثر و حداقل آن را ۱/۵۲ و صفر گزارش کردند. Dadkhah, (2017) میانگین دو ساله ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴ با دوره رشد ۹۰ روزه تحت سیستم آبیاری قطره‌ای را بر اساس معادله بیلان آب در مراحل اولیه، توسعه، میانی و نهایی رشد به ترتیب ۰/۴۹، ۰/۹۳، ۱/۱۲ و ۰/۸۲ گزارش کرد. نتایج پژوهش مذکور نشان داد که استفاده از ضریب گیاهی ارائه شده در نشریه فائو به‌جای ضریب گیاهی محلی برای محاسبه تبخیر-تعرق ذرت باعث بیش‌برآورد ۱۰ درصدی می‌شود. Ghorbanian *et.*, (2016) نیز مقدار حداقل و حداکثر ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای را با استفاده از روش بیلان آب درون میکرولایسیمتر زهکش‌دار برای یک دوره رشد ۹۲ روزه در منطقه اصفهان به ترتیب ۰/۲۵ و ۱/۳۲ گزارش کردند که ۸ و ۶۴ روز پس از کشت اتفاق افتاد.

نتایج پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهد که استفاده از ضرایب گیاهی پیشنهادی در نشریه فائو-۵۶ می‌تواند باعث ایجاد خطا در برآورد نیاز آبی گیاه گردد. هدف از انجام پژوهش حاضر برآورد ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای در مراحل مختلف رشد به روش بیلان آب خاک برای تعیین هرچه دقیق‌تر نیاز آبی گیاه ذرت علوفه‌ای تحت سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی در منطقه خشک و نیمه‌خشک ورامین می‌باشد. هم‌چنین معادله ساده و کاربردی برای برآورد ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای در منطقه مطالعاتی ارائه گردید که برخلاف معادلات ارائه شده در پژوهش‌های قبلی که معمولا براساس روزهای پس ازکشت می‌باشد، معادله مذکور بر اساس پارامتر درجه-روز-رشد بوده و قابل استفاده برای تاریخ‌های کشت مختلف با دوره‌های رشد متفاوت است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

پژوهش حاضر در سال زراعی ۱۳۹۸ در زمینی به مساحت ۱۳۰۰ مترمربع واقع در مزرعه مجموعه دامپروری صفاری در منطقه ورامین اجرا شد. طول و عرض جغرافیایی محل اجرای آزمایش به

ترتیب "۴۲/۸ ′ ۴۱ °۵۱ شرقی و "۵۱/۹ ′ ۱۹ °۳۵ شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۹۳۳ متر است. مقادیر متوسط ماهیانه پارامترهای اقلیمی منطقه مطالعاتی در هر دو دوره رشد در جدول (۱) ارائه شده است که مربوط به ایستگاه هواشناسی ورامین واقع در هشت کیلومتری محل اجرای طرح است. تیرماه با میانگین دمای هوای ۴۱/۹ درجه سانتی‌گراد گرم‌ترین و فروردین با میانگین دمای هوای ۲۱/۴ درجه سانتی‌گراد سردترین ماه در طی دو دوره رشد بودند. بافت خاک به روش هیدرومتری از طریق نمونه‌برداری تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک تعیین شد (جدول ۲).

کشت ذرت با استفاده از دستگاه بذرکار پنوماتیک به‌صورت دو ردیفه با فاصله ۳۰ سانتی‌متر به طول ۱۰ متر انجام شد. فاصله از وسط هر کشت دو ردیفه تا منطقه متناظر در کشت دو ردیفه مجاور ۱۴۰ سانتی‌متر بود. تراکم کشت به‌صورت ۱۲ بوته در هر مترمربع بود. تقویم زراعی مربوط به هر دو دوره رشد در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۱- متوسط ماهیانه پارامترهای اقلیمی منطقه مطالعاتی در طی دو دوره رشد مربوط به ایستگاه هواشناسی ورامین در سال ۱۳۹۸

ماه‌های سال	حداکثر دمای هوا (°C)	حداقل دمای هوا (°C)	متوسط دمای هوا (°C)	حداکثر رطوبت نسبی (٪)	حداقل رطوبت نسبی (٪)	متوسط رطوبت نسبی (٪)	متوسط سرعت باد (m/s)
فروردین	۲۱/۴	۸/۳	۱۴/۹	۸۱/۱	۳۶/۴	۵۸/۸	۱/۸
اردیبهشت	۲۸/۷	۱۲/۴	۲۰/۶	۶۰/۲	۲۲/۵	۴۱/۳	۲/۱
خرداد	۳۶/۸	۱۸/۶	۲۷/۷	۴۹/۳	۱۶/۳	۳۲/۸	۱/۸
تیر	۴۱/۹	۲۴/۱	۳۳	۴۱/۲	۱۳/۲	۲۵/۵	۲/۶
مرداد	۴۰/۵	۲۲/۳	۳۱/۴	۴۰	۱۳/۹	۲۶/۹	۱/۸
شهریور	۳۶/۱	۱۸	۲۷	۴۹/۲	۲۱/۴	۳۵/۳	۱/۶
مهر	۳۰/۷	۱۳/۶	۲۲/۱	۵۹/۴	۲۰/۳	۳۹/۸	۱/۳

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه مورد مطالعه

عمق خاک (cm)	شن (%)	رس (%)	سیلت (%)	بافت خاک	چگالی ظاهری (gr/cm^3)	رطوبت حجمی ظرفیت زراعی (%)	رطوبت حجمی پژمردگی دائم (%)	رطوبت در دسترس حجمی (%)
۰-۳۰	۳۸	۲۷	۳۵	لوم	۱/۴۹	۳۶	۱۳/۷	۲۲/۳
۳۰-۶۰	۳۶	۲۳	۴۱	لوم	۱/۵۱	۳۱	۱۷/۵	۱۳/۵
۶۰-۱۰۰	۳۵	۲۶	۳۹	لوم	۱/۵۱	۳۴	۱۵/۳	۱۸/۷

جدول ۳- تقویم زراعی منطقه مطالعاتی

دوره رشد	تاریخ کشت	تاریخ برداشت	رقم کشت شده ذرت
بهاره	۲۵ فروردین	۲۵ تیر	ZP 606
تابستانه	۳۰ تیر	۱ آبان	ZP 606

مدیریت آب و گیاه

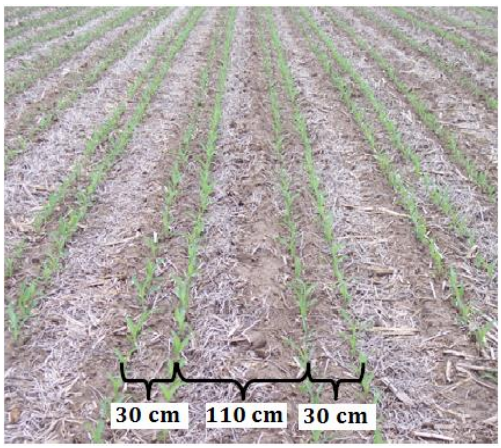
آزمایش به‌صورت طرح اسپلیت پلات در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای مدیریت پالسی در چهار سطح شامل اعمال عمق آب آبیاری در یک، دو، سه و چهار پالس (P1, P2, P3, P4) و تیمار مدیریت زمان‌بندی قطع جریان در دو سطح شامل یک برابر و سه برابر مدت زمان وصل جریان (T1, T3) اجرا گردید. جزئیات مربوطه به تیمارهای مورد بررسی در مقاله Mohammadi *et al.*, 2020 ارائه شده است. هر تیمار شامل چهار خط دو ردیفه کشت بود که لترال‌های آبیاری وسط هر کشت دو ردیفه قرار داشت (شکل ۱). لوله‌های آبیاری قطره‌ای مجهز به قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار با دبی ۳/۴ لیتر در ساعت و به فاصله ۵۰ سانتی‌متر بود. منبع تأمین آب چاه‌های اطراف مزرعه بود که با عبور از سیستم فیلتراسیون وارد شبکه توزیع آب در مزرعه می‌گردید. کود نیتروژن به روش کود آبیاری به مقدار ۱۸۴ کیلوگرم در هکتار در طی فصل رشد به‌صورت تقسیطی در چهار مرحله از طریق سیستم آبیاری به‌طور یکسان در اختیار تمام تیمارهای آزمایشی قرار گرفت. به‌منظور اطمینان از جوانه‌زنی اولین آبیاری بلافاصله بعد از کشت انجام شد. تمام تیمارهای آبیاری تا زمان سبز شدن کامل مزرعه به‌طور یکسان آبیاری شدند و تیمارهای آزمایشی از روز بیستم پس از کشت اعمال شد. دور آبیاری مورد استفاده در این پژوهش ثابت و دو روز انتخاب گردید که برای تمام تیمارها به‌صورت یکسان اعمال شد.

اندازه‌گیری رطوبت خاک

برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در طی مراحل مختلف رشد از دستگاه پروفایل پروب[1] مدل (Delta-T Devices, PR2/6 Cambridge, UK) که قبلاً در خاک مزرعه واسنجی شده بود،

1. Profile Probe

استفاده گردید. لوله‌های دسترسی دستگاه در وسط دو ردیف کشت (محل قرارگیری لوله‌های لترال آبیاری) تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک برای تیمارهای مختلف نصب گردید و اندازه-گیری رطوبت در عمق‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی-متری از سطح خاک قبل از هر آبیاری انجام شد.



شکل ۱- آرایش کشت دو ردیفه ذرت علوفه‌ای در منطقه مطالعاتی

مقادیر ضریب گیاهی برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه معمولاً در شرایطی تعیین می‌گردد که گیاه از نظر دسترسی به رطوبت کافی محدودیتی نداشته باشد. در این پژوهش، خاک مزرعه در شرایط رطوبتی مناسبی قرار داشت و مشکلی از نظر شوری خاک یا غرقاب شدن وجود نداشت. اگرچه از نظر تئوری آب تا حد نقطه پژمردگی برای گیاه قابل دسترس است اما جذب آب توسط ریشه گیاه قبل از رسیدن به نقطه پژمردگی به‌طور محسوس کاهش می‌یابد. در منطقه‌ای که خاک به اندازه کافی مرطوب باشد، آب به‌سرعت در اختیار گیاه قرار می‌گیرد تا تقاضای اتمسفری گیاه تأمین شود و در این حالت مقدار آب برداشت شده از خاک برابر تبخیر-تعرق گیاه خواهد بود. زمانی که رطوبت موجود در خاک از یک حد آستانه کم‌تر شود، آب موجود در خاک نمی‌تواند با سرعت کافی در اختیار ریشه گیاه قرار گیرد تا به تقاضای تعرق گیاه پاسخ دهد درنتیجه گیاه وارد تنش می‌شود. مقداری از کل رطوبت موجود در خاک که بدون تنش در اختیار ریشه گیاه قرار می‌گیرد، آب سهل‌الوصول[1] نامیده می‌شود. در این پژوهش طبق توصیه نشریه فائو برای گیاه ذرت علوفه‌ای حدود ۵۵٪ از کل آب قابل‌دسترس[2] خاک به‌عنوان رطوبت سهل‌الوصول در نظر گرفته شد (Allen *et al*, 1998).

درجه-روز-رشد

واحد حرارتی[3] که به‌صورت جمع تجمعی درجه-روز-رشد[4] بیان می‌شود، اغلب برای توصیف زمان‌بندی فرآیندهای بیولوژیکی استفاده می‌گردد. به کمک این پارامتر طول دوره یک فرآیند یا زمان لازم برای رسیدن به یک مرحله فنولوژیکی رشد گیاه، به جای تعداد روزها بر حسب درجه-روز-رشد بیان می‌شود (Raes *et al.*, 2018):

$$\mathrm{GDD} = \left(T_{avg} - T_{base}\right) \quad \text{(رابطه ۱)}$$

در این معادله GDD درجه-روز-رشد (°C day)، T_{avg} میانگین دمای هوای روزانه (°C) و T_{base} دمای پایه رشد (°C) است. دمای پایه رشد[5] حداقل درجه حرارت لازم برای شروع رشد گیاه است که در دماهای کم‌تر از آن رشد گیاه متوقف می‌گردد (برای ذرت ۱۰ °C). حداکثر درجه حرارتی که با افزایش دمای هوا بیش از آن درجه حرارت، رشد محصول افزایش نمی‌یابد نیز آستانه درجه حرارت بالا[6] نامیده می‌شود (برای ذرت ۳۰ °C). برای محاسبه میانگین دمای هوا در رابطه (۱) از معادله زیر استفاده می‌شود (Raes *et al.*,2018):

$$T_{avg} = \frac{T^*_{max} + T^*_{min}}{2} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در این معادله T_{avg} میانگین دمای هوای روزانه (°C)، T^*_{max} حداکثر دمای هوای روزانه اصلاح شده (°C)، T^*_{min} حداقل دمای هوای روزانه اصلاح شده (°C) است. در صورتی‌که مقدار حداکثر یا حداقل دمای هوای روزانه بیش‌تر از مقدار آستانه درجه حرارت بالا یا کم‌تر از دمای پایه رشد باشد، مقدار آن‌ها به ترتیب برابر با مقدار آستانه درجه حرارت بالا یا مقدار دمای پایه رشد لحاظ می‌شود، در غیر این‌صورت از مقادیر معمول این پارامترها استفاده می‌گردد و نیاز به اصلاح مقادیر نیست.

ضریب گیاهی برای گیاهان یک‌ساله معمولاً در پژوهش‌های مختلف بر اساس تابعی از روزهای پس از کشت گزارش می‌شود. این روابط متغیر بودن زمان کاشت تا جوانه‌زنی گیاه را در نظر نمی‌گیرند درحالی که مقدار ضریب گیاهی در این بازه زمانی با توجه به نوع مدیریت آبیاری و شرایط اقلیمی می‌تواند بسیار متفاوت باشد (Bastidas *et al.*, 2008). مدت زمان بین کاشت تا جوانه‌زنی گیاه با توجه به شرایط خاک، آب و هوا، تاریخ کاشت، عملیات خاک‌ورزی، عمق کاشت و رقم بذر می‌تواند متفاوت باشد. بیش‌ترین تاثیر شرایط آب و هوایی نیز در اوایل دوره رشد گیاه است که پایین بودن دمای هوا و سرد بودن خاک می‌تواند جوانه-زنی گیاه را با تأخیر همراه کند، بنابراین لحاظ نکردن مراحل ابتدایی رشد در روابط مذکور می‌تواند دقت برآورد ضریب گیاهی را افزایش دهد (Irmak *et al.*, 2013).

1. Readily Available Water (RAW)
2. Total Available Water (TAW)
3. Thermal Unit
4. Growing Degree Days
5. Base Temperature
6. Upper Temperature Threshold

هم‌چنین در روابطی که ضریب گیاهی به‌صورت تابعی از زمان ارائه می‌شود فاکتورهای محیطی از قبیل دمای هوا، طول روز و فاکتورهای مدیریتی گیاه که اغلب بر نرخ رشد و توسعه گیاه موثر هستند، در نظر گرفته نمی‌شوند. بنابراین استفاده از پارامتری که بتواند این تغییرات را در معادلات لحاظ کند، مناسب‌تر بوده و باعث افزایش دقت در برآورد ضریب گیاهی می‌شود. بنابراین روش مناسب‌تر برای ارائه این‌گونه روابط این است که ضریب گیاهی را به‌طور مستقیم به مراحل رشد و توسعه گیاه مرتبط کنیم چراکه نرخ رشد و زوال گیاه مطابق با واریته گیاهی، شرایط اقلیمی، فصل کشت و عملیات مدیریتی می‌تواند متفاوت باشد (Trout and DeJonge, 2018). درگیاهانی که طول روز تأثیر زیادی بر رشد آن‌ها ندارد مانند ذرت ارائه روابط ضریب گیاهی به‌صورت تابعی از درجه-روز-رشد می‌تواند تنوعی که در مراحل رشد و توسعه گیاه به علت اختلاف در شرایط محیطی یا تاریخ کشت ایجاد می‌شود را لحاظ کند (Irmak *et al.*, 2005).

تبخیر-تعرق برآوردی ذرت علوفه‌ای

تبخیر-تعرق مرجع روزانه با استفاده از معادله فائو-پنمن-مانتیث و نرم افزار Ref-ET محاسبه گردید (Allen *et al.*, 1998):

(رابطه ۳)

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

در این معادله ET_o تبخیر-تعرق گیاه مرجع چمن $(mm.day^{-1})$، R_n تابش خالص $(Mj.m^{-2}.day^{-1})$ ، G شار گرمای خاک $(Mj.m^{-2}.day^{-1})$، T میانگین دمای هوا $(°C)$ ، U_2 سرعت باد $(m.s^{-1})$، e_a فشار بخار واقعی (KPa)، e_s فشار بخار اشباع (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع $(KPa.°C^{-1})$ ، γ ضریب رطوبتی $(KPa.°C^{-1})$ می‌باشد.

برای محاسبه تبخیر-تعرق برآوردی ذرت علوفه‌ای از روش نشریه فائو-۵۶ استفاده شد (Allen *et al.*, 1998):

(رابطه ۴)

$$ET_c = ET_o \times K_c$$

در این معادله ET_c تبخیر-تعرق برآوردی گیاه $(mm.day^{-1})$، ET_o تبخیر-تعرق گیاه مرجع چمن $(mm.day^{-1})$ و K_c ضریب گیاهی (بدون بعد) می‌باشد. در این رابطه تأثیر شرایط آب و هوایی مختلف در برآورد تبخیر-تعرق گیاه از طریق پارامتر تبخیر-تعرق گیاه مرجع و تأثیر ویژگی‌های گیاهی و مدیریت آبیاری در مزرعه از طریق پارامتر ضریب گیاهی لحاظ شده است.

تبخیر-تعرق واقعی ذرت علوفه‌ای

به‌منظور تعیین تبخیر-تعرق واقعی ذرت علوفه‌ای در طی دوره رشد برای تیمارهای مختلف آبیاری از معادله بیلان آب در خاک استفاده شد (Allen *et al.*, 1998):

(رابطه۵) $$ET_{c,a} = I_{rrg} + P + CR - RO - DP \pm \Delta S$$

در این معادله $ET_{c,a}$ تبخیر-تعرق واقعی گیاه (mm)، I_{rrg} عمق آب آبیاری (mm)، P بارندگی مؤثر (mm)، CR صعود مویینه از سطح ایستابی به منطقه توسعه ریشه گیاه (mm)، RO رواناب سطحی (mm)، DP آب خروجی از منطقه توسعه ریشه گیاه به‌صورت نفوذ عمقی (mm) و ΔS تغییرات رطوبت خاک در منطقه توسعه ریشه گیاه (mm) می‌باشد. با توجه به این‌که در مزرعه مطالعاتی سطح ایستابی در عمق بیش از ۳۰ متری از سطح خاک قرار داشت از مقدار صعود مویینه در معادله بیلان آب صرف‌نظر شد. هم‌چنین با توجه به شیب بسیار کم کرت‌های آزمایشی، نفوذپذیری مناسب خاک و استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای از مقدار رواناب سطحی نیز صرف‌نظر گردید. در طی هر دو دوره رشد در منطقه مطالعاتی بارندگی مؤثر ثبت نگردید. برای محاسبه تغییرات رطوبت خاک در منطقه توسعه ریشه گیاه از مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه رطوبت‌سنج قبل از انجام هر آبیاری استفاده گردید. مقدار رطوبت منتقل‌شده به زیر منطقه توسعه ریشه (۶۰ سانتی‌متری خاک) که از دسترس گیاه خارج می‌شود، به‌عنوان نفوذ عمقی در طی دوره رشد در نظر گرفته شد. برای محاسبه مقدار نفوذ عمقی از روش ارائه‌شده در نشریه فائو-۵۶ به شرح زیر استفاده گردید (Allen *et al.*, 1998):

(رابطه ۶)

$$DP_i = P_i + I_{rrg,i} - RO_i - SWD_{i-1} - \sum_{j=i}^{j=i+2} ET_{c,j}$$

در این معادله DP_i نفوذ عمقی در روز i ام (mm)، P_i بارندگی در روز i ام (mm)، $I_{rrg,i}$ عمق آب آبیاری در روز i ام (mm)، RO_i رواناب در روز i ام (mm)، SWD_{i-1} کمبود رطوبتی خاک تا حد ظرفیت زراعی در عمق توسعه ریشه گیاه در پایان روز i-1 ام (mm) و $ET_{c,j}$ مجموع تبخیر-تعرق برآوردی ذرت علوفه‌ای در روز i ام تا i+2 ام (mm) است که از معادله ۴ محاسبه گردید.

برای تعیین عمق آب آبیاری در طی دوره رشد گیاه از روش پایش رطوبت در خاک استفاده شد که با هدف جایگزین کردن کمبود رطوبتی خاک تا حد ظرفیت زراعی در محدوده توسعه ریشه گیاه با استفاده از معادله زیر محاسبه و اعمال گردید:

(رابطه ۷)

$$I_{rrg} = \left(\sum_{i=1}^{n}(\theta_{(FC)_i} - \theta_{(pre-irrg)_i}) \times D_i\right)/100$$

در این معادله I_{rrg} عمق آب آبیاری (mm)، θ_{FC} رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت زراعی (٪)، $\theta_{(pre-irrg)}$ رطوبت حجمی خاک قبل از آبیاری (٪)، D عمق توسعه ریشه گیاه (mm)،

n تعداد لایه‌های خاک در عمق توسعه ریشه گیاه و i شمارش‌گر تعداد لایه‌های خاک در عمق توسعه ریشه گیاه است.

ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای حاصل از روش بیلان آب ($K_{c\,(WB)}$)

ضریب گیاهی می‌تواند با توجه به دور آبیاری یا فراوانی بارندگی، نوع سیستم آبیاری و مدیریت گیاه خصوصاً در گیاهان ردیفی متفاوت باشد. ضریب گیاهی در واقع بیان‌گر اثر ترکیبی سه مشخصه اصلی است که گیاه کشت شده را از گیاه مرجع متمایز می‌کند: ارتفاع گیاه (موثر بر پارامتر زبری و مقاومت آئرودینامیکی)، مقاومت سطح گیاه و خاک (مربوط به سطح برگ، پوشش گیاهی سطح زمین، سن و شرایط برگ، درجه کنترل روزنه و رطوبت سطح خاک) و آلبیدوی سطح گیاه و خاک (متأثر از پوشش گیاهی سطح زمین و رطوبت سطح خاک) (Pereira *et al.*, 2020). برای محاسبه مقادیر ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای در منطقه مطالعاتی از مقادیر تبخیر-تعرق واقعی ذرت علوفه‌ای حاصل از روش بیلان آب استفاده گردید (Allen *et al.*, 1998):

$$K_{c\,(WB)} = \frac{ET_{c,a}}{ET_o} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

در این معادله $ET_{c,a}$ تبخیر-تعرق واقعی ذرت علوفه‌ای حاصل از روش بیلان آب ($mm.day^{-1}$) و ET_o تبخیر-تعرق گیاه مرجع چمن محاسبه شده به‌روش فائو-پنمن-مانتیث ($mm.day^{-}$) [1] از معادله ۳ است.

ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای پیشنهادی ($K_{c\,(FAO)}$) و اصلاح شده ($K_{c\,(FAO-adj)}$) نشریه فائو-۵۶

مقادیر پیشنهادی ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای در مراحل مختلف رشد در جدول ۱۲ نشریه فائو-۵۶ ارائه شده است ($K_{c\,(FAO)}$). بنا بر توصیه فائو این مقادیر تقریبی هستند و تنها برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه در مطالعات و برنامه‌ریزی مقدماتی باید مورد استفاده قرار گیرند. ضریب گیاهی موجود در این جدول در مرحله اولیه رشد برای چندین گیاه مختلف موجود در یک گروه (غلات)، مقدار ثابتی است. بنابراین به‌منظور افزایش دقت محاسبات باید مقدار ضریب گیاهی مرحله اولیه‌ی رشد اصلاح گردد. با توجه به توصیه نشریه فائو-۵۶ در صورتی‌که مقدار رطوبت نسبی و سرعت باد در ارتفاع ۲ متری در منطقه مطالعاتی به ترتیب غیر از مقادیر ۴۵٪ و ۲ متر در ثانیه باشد مقدار ضریب گیاهی مرحله میانی و انتهایی رشد نیز باید اصلاح گردند ($K_{c\,(FAO-adj)}$) (Allen *et al.*, 1998). در پژوهش حاضر، مقدار تبخیر-تعرق برآوردی با به‌کارگیری پارامترهای $K_{c\,(WB)}$، $K_{c\,(FAO)}$ و $K_{c\,(FAO-adj)}$ و با استفاده از معادله ۴، تحت عنوان $ET_{c\,(WB)}$، $ET_{c\,(FAO)}$ و $ET_{c\,(FAO-adj)}$ معرفی شده است.

تجزیه و تحلیل آماری

به‌منظور مقایسه بین روش‌های برآورد تبخیر-تعرق گیاه در مقایسه با تبخیر-تعرق واقعی حاصل از روش بیلان آب از آزمون تی-استیودنت در سطح معنی‌داری ۵ درصد و معیارهای متداول آماری شامل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، شاخص توافق (d) استفاده شد (Piccinni *et al.*, 2009):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|P_i - O_i| \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i - \bar{O}| - |O_i - \bar{O}|)^2} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

در این روابط P_i مقادیر پیش‌بینی شده، O_i مقادیر مشاهده شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهده شده و n تعداد داده هاست. یک مدل بهینه دارای $R^2 = d = 1$ و $RMSE = AAE = 0$ است.

نتایج و بحث

تبخیر-تعرق برآوردی ذرت علوفه‌ای

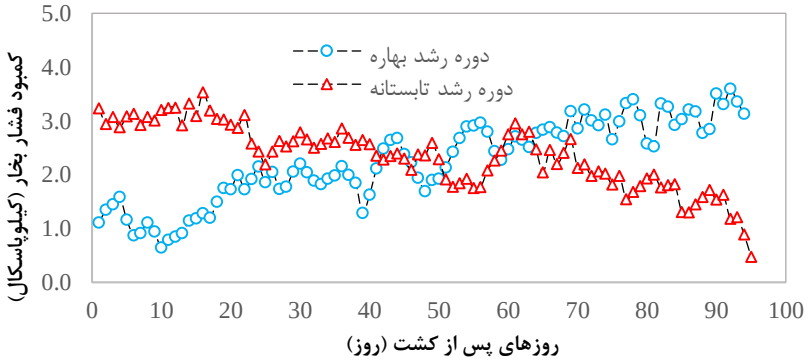
کمبود فشار بخار اشباع، اختلاف بین فشار بخار اشباع و فشار بخار واقعی است که شاخص دقیقی از قدرت تبخیرکنندگی اتمسفر است (Allen *et al.*, 1998). روند تغییرات کمبود فشار بخار در منطقه مطالعاتی طی دو دوره رشد در شکل (۲) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در ابتدای دوره رشد، قدرت تبخیرکنندگی اتمسفر در دوره بهاره کم‌تر از تابستانه است، در حالی‌که در انتهای دوره رشد قدرت تبخیرکنندگی اتمسفر در دوره بهاره بیش‌تر از دوره تابستانه است. نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که تغییرات یک واحدی در کمبود فشار بخار اشباع می‌تواند باعث تغییرات ۱۰-۳۰ درصدی در مقادیر تبخیر-تعرق مرجع شود (Yoder *et al*,. 2005, Irmak *et al.*, 2006). همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد، روند تغییرات ET_o در دوره رشد بهاره صعودی و در دوره رشد تابستانه با نزدیک شدن به فصل پاییز نزولی است. حداکثر مقدار ET_o طی دوره رشد بهاره و تابستانه به‌ترتیب برابر با ۹/۱ و ۸/۱ میلی‌متر است که ۷۹ و ۱۷روز پس از کشت رخ داد. هم‌چنین مجموع ET_o طی دوره رشد بهاره و تابستانه به ترتیب برابر با ۵۶۶ و ۴۵۲ میلی‌متر محاسبه شد.

به‌منظور اصلاح مقادیر $K_{c\,(FAO)}$ متناسب با شرایط منطقه مطالعاتی و سیستم آبیاری قطره‌ای مورداستفاده، ابتدا دوره‌های مختلف رشد گیاه بر اساس درجه-روز-رشد مطابق با جدول (۴) تعیین گردید. درجه-روز-رشد تجمعی برای دوره رشد بهاره و تابستانه ذرت علوفه‌ای در منطقه مطالعاتی به ترتیب برابر با ۱۰۳۲ و ۱۰۷۸ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد (شکل ۳).

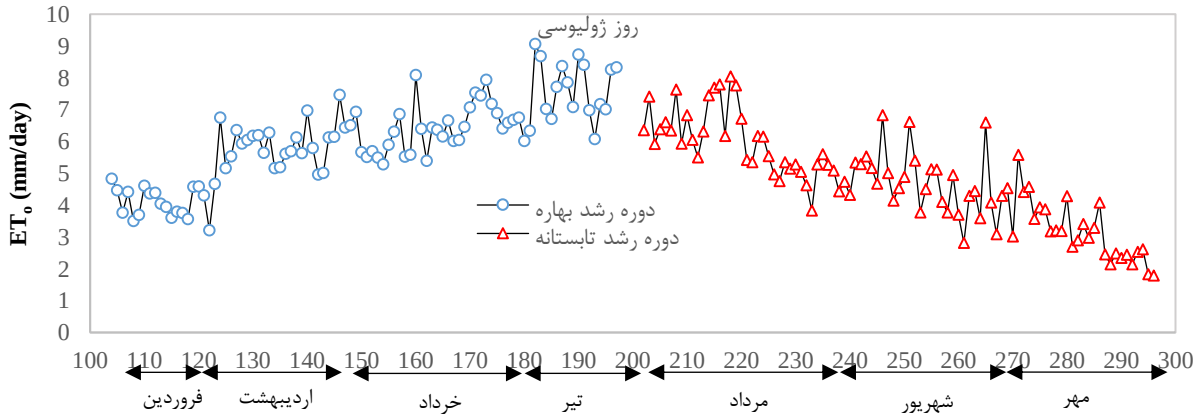
فاصله بین دو نمودار درجه-روز-رشد تجمعی نشان می‌دهد

که درجه-روز-رشد مورد نیاز برای تکمیل مراحل فیزیولوژیکی گیاه در دوره رشد بهاره با تأخیر زمانی نسبت به دوره رشد تابستانه تامین گردیده است. بنابراین مرحله ابتدایی و توسعه رشد ذرت علوفه‌ای در دوره رشد بهاره به دلیل پایین بودن درجه حرارت هوا و تأمین نشدن درجه-روز-رشد مورد نیاز گیاه نسبت به دوره رشد تابستانه طولانی‌تر بوده است. هم‌چنین مراحل میانی و انتهایی رشد ذرت علوفه‌ای به علت گرم بودن هوا و تأمین درجه-روز-رشد موردنیاز گیاه در دوره رشد بهاره نسبت به زمان مشابه در دوره رشد تابستانه کوتاه‌تر می‌باشند.

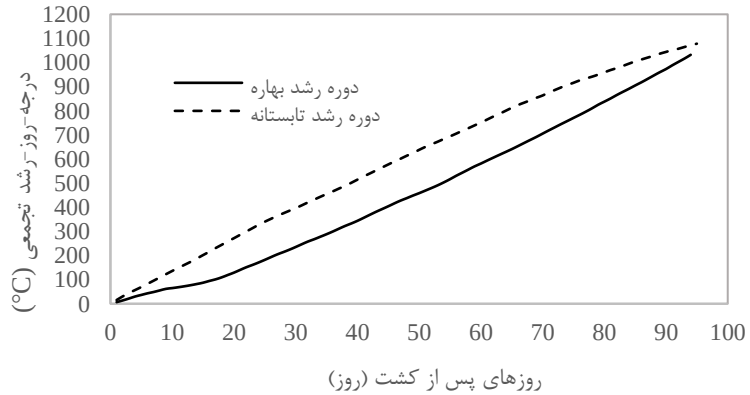
مقدار تجمعی تبخیر-تعرق برآوردی ذرت علوفه‌ای با استفاده از ضرایب گیاهی اصلاح شده فائو ($ET_{c\,(FAO-adj)}$) در دوره رشد بهاره و تابستانه به ترتیب برابر با ۴۹۵ و ۳۶۶ میلی‌متر محاسبه شد. حداکثر $ET_{c\,(FAO-adj)}$ در دوره رشد بهاره ۱۱/۹ میلی‌متر در روز بود که ۷۹ روز پس از کشت و در دوره رشد تابستانه برابر با ۸/۵ میلی‌متر در روز بود که ۶۴ روز پس از کشت رخ داد (شکل ۵). در دوره رشد تابستانه حداکثر $ET_{c\,(FAO-adj)}$ حدود ۱۵روز زودتر از دوره رشد بهاره رخ داده است که به دلیل گرم‌تر بودن هوا در مراحل ابتدایی رشد در دوره رشد تابستانه است که درجه-روز-رشد مناسب برای رشد ذرت فراهم شده است.



شکل ۲- روند تغییرات کمبود فشار بخار طی دوره رشد بهاره و تابستانه سال ۱۳۹۸



شکل ۳- روند تغییرات تبخیر-تعرق مرجع چمن در منطقه مطالعاتی طی دوره رشد بهاره و تابستانه ۱۳۹۸



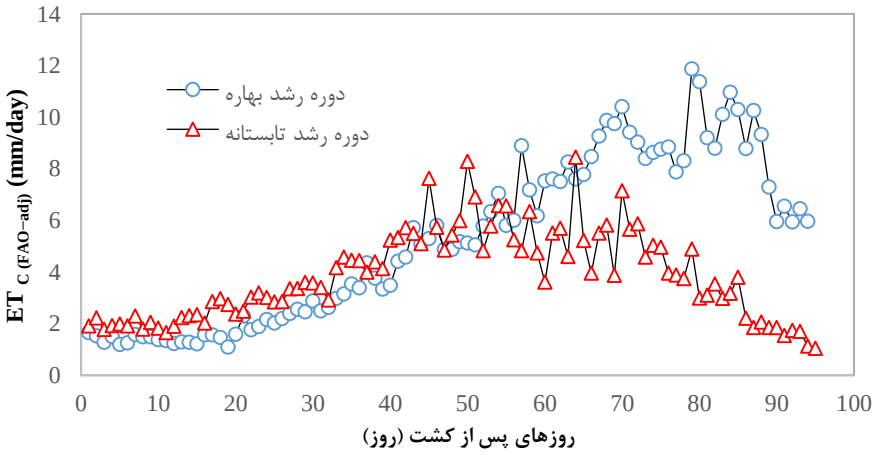
شکل ۴- مقادیر درجه-روز-رشد تجمعی منطقه مطالعاتی در دوره رشد بهاره و تابستانه سال ۱۳۹۸

جدول ۴- مقادیر درجه-روز-رشد و ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای پیشنهادی و اصلاح شده فائو-۵۶ در منطقه مطالعاتی سال ۱۳۹۸

مراحل رشد	$K_{c\ (FAO)}$	دوره رشد بهاره			دوره رشد تابستانه		
		طول دوره (روز)	GDD	$K_{c\ (FAO-adj)}$	طول دوره (روز)	GDD	$K_{c\ (FAO-adj)}$
ابتدایی	۰/۳	۲۵	۱۸۱/۸	۰/۳۴	۱۵	۲۰۱/۶	۰/۳
توسعه	ـــ	۴۰	۶۴۰/۸	ـــ	۳۵	۶۳۷/۹	ـــ
میانی	۱/۲	۲۰	۹۰۴/۹	۱/۳۱	۲۵	۹۱۵/۹	۱/۲۸
انتهایی	۰/۶	۱۰	۱۰۳۲	۰/۷۲	۲۰	۱۰۷۸/۱	۰/۶۴

تبخیر-تعرق واقعی ذرت علوفه‌ای

در این پژوهش مقادیر $ET_{c,a}$ ذرت علوفه‌ای با استفاده از داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده توسط دستگاه PR2 و معادله بیلان آب در دوره رشد بهاره و تابستانه محاسبه گردید. جدول (۵) اجزای معادله بیلان آب را برای هر دو دوره رشد در بازه‌های زمانی ۱۲ روزه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو دوره رشد بهاره و تابستانه در مراحل ابتدایی رشد گیاه دو آبیاری به‌میزان یکسان برای اطمینان از جوانه‌زنی گیاه انجام گردید که باعث ایجاد نفوذ عمقی در مراحل نخستین رشد گیاه شد. میزان نفوذ عمقی در دوره رشد بهاره حدود ۸۸ درصد بیش‌تر از دوره رشد تابستانه است چراکه در منطقه مطالعاتی ابتدای دوره رشد بهاره همزمان با فروردین‌ماه و ابتدای دوره رشد تابستانه همزمان با یکی از گرم‌ترین ماه‌های سال یعنی مردادماه بود.



شکل ۵- روند تغییرات پارامتر $ET_{c\ (FAO-adj)}$ در منطقه مطالعاتی در دوره رشد بهاره و تابستانه سال ۱۳۹۸

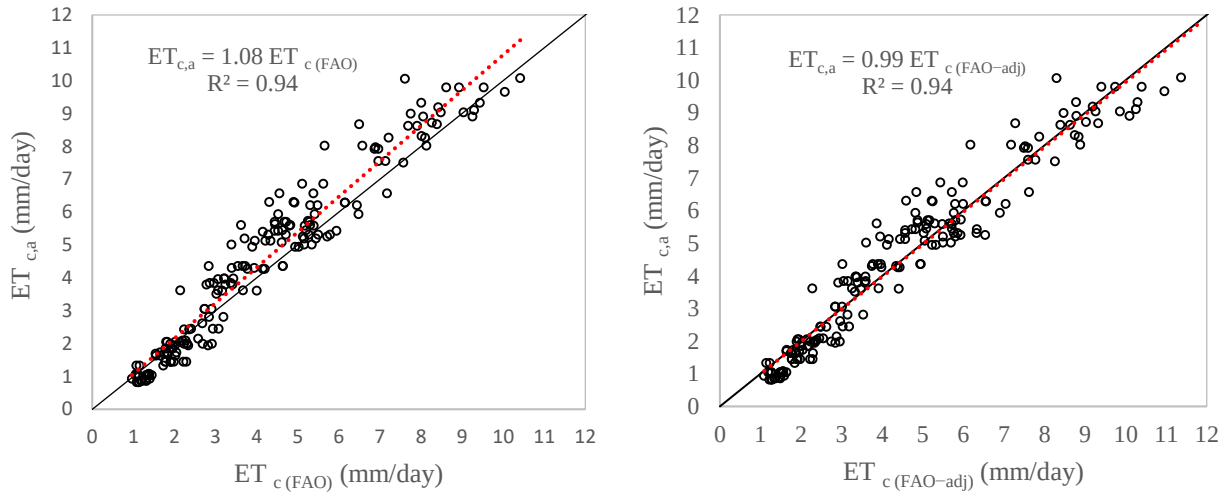
جدول ۵- متوسط اجزای معادله بیلان آب اندازه‌گیری شده برای تیمارهای مختلف طی دوره رشد بهاره و تابستانه سال ۱۳۹۸

دوره اندازه‌گیری (روز)	دوره رشد بهاره (میلی‌متر)				دوره رشد تابستانه (میلی‌متر)			
	I_{rrg}	DP	ΔS	$ET_{c,a}$	I_{rrg}	DP	ΔS	$ET_{c,a}$
۱۱	۶۰	۳۰	۱۹/۲	۱۰/۹	۶۰	۱۶/۱	۲۷/۲	۱۶/۷
۱۲	۸	صفر	-۵/۱	۱۳/۳	۱۷	صفر	-۸/۱	۲۵/۱
۱۲	۲۱	صفر	-۴/۸	۲۷/۴	۴۰	صفر	-۷/۸	۴۷/۸
۱۲	۴۵	صفر	-۱۰/۲	۵۶/۹	۵۶	صفر	-۸	۶۴
۱۲	۶۵	صفر	-۹/۲	۷۵/۱	۷۷	صفر	۳/۵	۷۳/۵
۱۲	۹۴	صفر	-۹/۱	۱۰۳/۳	۶۵	صفر	-۱/۳	۶۶/۳
۱۲	۱۱۱	صفر	۲/۳	۱۰۷/۵	۵۹	صفر	۵/۴	۵۳/۶
۱۲	۸۴	صفر	۶/۹	۷۱	۲۸	صفر	۲	۲۶
کل فصل رشد	۴۸۸	۳۰	-۱۰	۴۶۶	۴۰۲	۱۶/۱	۱۲/۹	۳۷۳

همان‌طور که در شکل (۳) نیز مشاهده می‌شود میزان ET_o در ابتدای دوره رشد بهاره نسبت به ابتدای دوره رشد تابستانه کم‌تر است که موجب افزایش میزان نفوذ عمقی در دوره رشد بهاره گردید. هم‌چنین با توجه به استفاده از سیستم آبیاری قطره-ای با دور آبیاری دو روز و تأمین کمبود رطوبتی خاک تا حد ظرفیت زراعی، محاسبات نشان داد که در ادامه دوره رشد نفوذ عمقی به زیر منطقه توسعه ریشه گیاه (۶۰ سانتی‌متر) صورت نگرفته است.

مقدار متوسط $ET_{c,a}$ تیمارهای مختلف به‌روش بیلان آب در دوره بهاره و تابستانه به ترتیب برابر با ۴۶۶ و ۳۷۳ میلی‌متر

تعیین شد. با توجه به‌این‌که بیش‌ترین میزان نیاز آبی گیاه مربوط به دوره میانی رشد (گرده افشانی و پرشدن دانه) است که این مرحله در دوره بهاره مصادف با ماه‌های گرم سال (خرداد و تیرماه) و در دوره تابستانه مصادف با ماه‌های شهریور و مهر بود، بنابراین بیش‌تر بودن ET_o در مرحله میانی رشد در دوره بهاره نسبت به تابستانه باعث افزایش حدود ۲۵ درصدی $ET_{c,a}$ در دوره بهاره نسبت به دوره تابستانه گردید. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود مقادیر ($ET_{c\ (FAO)}$) حدود ۸ درصد نسبت به مقادیر $ET_{c,a}$ در منطقه مطالعاتی کم‌برآورد شده است. هم‌چنین نتایج آزمون تی-استیودنت نیز نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد بین مقادیر $ET_{c\ (FAO)}$ در مقایسه با مقادیر $ET_{c,a}$ وجود دارد، در حالی که با اصلاح ضرایب گیاهی نشریه فائو-۵۶ اختلاف معنی داری بین مقادیر $ET_{c\ (FAO-adj)}$ و $ET_{c,a}$ مشاهده نشد (جدول ۶). بنابراین به‌منظور برآورد هرچه دقیق‌تر تبخیر-تعرق گیاه در صورت عدم دسترسی به ضرایب گیاهی محلی، نیاز به اصلاح ضرایب گیاهی پیشنهادی در نشریه فائو-۵۶ مطابق با نوع سیستم آبیاری در مزرعه، مدیریت آبیاری و شرایط آب و هوایی منطقه مطالعاتی می‌باشد.



شکل ۶- مقادیر تبخیر-تعرق واقعی ذرت علوفه‌ای دربرابر مقادیر تبخیر-تعرق برآوردی ذرت علوفه‌ای براساس $K_{c\ (FAO)}$ و $K_{c\ (FAO-adj)}$ در دوره رشد بهاره و تابستانه در منطقه مطالعاتی سال ۱۳۹۸

جدول ۶- نتایج آنالیز آماری آزمون تی-استیودنت و سایر آماره‌ها بین تبخیر-تعرق برآوردی در مقایسه با $ET_{c,a}$ در دو دوره رشد

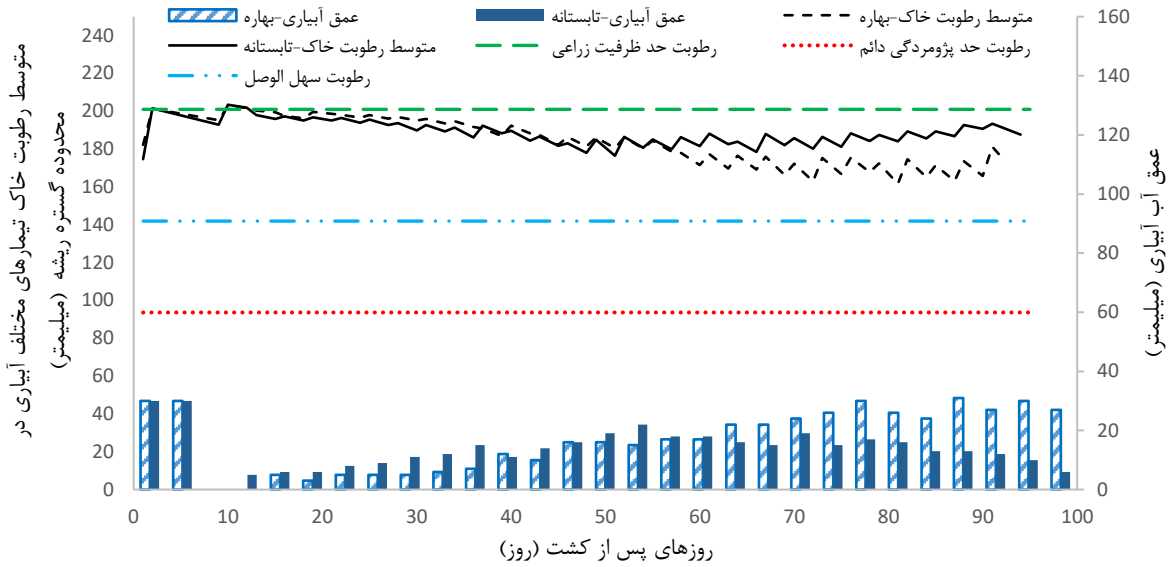
روش‌های برآورد تبخیر-تعرق گیاه	میانگین	واریانس	درجه آزادی	$t_{computed}$	$t_{critical}$	P (0.05)	RMSE (mm/day)	MAE (mm/day)	d
$ET_{c\ (FAO)}$	۴/۲	۵/۸	۱۸۶	۵/۲۴	۱/۶۵	$۲/۲۱\times۱۰^{-۷}$	۰/۷۵	۰/۵۷	۰/۹۸
$ET_{c\ (FAO-adj)}$	۴/۵	۶/۹	۱۸۶	-۱/۲۶	۱/۶۵	۰/۱۰۳۸	۰/۶۶	۰/۵۳	۰/۹۸

شرایط رطوبتی خاک در گستره توسعه ریشه گیاه

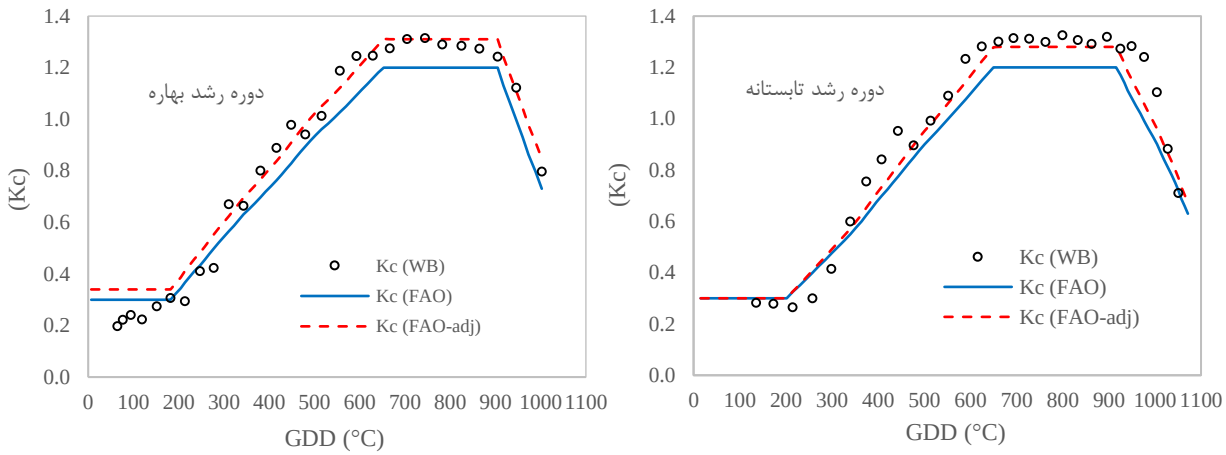
رطوبت خاک در محدوده گستره ریشه گیاه طی هر دو دوره ر شد قبل از هر آبیاری تو سط د ستگاه پرفایل پروب اندازه‌گیری شد که روند تغییرات آن در شکل (۷) ارائه شده است. در هر دو دوره رشد بهاره و تابستانه رطوبت خاک در محدوده گستره ریشه گیاه همواره بالای محدوده رطوبتی سهل‌الوصول قرار داشته و گیاه در طی دوره رشد به‌هیچ عنوان تحت تنش آبی قرار نگرفته ا ست. مقدار رطوبت خاک در انتهای دوره ر شد بهاره کمتر از دوره رشد تابستانه است چراکه در انتهای دوره رشد گیاه همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد میزان تبخیر-تعرق در دوره رشد بهاره بیش از دوره رشد تابستانه بود.

ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای

روند تغییرات ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای محاسبه شده از روش بیلان آب و مقادیر ضریب گیاهی پیشنهادی جدول ۱۲ نشریه فائو-۵۶ و هم‌چنین مقادیر ضریب گیاهی اصلاح شده نشریه فائو-۵۶ در شکل (۸) ارائه شده است. در گیاهان زارعی مقدار ضریب گیاهی معمولاً در ابتدای دوره رشد که هنوز تاج گیاه کامل نشده کم بوده و سپس با رشد گیاه و افزایش پوشش گیاهی مقدار آن افزایش می‌یابد و هم‌زمان با حداکثر شدن رشد رویشی به بیش-ترین مقدار خود می‌رسد، سپس تا مرحله رسیدگی کامل گیاه روند کاهشی در پیش می‌گیرد (Irmak, 2005) که در شکل (۸) نیز این روند مشاهده می‌شود.



شکل ۷- تغییرات متوسط رطوبت خاک تیمارهای مختلف آبیاری در محدوده گستره ریشه گیاه (۶۰ سانتی‌متر) در طول دوره رشد بهاره و تابستانه سال ۱۳۹۸



شکل ۸- مقادیر ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای پیشنهادی در جدول ۱۲ نشریه فائو، اصلاح شده نشریه فائو و محاسبه شده به روش بیلان آب برای منطقه مطالعاتی طی دوره رشد بهاره و تابستانه سال ۱۳۹۸

روند تغییرات ضریب گیاهی در هر دو دوره رشد بهاره و تابستانه مشابه بود و مقادیر ضریب گیاهی اصلاح شده نشریه فائو-۵۶ مطابقت بیش‌تری با مقادیر ضریب گیاهی محاسبه‌شده به روش بیلان آب برای منطقه مطالعاتی دارد. مقدار ضریب گیاهی در هر دو دوره با افزایش رشد گیاه از حدود ۰/۲۵ تا ۱/۳۱ افزایش یافته و سپس در انتهای دوره رشد مقدار آن به حدود ۰/۸ کاهش یافته است. متوسط مقادیر ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای محاسبه-شده بر اساس بیلان آب برای تیمارهای مختلف آبیاری در طی چهار مرحله مختلف رشد ذرت در جدول (۶) ارائه شده است. حداکثر متوسط ضریب گیاهی تیمارهای مختلف آبیاری در طی دوره رشد بهاره و تابستانه برابر با ۱/۳۱ به دست آمد که به ترتیب ۷۳ و ۵۸ روز پس از کشت رخ داد و معادل با درجه-روز-رشد حدود ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد بود.

به دلیل گرم‌تر بودن هوا در دوره رشد تابستانه حداکثر مقدار ضریب گیاهی حدود ۱۵ روز زودتر از دوره رشد بهاره رخ داده است. با توجه به استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای در این پژوهش که فقط بخشی از سطح خاک را خیس می‌کند و باعث کاهش تبخیر از سطح خاک می‌گردد، ضریب گیاهی محاسبه شده برای منطقه مطالعاتی در ابتدای دوره رشد کم‌تر از ضریب گیاهی پیشنهادی جدول ۱۲ نشریه فائو است. در مرحله میانی رشد با توجه به بالا بودن میزان تبخیر-تعرق مرجع در دوره رشد بهاره مقدار ضریب گیاهی کم‌تر از دوره رشد تابستانه است. با توجه به این‌که مرحله انتهایی رشد در دوره بهاره مصادف با گرم‌ترین ماه سال و در دوره رشد تابستانه مصادف با اواخر مهرماه بوده است بنابراین مقدار ضریب گیاهی در این مرحله نیز برای دوره بهاره کم‌تر از دوره تابستانه به دست آمد. جدول ۱۲ نشریه فائو-۵۶

برای طول دوره‌های مختلف رشد ذرت تعداد روزهای ثابتی را در نظر گرفته و مقادیر ضریب گیاهی را برای هر دوره نیز عدد ثابتی پیشنهاد کرده است، درحالی‌که تفاوت در شرایط اقلیمی، مدیریت آب و خاک و گیاه، رقم مورد کشت، عملیات خاکورزی و تراکم کشت می‌تواند باعث افزایش یا کاهش طول دوره‌های مختلف رشد در رقم‌های مختلف ذرت و درنتیجه باعث اختلاف در مقادیر ضرایب گیاهی و در نهایت تبخیر-تعرق برآوردی گردد. مقایسه مقادیر ضریب گیاهی حاصل از روش بیلان آب در دو دوره رشد مختلف، مقادیر پیشنهادی نشریه فائو-۵۶ و مقادیر اصلاح شده آن در شکل (۸) نشان داد که اصلاح مقادیر ضریب گیاهی نشریه فائو-۵۶ با توجه به شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه و شیوه‌های مدیریتی آب و گیاه ضروری است.

جدول ۶- متوسط ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای برآوردی به روش بیلان آب برای مراحل مختلف رشد در منطقه مطالعاتی سال ۱۳۹۸

مراحل رشد ذرت	دوره رشد بهاره				دوره رشد تابستانه			
	طول دوره (روز)	$K_{c\ (WB)}$	ET_o (mm)	$ET_{c,a}$ (mm)	طول دوره (روز)	$K_{c\ (WB)}$	ET_o (mm)	$ET_{c,a}$ (mm)
ابتدایی	۲۵	۰/۲۴	۱۱۱/۸	۲۹/۸	۱۵	۰/۲۷	۱۰۰/۲	۲۲/۷
توسعه	۴۰	۰/۷۹	۲۴۱/۵	۲۰۱	۳۵	۰/۸۵	۱۸۹/۲	۱۵۱/۵
میانی	۲۰	۱/۲۸	۱۴۴/۷	۱۹۱/۵	۲۵	۱/۳	۱۰۷/۲	۱۳۵/۲
انتهایی	۱۰	۰/۸	۶۸	۴۳/۲	۲۰	۰/۸۸	۵۶	۶۳/۶
کل دوره	۹۵	—	۵۶۶	۴۶۶	۹۵	—	۴۵۲	۳۷۳

مطالعات زیادی مقدار ضریب گیاهی ذرت را در مرحله میانی رشد اندازه‌گیری کرده‌اند. بطورمثال مقادیر ضریب گیاهی برای دشت‌های بزرگ ایالات‌متحده امریکا ۱/۰۳ (Suyker and Verma, 2009)، ۱/۱۷ (Howell *et al.*, 2006)، ۱/۲ (Piccinni *et al.*, 2009; Payero and Irmak, 2011) و ۱/۲۶ (Djaman and Irmak, 2013) و برای مناطق مختلف آسیا ۱/۲۳ (Tyagi *et al.*, 2003)، ۱/۲۵ (Parkes *et al.*, 2005)، ۱/۲۶ (Li *et al.*, 2003) و ۱/۴ (Kang *et al.*, 2003) گزارش شده است. نتایج به‌دست آمده از مطالعات مذکور با یکدیگر و هم‌چنین با نتایج حاصل از این پژوهش متفاوت است. البته باید توجه داشت که تفسیر نتایج این مطالعات نیازمند بررسی عوامل مختلف مؤثر بر ضریب گیاهی از قبیل نوع سیستم آبیاری و مدیریت آن، شرایط اقلیمی و مدیریتی رشد گیاه است. هم‌چنین ضریب گیاهی بسیار وابسته به درصد پوشش گیاهی است، به‌طوری که افزایش درصد پوشش گیاهی باعث افزایش ضریب گیاهی می‌گردد (Allen *et al.*, 1998). بنابراین استفاده از تراکم‌های کشت مختلف در پژوهش‌ها نیز می‌تواند باعث اختلاف در مقادیر ضریب گیاهی گردد.

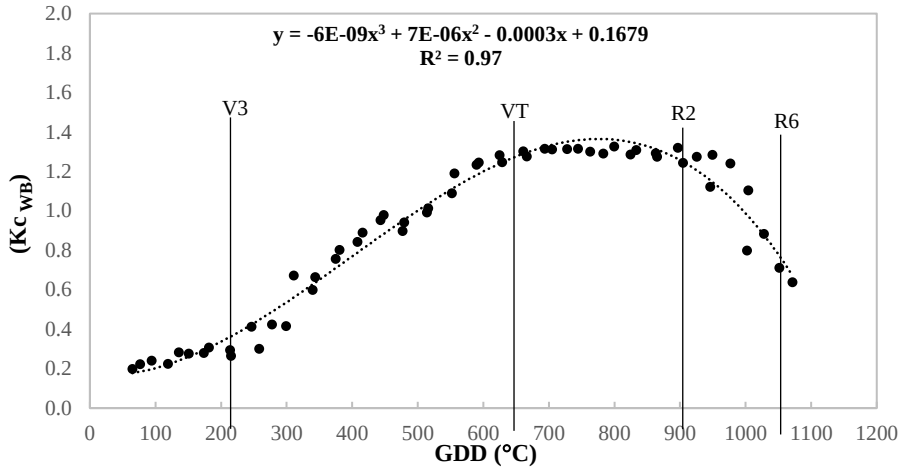
هدف دیگر پژوهش حاضر ارائه معادله ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای به‌صورت تابعی از درجه-روز-رشد تجمعی منطقه مطالعاتی که وضعیت فیزیولوژیکی گیاه در آن لحاظ شده است، می‌باشد. برای استخراج معادله مذکور ۱۰ روز ابتدایی دوره رشد به دلیل وابستگی شدید آن دوره به شرایط مدیریتی آب و گیاه در محاسبات لحاظ نشد تا معادله ارائه‌شده قابلیت کاربرد بیش‌تری داشته باشد. با توجه به شکل (۹) رابطه بین دو متغیر ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای و درجه-روز-رشد تجمعی در دوره رشد بهاره و تابستانه منطقه مطالعاتی بر اساس معادله درجه سوم تعریف و ارائه شد:

(رابطه ۱۲)

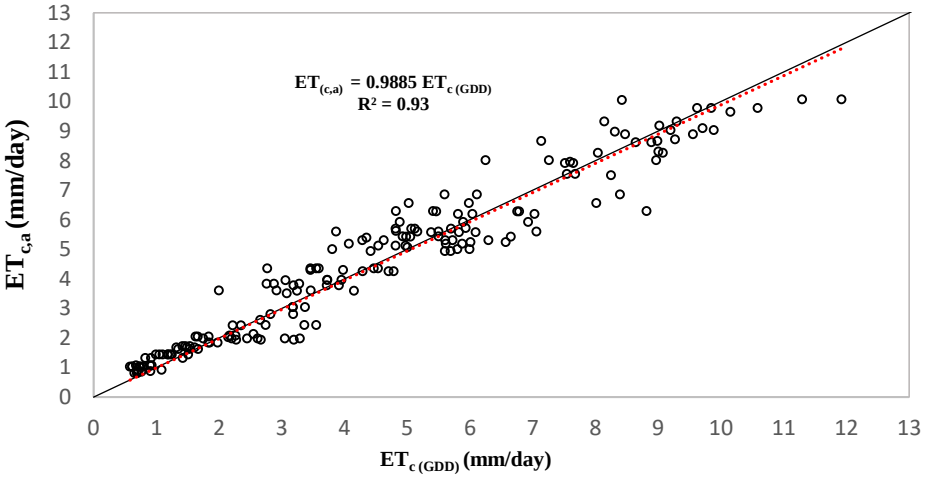
$$K_{c\ (GDD)} = -6 \times 10^{-9} \times (GDD)^3 + 7 \times 10^{-6} \times (GDD)^2 - 0.0003 \times GDD + 0.1679$$

دلیل انتخاب معادله درجه سوم برای رابطه مذکور بالاتر بودن ضریب تعیین رگرسیون نسبت به معادلات فرم دیگر بود که بیان‌گر هم‌بستگی خوب بین دو متغیر و دقت قابل‌قبول ضرایب گیاهی حاصل از این معادله نیز می‌باشد.

مقادیر تبخیر-تعرق برآوردی ذرت علوفه‌ای با استفاده از ضرایب گیاهی حاصل از معادله ۱۲ ($ET_{c\ (GDD)}$) در دو دوره رشد بهاره و تابستانه در مقابل مقادیر $ET_{c,a}$ در شکل (۱۰) ارائه شده است که نشان‌دهنده مطابقت خوب ($R^2 = 0.93$) بین مقادیر به‌دست آمده می‌باشد. همچنین نتایج تجزیه و تحلیل آماری نیز نشان داد که بین مقادیر $ET_{c\ (GDD)}$ و $ET_{c,a}$ اختلاف معنی داری وجود ندارد (جدول ۷). بنابراین با در دست داشتن مقادیر حداکثر و حداقل دمای روزانه و محاسبه درجه-روز-رشد تجمعی برای مناطقی با شرایط مدیریتی آب و گیاه مشابه با منطقه مطالعاتی پژوهش حاضر، می‌توان با استفاده معادله ارائه شده در پژوهش حاضر (معادله ۱۲) ضرایب گیاهی ذرت علوفه‌ای را در طی دوره رشد برای تاریخ‌های کشت مختلف محاسبه و مقدار تبخیر-تعرق گیاه در طول فصل رشد را به‌سادگی و با دقت قابل قبولی برآورد کرد. یکی از موارد استفاده معادله ۱۲ در مدل‌های کامپیوتری برآورد نیاز آبی گیاه است که مدل بر اساس داده‌های دما بدون نیاز به تعیین دوره رشد گیاه می‌تواند مستقیماً ضرایب گیاهی را محاسبه نماید.



شکل ۹- متوسط مقادیر ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای محاسبه شده به روش بیلان آب (Kc_{WB}) بر حسب درجه-روز-رشد در تیمارهای مختلف مورد بررسی طی دوره رشد بهاره و تابستانه سال ۱۳۹۸



شکل ۱۰- مقادیر تبخیر-تعرق واقعی ذرت علوفه‌ای به روش بیلان آب و مقادیر تبخیر-تعرق برآوردی با استفاده از ضرایب گیاهی حاصل از معادله (۹) طی دوره رشد بهاره و تابستانه در منطقه مطالعاتی سال ۱۳۹۸

جدول ۷- نتایج آنالیز آماری آزمون تی-استیودنت و سایر آماره‌ها بین مقادیر $ET_{c\,(GDD)}$ در مقایسه با $ET_{c,a}$ در دو دوره رشد

روش‌های برآورد تبخیر-تعرق گیاه	میانگین	واریانس	درجه آزادی	$t_{computed}$	$t_{critical}$	P (0.05)	RMSE (mm/day)	MAE (mm/day)	d
$ET_{c\,(GDD)}$	۴/۴	۷/۷	۱۸۶	۱/۲۳	۱/۶۵	۰/۱۰۸۸	۰/۷	۰/۵۳	۰/۹۸

نتیجه‌گیری

هدف از انجام پژوهش حاضر برآورد ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای تحت سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی در منطقه ورامین با استفاده از روش بیلان آب خاک و مقایسه آن با مقادیر پیشنهادی و اصلاح شده نشریه فائو-۵۶ است. نتایج نشان داد که مقادیر ضرایب گیاهی پیشنهادی نشریه فائو-۵۶ در صورت اصلاح تطابق خوبی با مقادیر ضرایب گیاهی حاصل از روش بیلان آب خواهند داشت. بنابراین باتوجه به وجود اختلاف معنی‌دار بین مقادیر $ET_{c\,(FAO)}$ و $ET_{c,a}$ پیشنهاد می‌گردد در صورت عدم دسترسی به مقادیر ضرایب گیاهی محلی به‌منظور برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین نیاز آبی گیاه از مقادیر اصلاح شده ضرایب گیاهی ارائه شده در نشریه فائو-۵۶ استفاده گردد. هم‌چنین در معادله‌ای که برای محاسبه ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای ارائه گردید، به جای استفاده از مقیاس‌های زمانی مانند روز ژولیوسی یا روزهای پس از کشت از پارامتر درجه-روز-رشد استفاده شد که برخی خصوصیات فیزیولوژیکی و رشد و نمو گیاه را در خود منظور نموده و می‌تواند مقادیر ضرایب گیاهی را برای تاریخ‌های کشت مختلف که باعث تغییر در طول دوره‌های رشد گیاه می‌گردد، با دقت و اطمینان بیش‌تری برآورد کند. نتایج این پژوهش می‌تواند به کشاورزان و تولیدکنندگان ذرت علوفه‌ای در منطقه ورامین یا مناطق دیگری که از نظر شرایط آب و هوایی، خاک و مدیریت محصول مشابه می‌باشند، در انتخاب ضرایب گیاهی مناسب برای برآورد هرچه

دقیق‌تر تبخیر-تعرق گیاه و نیاز آبی ذرت علوفه‌ای جهت برنامه-ریزی مدیریت آبیاری فصلی کمک کند.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از کمک‌های ارزنده و امکاناتی که اعضای مجموعه دام‌پروری صفاری ورامین به‌ویژه آقای مهندس مصطفی نجفی کارشناس ارشد زراعت مجموعه در اختیارشان گذاشته‌اند، کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایند. پژوهش حاضر با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (Iran National Science Foundation: INSF) انجام شده است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, *300*(9), D05109.

Bastidas, A. M., Setiyono, T. D., Dobermann, A., Cassman, K. G., Elmore, R. W., Graef, G. L., and Specht, J. E. (2008). Soybean sowing date: The vegetative, reproductive, and agronomic impacts. *Crop Science*, *48*(2), 727-740.

Dadkhah, A. (2017). Determination of Actual Evapotranspiration and Crop Coefficient of Maize with Soil Water Balance Method Under Drip-tape Irrigation Management. Master's Thesis. Isfahan University of Technology. (In Farsi)

DehghaniSanij, H., Kanani, E., and Akhavan, S. (2020). Evapotranspiration and components of corn (Zea mays L.) under micro irrigation systems in a semi-arid environment. *Spanish journal of agricultural research*, *18*(2), 26.

Djaman, K., and Irmak, S. (2013). Actual crop evapotranspiration and alfalfa-and grass-reference crop coefficients of maize under full and limited irrigation and rainfed conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *139*(6), 433-446.

Djaman, K., O'Neill, M., Owen, C. K., Smeal, D., Koudahe, K., West, M., ... and Irmak, S. (2018). Crop evapotranspiration, irrigation water requirement and water productivity of maize from meteorological data under semiarid climate. *Water*, *10*(4), 405.

Doorenbos, J. (1975). Guidelines for predicting crop water requirements. *Food and Agriculture organization. Rome, Irrig. Drainage pap.*, *24*.

Gao, Y., Duan, A., Sun, J., Li, F., Liu, Z., Liu, H., and Liu, Z. (2009). Crop coefficient and water-use efficiency of winter wheat/spring maize strip intercropping. *Field Crops Research*, *111*(1-2), 65-73.

Ghorbanian, M., Liaghat, A.M, and Noory H. (2016). Investigation the Effect of Adding Fertilizer on the Crop Coefficient, Growth of Roots and Shoots of Maize Forage. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 6(9), 842-853. (In Farsi)

Howell, T. A., Evett, S. R., Tolk, J. A., Copeland, K. S., Dusek, D. A., and Colaizzi, P. D. (2006). Crop coefficients developed at Bushland, Texas for corn, wheat, sorghum, soybean, cotton, and alfalfa. In *World Environmental and Water Resource Congress 2006: Examining the Confluence of Environmental and Water Concerns*, 1-9.

Irmak, A., and Irmak, S. (2008). Reference and crop evapotranspiration in South Central Nebraska. II: Measurement and estimation of actual evapotranspiration for corn. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *134*(6), 700-715.

Irmak, S. (2005). Crop evapotranspiration and crop coefficients of Viburnum odoratissimum (Ker.-Gawl). *Applied Engineering in Agriculture*, *21*(3), 371-381.

Irmak, S., Istanbulluoglu, E., and Irmak, A. (2008). An evaluation of evapotranspiration model complexity against performance in comparison with Bowen ratio energy balance measurements. *Transactions of the ASABE*, *51*(4), 1295-1310.

Irmak, S., Odhiambo, L. O., Specht, J. E., and Djaman, K. (2013). Hourly and daily single and basal evapotranspiration crop coefficients as a function of growing degree days, days after emergence, leaf area index, fractional green canopy cover, and plant phenology for soybean. *Transactions of the ASABE*, *56*(5), 1785-1803.

Irmak, S., Payero, J. O., Martin, D. L., Irmak, A., and Howell, T. A. (2006). Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *132*(6), 564-578.

Kang, S., Gu, B., Du, T., and Zhang, J. (2003). Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. *Agricultural water management*, *59*(3), 239-254.

Li, Y. L., Cui, J. Y., Zhang, T. H., & Zhao, H. L. (2003). Measurement of evapotranspiration of irrigated spring wheat and maize in a semi-arid region of north China. *Agricultural Water Management*, *61*(1), 1-12.

Mohammadi, S., Mirlatifi, S.M., Dehghanisanij, H., and Homaee, M. (2020). Effects of Pulsed Management in Drip Irrigation on Yield, Yield Components and Water Productivity of Silage Maize. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, (In Farsi)

Parkes, M., Jian, W., and Knowles, R. (2005). Peak crop coefficient values for Shaanxi, North-west China. *Agricultural water management*, *73*(2),

149-168.

Payero, J. O., and Irmak, S. (2011). Daily crop evapotranspiration, crop coefficient and energy balance components of a surface irrigated maize field. *Evapotranspiration-From Measurements to Agricultural and Environmental Applications. Rijeka, Croatia: InTech*, 59-78.

Payero, J. O., Tarkalson, D. D., Irmak, S., Davison, D., and Petersen, J. L. (2008). Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate. *Agricultural water management*, *95*(8), 895-908.

Pereira, L. S., Paredes, P., and Jovanovic, N. (2020). Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agricultural Water Management*, *241*, 106357.

Piccinni, G., Ko, J., Marek, T., and Howell, T. (2009). Determination of growth-stage-specific crop coefficients (KC) of maize and sorghum. *Agricultural water management*, *96*(12), 1698-1704.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., and Fereres, E. (2018). AquaCrop Reference manual (Version 6.0), Chapter 3. *FAO, Rome, Italy*.

Suyker, A. E., and Verma, S. B. (2009). Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize–soybean cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, *149*(3-4), 443-452.

Trout, T. J., and DeJonge, K. C. (2018). Crop water use and crop coefficients of maize in the great plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *144*(6), 04018009.

Tyagi, N. K., Sharma, D. K., and Luthra, S. K. (2003). Determination of evapotranspiration for maize and berseem clover. *Irrigation Science*, *21*(4), 173-181.

Yoder, R. E., Odhiambo, L. O., and Wright, W. C. (2005). Effects of vapor-pressure deficit and net-irradiance calculation methods on accuracy of standardized Penman-Monteith equation in a humid climate. *Journal of irrigation and drainage engineering*, *131*(3), 228-237.