

ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای در طول جویچه

ابراهیم وطن‌خواه^۱، حامد ابراهیمیان^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۲۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۱/۱۴)

چکیده

مدل‌های رشد و نمو گیاهان زراعی از جمله مدل AquaCrop از ابزارهای بسیار مهم برای تصمیم‌گیری و پیش‌بینی عملکرد گیاهان هستند. هدف این تحقیق، ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد بیوماس و بلال ذرت علوفه‌ای در طول جویچه بود. چهار تیمار بر اساس تأمین نیاز آبی گیاه در انتهای جویچه (به ترتیب تیمارهای آبیاری کامل، در حد ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد آبیاری در انتهای جویچه) برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل (تیمار آبیاری کامل برای واسنجی و تیمارهای کم‌آبیاری برای صحت‌سنجی) مورد بررسی قرار گرفت. تیمار آبیاری کامل کمترین ضریب تغییرات عملکرد بیوماس و بلال ذرت علوفه‌ای مشاهده شده (به ترتیب ۹ و ۱۲/۱ درصد) و شبیه‌سازی شده (به ترتیب ۶/۵ و ۶/۸ درصد) را داشت. شاخص‌های RMSE و NRMSE برای تخمین عملکرد بیوماس توسط مدل به ترتیب ۱/۶ تن بر هکتار و ۱۰/۱ درصد در مرحله واسنجی و ۱/۵ تن بر هکتار و ۱۱/۹ درصد در مرحله صحت‌سنجی به دست آمد. نتایج این تحقیق نشان داد که می‌توان از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد بیوماس ذرت علوفه‌ای در طول جویچه استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری جویچه‌ای، شبیه‌سازی، کم‌آبیاری، یکنواختی

مقدمه

مدل‌های رشد و نمو گیاهان زراعی از ابزارهای بسیار مهم در مطالعه و بررسی سیستم‌های کشاورزی بوده و از آن‌ها می‌توان در رفع نیاز روزافزون به سیاست‌گذاری‌های خرد و کلان، تصمیم‌سازی، تصمیم‌گیری و یا طراحی روش‌های مدیریتی و نیز پیش‌بینی عملکرد گیاهان در شرایط مختلف به‌خوبی استفاده کرد. گسترش روزافزون این نیازها باعث شده که مدل‌ها به‌عنوان پشتیبان تصمیم‌های تاکتیکی و استراتژیک، ایفای نقش نمایند. با توجه به اینکه بررسی عوامل محدودکننده عملکرد محصول نیاز به انجام آزمایش‌های زیاد و هزینه‌بر در مناطق مختلف دارد، یافتن راهی برای کاهش تعداد، زمان و هزینه انجام این آزمایش‌ها می‌تواند کمک بسیار مؤثری محسوب شود. امروزه انجام این مهم با شبیه‌سازی فرآیند تولید دانه و با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری مبتنی بر معادلات ریاضی و با در نظر گرفتن متغیرهای بسیار مؤثر بر عملکرد امکان‌پذیر شده است (Raes et al., 1997; van Dam et al., 1998; Boogard et al., 2012). از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل van Dam SWAP (van Dam et al., 1997; Boogard et al., 1998) و CROPWAT (Smith, 1992) و CropSyst (Steduto et al.,)

2009 اشاره کرد که هرکدام برتری‌هایی بر دیگری دارد (van Dam Sepaskhah et al., 2006; Stockle et al., 1994) and Kores, 2008). مدل AquaCrop یکی دیگر از مدل‌های گیاهی است که توسط سازمان خواروبار جهانی (فائو) توسعه یافته است. در مقایسه با مدل‌های WOFOST و CropSyst به دلیل سادگی و نیاز به داده‌های کمتر برتری دارد (Todorovic et al., 2009). علاوه بر کاربرپسندی این مدل، به توانایی و دقت قابل‌قبول آن در شبیه‌سازی عملکرد محدوده وسیعی از محصولات مختلف زراعی می‌توان اشاره کرد (Raes et al., 2009; Heng et al., 2012). از جمله این گیاهان می‌توان به جو، گندم و ذرت اشاره کرد (Heng et al., 2009; Andarzian et al., 2011; Ahmadi et al., 2015). از این مدل گیاهی در شبیه‌سازی عملکرد محصول تحت تنش‌های کم‌آبی، شوری و حاصلخیزی در شرایط متفاوت بافت خاک، سناریوهای مدیریتی مزرعه و شرایط آب و هوایی مختلف می‌توان استفاده نمود (Raes et al., 2012; Abedinpour et al., 2012). خطای مدل AquaCrop در برآورد عملکرد محصول ذرت در شرایط کم‌آبیاری و آبیاری کامل در منطقه ریباتخو کشور پرتغال حدود ۱۰ درصد به دست آمد (Parades et al., 2014). با ارزیابی مدل AquaCrop در منطقه کرج مشخص گردید خطای این مدل در برآورد عملکرد محصول ذرت بین ۲۰ الی ۴۰ درصد متغیر بود. با توجه به سهولت کاربرد و دقت مطلوب این مدل در برآورد

تعرق مرجع در طول فصل رشد با استفاده از نرم افزار ET0 CALCULATOR (Raes et al., 2009) و داده‌های روزانه هواشناسی ایستگاه سینوپتیک مزرعه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران محاسبه شد. پس از تخمین مقادیر تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی، ضریب گیاهی (ضرایب پیشنهادی در نشریه فائو ۵۶ و پیش فرض مدل AquaCrop (Raes et al., 2009) به دست آمد. تبخیر-تعرق محصول ذرت در طول فصل رشد از حاصل ضرب ضریب گیاهی در تبخیر-تعرق گیاه مرجع محاسبه شد. دور آبیاری هفت روز بود و از ۱۴ نوبت آبیاری انجام شد. عمق آبیاری در هفت آبیاری اول در همه به اندازه عمق آب مورد نیاز بود. اعمال تیمارهای مورد نظر در هفت آبیاری دوم صورت گرفت. پارامترهای نفوذ با نرم افزار IPARM (Gillies et al., 2007) تخمین زده شد. مدل IPARM ضرایب معادله نفوذ کاستیاکوف-لوئیس را به طور معکوس با استفاده از اطلاعات زمان پیشروی و هیدرو گراف رواناب خروجی برآورد می‌کند. برای اندازه‌گیری زمان‌های پیشروی و پسروی در تیمارهای مختلف در هر ۶ متر یک میخ چوبی در جویچه قرار داده شد. هیدرو گراف‌های جریان ورودی و رواناب خروجی نیز با استفاده از فلوم‌های WSC به دست آمد. مقادیر حجم آب نفوذ یافته در هر آبیاری با روش ورودی-خروجی محاسبه شد. بر اساس تأمین نیاز آبی گیاه در انتهای جویچه، عمق آب نفوذ یافته در انتهای مزرعه برای هر تیمار متفاوت بود. پس از به دست آوردن مقادیر پارامترهای نفوذ، فرصت نفوذ لازم در انتهای جویچه برای هر یک از تیمارها به دست آمد. زمان آبیاری در هر تیمار از مجموع زمان پیشروی و فرصت نفوذ در انتهای جویچه تعیین شد که برای هر تیمار متفاوت بود. با قرار دادن فرصت نفوذ در معادله نفوذ، مقادیر عمق آب نفوذ یافته در هر ایستگاه به دست آمد. در انتهای فصل رشد، عملکرد بیوماس و بلال ذرت علوفه‌ای در ابتدا، وسط و انتهای جویچه در تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شد.

تشریح مدل AquaCrop

مدل AquaCrop برای محاسبه ضریب حساسیت کم‌آبی بر اساس نسبت تبخیر-تعرق نسبی و عملکرد نسبی از رابطه (۱) استفاده می‌کند (Raes et al., 2012):

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = k_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن Y_x عملکرد بیشینه، Y_a عملکرد واقعی، ET_x تبخیر و تعرق بیشینه و ET_a تبخیر و تعرق واقعی و k_y ضریب حساسیت کم‌آبی است.

رطوبت خاک، کاربرد این مدل برای منطقه کرج پیشنهاد شد (Ziaei et al., 2015). اگرچه مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس ذرت در شرایط بدون تنش‌های کم‌آبی و حاصلخیزی از دقت قابل قبولی برخوردار بود اما با افزایش سطوح این تنش‌ها دقت مدل کاهش یافت (Ahmadi et al., 2014; Stricevic et al., 2014). کارایی مصرف آب، توسعه کانوپی و عملکرد وزن دانه و بیوماس ذرت تحت شرایط کم‌آبی در مراحل مختلف رشد به‌خوبی توسط مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد به‌جز در تیمارهایی که به مدت طولانی کم‌آبیاری شدند (Gebreselassie et al., 2015). بررسی منابع نشان می‌دهد تحقیقاتی که از مدل AquaCrop برای تخمین عملکرد محصول استفاده نمودند شبیه‌سازی تغییرات مکانی عملکرد محصول در مزرعه را مورد بررسی قرار نداده‌اند.

با توجه به اینکه عمق آب نفوذ یافته در آبیاری جویچه‌ای متناسب با فرصت نفوذ است اختلاف فرصت نفوذ در طول جویچه سبب غیریکنواختی توزیع آب نفوذ یافته و در نتیجه غیریکنواختی محصول در طول جویچه می‌شود. هدف از انجام این تحقیق، شبیه‌سازی تغییرات مکانی عملکرد بیوماس و بلال ذرت علوفه‌ای با توجه به غیریکنواختی عمق آب نفوذ یافته در طول جویچه توسط مدل AquaCrop بود. واسنجی و صحت سنجی این مدل توسط داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایش‌های مزرعه‌ای در کرج انجام گردید.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای

این مطالعه در مزرعه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۲۹۲/۹ متر از سطح دریا انجام شد. مشخصات خاک در ابتدا، وسط و انتهای مزرعه به دست آمد که در جدول (۱) ارائه شده است. ذرت علوفه‌ای با رقم سینگل کراس ۷۰۴ برای یک فصل زراعی با تراکم ۷۰۰۰۰ بوته در هر هکتار کشت شد. تاریخ کاشت و برداشت ذرت به ترتیب ۲۳ تیر و ۲۸ مهر سال ۱۳۹۳ بود. در این تحقیق، چهار تیمار بر اساس تأمین نیاز آبی گیاه در انتهای جویچه (100%Dreq, 75%Dreq, 50%Dreq و 25%Dreq) به ترتیب تیمارهای آبیاری کامل، در حد ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد آبیاری در انتهای جویچه) مورد بررسی قرار گرفت. ایجاد جویچه‌ها و کاشت هم‌زمان بذر به‌صورت مکانیزه با فاصله ردیف ۷۵ سانتی‌متر، فاصله کشت ۸ سانتی‌متر در هر ردیف و طول ۵۱ متر انجام شد. تیمارها با فاصله ۱/۵ متر از یکدیگر مستقر شدند. شیب طولی جویچه‌ها برابر ۰/۰۰۸ بود. تبخیر-

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک زراعی ابتدا، وسط و انتهای مزرعه آزمایشی

مکان	عمق (متر)	بافت خاک	درصد ذرات تشکیل دهنده خاک			وزن ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	ظرفیت زراعی (درصد وزنی)	نقطه پژمردگی (درصد وزنی)	اسیدیته شوری عصاره اشباع خاک (دسی زیمنس بر متر)
			رس (%)	سیلت (%)	شن (%)				
ابتدا	۰/۰-۰/۲	لومی رسی	۲۸/۵	۳۵/۰	۳۶/۵	۱/۵۰	۱۸/۲	۸/۷	۷/۶
	۰/۲-۰/۴	لومی رسی	۲۸/۵	۳۳/۸	۳۷/۸	۱/۴۵	۱۷/۵	۸/۱	۷/۸
	۰/۴-۰/۶	لومی شنی	۱۶/۰	۱۷/۵	۶۶/۵	۱/۴۷	۱۴/۲	۶/۰	۷/۷
وسط	۰/۰-۰/۲	لوم	۲۶/۰	۳۰/۰	۴۴/۰	۱/۵۰	۱۸/۱	۸/۵	۷/۸
	۰/۲-۰/۴	لومی رسی شنی	۲۳/۵	۲۵/۰	۵۱/۵	۱/۴۵	۱۷/۲	۸/۰	۷/۹
	۰/۴-۰/۶	لومی رسی شنی	۲۱/۰	۲۲/۵	۵۶/۵	۱/۵۲	۱۵/۵	۶/۹	۷/۸
انتها	۰/۰-۰/۲	لومی رسی	۳۱/۰	۳۱/۷	۳۷/۳	۱/۵۱	۱۸/۱	۸/۴	۷/۴
	۰/۲-۰/۴	لوم	۲۶/۸	۳۰/۴	۴۲/۸	۱/۴۸	۱۷/۷	۸/۱	۷/۶
	۰/۴-۰/۶	لومی شنی	۲۰/۲	۲۴/۶	۵۵/۳	۱/۴۹	۱۵/۰	۶/۶	۷/۸

تاج از رابطه (۴) شبیه سازی می شود:

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن، CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (٪)، CC_0 پوشش تاج اولیه (٪)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) می باشد. مدل بر اساس پوشش تاج میزان تعرق را مشخص می کند (رابطه ۵):

$$Tr = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن، K_s و K_c به ترتیب ضریب تنش آبی و ضریب گیاهی است. در واقع، تعرق و تبخیر به ترتیب رابطه مستقیمی با CC و (1-CC) دارد. بر اساس رابطه (۲)، مقدار بیوماس گیاه از روی تعرق واقعی برآورد می شود.

پارامترهای شدت ضرایب تنش آبی (K_s) مؤثر بر توسعه پوشش تاج (CC)، هدایت روزنه ای (شدت تعرق در واحد CC)، پیری و کاهش پوشش تاج و شاخص برداشت به وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می شود. در واقع در صورت تنش آبی میزان تاج پوشش گیاهی کاهش یافته و به تبع آن میزان تعرق گیاه کاهش می یابد. کاهش تعرق سبب کاهش ماده خشک تولیدی می شود و چون دانه گیاه کسری از ماده خشک تولیدی است عملکرد دانه گیاه نیز کاهش می یابد.

پارامترهای ورودی مدل AquaCrop

ورودی های مدل شامل اطلاعات اقلیمی، گیاه، مدیریت و خاک است. داده های اقلیمی شامل حداقل و حداکثر دما، بارش و تبخیر- تعرق مرجع به صورت روزانه است. سیستم اطلاعات گیاه از بخش های فنولوژی و کانوپی گیاه، تعرق گیاه، بیوماس و عملکرد قابل برداشت و تنش ها تشکیل شده است. اجزای مدیریت شامل دو قسمت مدیریت آبیاری (در زمینه کشاورزی دیم و

مدل AquaCrop به وسیله (۱) تفکیک تبخیر- تعرق (ET)

به تعرق از سطح محصول (T_r) و تبخیر از سطح خاک (E)، (۲) توسعه یک مدل ساده رشد و پیری تاج پوشش گیاهی به عنوان پایه برآورد T_r و تفکیک آن از تبخیر، (۳) شبیه سازی عملکرد نهایی (Y) به عنوان تابعی از زیست توده نهایی (B) و شاخص برداشت (HI) و (۴) تفکیک اثرات تنش آبی در چهار جزء: رشد پوشش تاج، پیری پوشش تاج گیاه، T_r و HI توسعه یافته است. با تفکیک تبخیر- تعرق می توان از مصرف غیر تولیدی آب از طریق تبخیر از سطح خاک به ویژه در شرایط پوشش گیاهی ناکامل جلوگیری کرد. تعرق روزانه با استفاده از تبخیر- تعرق روزانه و بهره وری آب گونه گیاهی که با استفاده از نیاز تبخیری و غلظت CO_2 اتمسفری نرمال شده طبق معادله (۲) به وزن قسمت گیاهی تبدیل می شود:

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن T_r مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره وری آب، ET_0 تبخیر- تعرق گیاه مرجع و B عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد وزن دانه (Y) نیز با استفاده از ماده خشک تولید شده و شاخص برداشت (HI) از رابطه (۳) به دست می آید:

$$Y = B \times HI \quad (\text{رابطه ۳})$$

یکی از ویژگی های مهم مدل AquaCrop شبیه سازی پوشش تاج (کانوپی) به جای شاخص سطح برگ (Leaf Area Index) به منظور تفکیک اجزای تبخیر و تعرق گیاه (ET) به مقدار واقعی تعرق گیاه (T_r) و مقدار تبخیر از سطح خاک (E) است. توسعه کانوپی از زمان جوانه زنی تا مقدار ماکزیمم پوشش

پیش‌فرض، واسنجی شده و اندازه‌گیری شده به مدل داده شد. در این تحقیق، برخی از پارامترهای مهم گیاهی مدل به روش سعی و خطا مورد واسنجی قرار گرفت تا مقدار شبیه‌سازی شده عملکرد محصول ذرت با مقدار اندازه‌گیری شده آن بیشترین تطابق را داشته باشد. پارامترهای گیاهی واسنجی شده در جدول (۲) نشان داده شده است. تیمار آبیاری کامل برای واسنجی و تیمارهای 75%Dreq، 50%Dreq و 50%Dreq برای صحت‌سنجی مدل AquaCrop مورد استفاده قرار گرفت.

آبی) و مدیریت زراعی (در زمینه سطوح مختلف حاصلخیزی خاک) است. اطلاعات خاک شامل خصوصیات هیدرولیکی خاک است که برای هر لایه از نیم‌رخ خاک وارد مدل می‌شود. مقادیر پارامترهای گیاهی که باید به مدل داده شود به صورت پیش‌فرض در این مدل قرار دارد. توصیه می‌شود بخشی از این پارامترها در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی تغییر نکرده و بعضی دیگر با توجه به اندازه‌گیری‌ها در مزرعه و شرایط محیطی تغییر کند. در این تحقیق پارامترهای گیاهی به صورت

جدول ۲- پارامترهای (گیاهی) ورودی مدل AquaCrop

پارامتر	مقدار	روش واسنجی
بهره‌وری آب (g/m ²)	۳۰	واسنجی شد
بیشینه عمق مؤثر (cm)	۰/۶	اندازه‌گیری شد
پوشش تاج اولیه (%)	۰/۴۶	اندازه‌گیری شد
تاج‌پوش برای هر گیاه در مراحل اولیه رشد (cm ² /plant)	۶/۵	اندازه‌گیری شد
ضریب تخلیه آب خاک برای بسته شدن روزنه‌ها (-)	۰/۵۵	پیش‌فرض
ضریب تخلیه آب خاک برای مرحله پیری (-)	۰/۶۵	پیش‌فرض
تراکم کشت (plant/ha)	۷۰۰۰۰	اندازه‌گیری شد
حد بالای ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاهی (-)	۰/۱۰	واسنجی شد
حد بالای ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاهی (-)	۰/۴۵	پیش‌فرض
حد پایین شوری عصاره اشباع خاک (-)	۲	پیش‌فرض
حداکثر پوشش تاجی (/)	۹۰	واسنجی شد
حد بالای شوری عصاره اشباع خاک (-)	۱۰	پیش‌فرض
دمای بالا (°C)	۳۰	پیش‌فرض
دمای پایه رشد (°C)	۸	واسنجی شد
زمان بلوغ (روز)	۹۹	اندازه‌گیری شد
زمان پیری (روز)	۹۹	اندازه‌گیری شد
زمان رسیدن به پوشش تاجی بیشینه (روز)	۶۴	واسنجی شد
زمان گلدهی (روز)	۶۴	واسنجی شد
شاخص برداشت (/)	۳۶	اندازه‌گیری شد
ضریب رشد پوشش تاجی (%/day)	۱۳/۷	اندازه‌گیری شد
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای بسته شدن روزنه‌ها (-)	خطی	واسنجی شد
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای توسعه پوشش تاجی گیاه (-)	۳	واسنجی شد
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری (-)	۲/۷	واسنجی شد
ضریب کاهش پوشش تاجی (%/day)	۳	واسنجی شد
ضریب گیاهی (-)	۱/۰۵	پیش‌فرض
طول مرحله گلدهی (day)	۱۰	واسنجی شد
محدوده درجه روز (°C-day)	۱۱	پیش‌فرض

ارزیابی مدل

در این مطالعه برای ارزیابی و مقایسه مدل از شاخص‌های ضریب تعیین (R²)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، ضریب تغییرات (CV) و ضریب باقیمانده (CRM) (معادلات ۵ تا ۸) استفاده

شد:

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{Q} \quad (\text{رابطه ۶})$$

بیوماس خشک ذرت در طول جویچه (مزرعه) شد. بیشترین و کمترین مقدار عملکرد بیوماس در تیمارهای مختلف به ترتیب در ابتدا و انتهای جویچه حاصل شد (جدول ۴) به‌جز تیمار شاهد که بیشترین عملکرد بیوماس در وسط جویچه به دست آمد (۱۷/۱۵ تن بر هکتار). ضریب تغییرات که نشان‌دهنده میزان تغییرات مکانی عملکرد بیوماس در طول جویچه بود برای تیمارهای 100%Dreq، 75%Dreq، 50%Dreq و 25%Dreq به ترتیب ۹، ۱۴، ۳۳ و ۲۳ درصد به دست آمد. افزایش سطح کم‌آبیاری سبب افزایش غیریکنواختی عملکرد محصول در طول جویچه شد. یکنواختی توزیع آب نفوذ یافته در آبیاری جویچه‌ای با مدت‌زمان آبیاری ارتباط مستقیم دارد. کم‌آبیاری سبب کاهش زمان آبیاری و در نتیجه باعث کاهش یکنواختی توزیع می‌شود. بیشترین ضریب تغییرات عملکرد بیوماس برای تیمار 50%Dreq به دلیل عملکرد بالا در ابتدای جویچه به دست آمد. دست‌یابی به عملکرد پایین بیوماس در ابتدای تیمار آبیاری کامل نسبت به وسط و انتهای این تیمار و عملکرد بالا در ابتدای تیمار 50%Dreq نسبت به ابتدای تیمارهای آبیاری کامل و 75%Dreq از نظر عمق آب نفوذ یافته توجیه‌پذیر نبود و علت احتمالی آن را می‌توان غیریکنواختی مزرعه در ایجاد شرایط رشد گیاه (نوع خاک، حاصلخیزی، تهویه و ...) عنوان کرد.

میزان کاهش عملکرد محصول به ازای غیریکنواختی عمق آب نفوذ یافته در طول جویچه به‌خوبی توسط مدل شبیه‌سازی شد (شکل‌های ۱ و ۲). شاخص‌های RMSE و NRMSE برای تخمین عملکرد بیوماس در نقاط مختلف مزرعه به ترتیب ۱/۶ تن بر هکتار و ۱۰/۱ درصد در مرحله واسنجی و ۱/۵ تن بر هکتار و ۱۱/۹ درصد در مرحله صحت‌سنجی به دست آمد. با توجه به دسته‌بندی صورت گرفته برای NRMSE توسط *Jamison et al.* (1991)، شبیه‌سازی خوب و نزدیک به عالی توسط مدل انجام شد. ضریب تبیین (R^2) بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده ۰/۷۴ به دست آمد. مقادیر RMSE برای شبیه‌سازی عملکرد بیوماس گیاه ذرت در تحقیقات دیگر نیز به دست آمد. به‌طور مثال ۳/۴۹ تن بر هکتار برای تیمارهای آبیاری کامل و کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد در پرتغال (*Parades et al.*, 2014)، ۱/۳۳ تن بر هکتار برای شرایط دیم در پنسیلوانیای آمریکا (*Mebane et al.*, 2013)، ۲/۵۲ تن بر هکتار برای شرایط آبیاری کامل در اسپانیا (*Garcia-Vila & Fereres*, 2012) و ۰/۷۵ تن بر هکتار برای تیمارهای آبیاری کامل و کم‌آبیاری و در شرایط دیم در هند (*Abedinpour et al.*, 2012) گزارش شد.

بیشترین و کمترین مقدار عملکرد شبیه‌سازی‌شده در

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$CV = \frac{S}{Q_1} \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن P_i مقادیر شبیه‌سازی‌شده، Q_i مقادیر واقعی، \bar{Q} میانگین مقادیر مشاهده‌شده، n تعداد نمونه‌ها، s انحراف عملکرد در طول جویچه و Q_1 میانگین عملکرد در طول جویچه و CV ضریب تغییرات عملکرد در طول جویچه می‌باشد. از بین پارامترهای آماری ذکرشده RMSE و NRMSE به ترتیب ریشه میانگین مربعات خطا و نرمال ریشه میانگین مربعات خطا را نشان می‌دهد و CV برای میزان تغییرات عملکرد محصول در طول جویچه تعریف شد. هرچه مقدار این ضریب کمتر باشد نشان‌دهنده یکنواختی بیشتر محصول در طول جویچه است. مقادیر NRMSE کمتر از ۱۰ نشان‌دهنده عملکرد عالی مدل، بین ۱۰ تا ۲۰ نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل و بیشتر از ۲۰ حاکی از عملکرد ضعیف مدل است (*Jamison et al.*, 1991). آماره CRM نشان‌دهنده کم برآورد یا بیش برآورد مدل است که مثبت بودن آن نشان کم برآورد و منفی بودن آن نشان بیش برآورد مدل است و هر چه قدر مطلق مقدار آن بزرگ‌تر از صفر باشد مقدار این بیش برآورد یا کم برآورد بیشتر خواهد بود (*Singh et al.*, 2008).

نتایج و بحث

مقدار خطای معادله نفوذ در برآورد حجم آب نفوذ یافته در طول جویچه کمتر از پنج درصد به دست آمد. مقدار آب نفوذ یافته در هر ایستگاه با استفاده از معادله نفوذ و زمان فرصت نفوذ تعیین شد. میانگین عمق آب نفوذ یافته (میلی‌متر) در ابتدا، وسط و انتهای جویچه در تیمارهای مختلف با توجه به عمق آب نفوذ یافته در ایستگاه‌های مختلف در طول جویچه محاسبه شد (جدول ۳). کم‌آبیاری باعث کاهش یکنواختی عمق آبیاری در طول جویچه شد. بیشترین میانگین یکنواختی آبیاری برای تیمار آبیاری کامل (۹۱/۷ درصد) و کمترین یکنواختی برای تیمار 25%Dreq (۷۸/۵ درصد) به دست آمد. تیمارهای 75%Dreq و 50%Dreq نیز به ترتیب دارای یکنواختی ۹۱ و ۸۶/۸ درصد بودند.

عملکرد محصول ذرت توسط مدل با در نظر گرفتن غیریکنواختی عمق آب نفوذ یافته در طول جویچه شبیه‌سازی شد. نتایج مربوط به مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده بیوماس و بلال خشک در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در جدول (۴) نشان داده شده است.

شبیه‌سازی عملکرد بیوماس

تفاوت در عمق آب نفوذ یافته سبب تغییرات مکانی عملکرد

این تیمار، عملکرد محصول در ابتدای مزرعه کمتر از نقاط دیگر مشاهده شد که این پدیده را می‌توان به غیریکنواختی مزرعه در ایجاد شرایط رشد گیاه (مانند نوع خاک و حاصلخیزی) ربط داد.

تیمارهای مختلف به ترتیب در ابتدا و انتهای جویچه به دست آمد. مدل در ابتدای تیمار 100%Dreq بیش برآورد داشت. دلیل بیش برآورد مدل در ابتدای این تیمار، پایین بودن عملکرد محصول اندازه‌گیری شده در ابتدای مزرعه بود. به طوری که در

جدول ۳- میانگین عمق آب نفوذ یافته (میلی‌متر) در ابتدا، وسط و انتهای جویچه در تیمارهای مختلف

تیمار	آبیاری کامل			75%Dreq			50%Dreq			25%Dreq		
	ابتدا	وسط	انتها	ابتدا	وسط	انتها	ابتدا	وسط	انتها	ابتدا	وسط	انتها
اول	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴
دوم	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴
سوم	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴
چهارم	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴	۱۹/۸	۱۸/۳	۱۶/۴
پنجم	۲۵/۶	۲۴/۱	۲۲/۲	۲۵/۶	۲۴/۱	۲۲/۲	۲۵/۶	۲۴/۱	۲۲/۲	۲۵/۶	۲۴/۱	۲۲/۲
ششم	۲۶/۰	۲۴	۲۲/۰	۲۶/۰	۲۴/۰	۲۲/۰	۲۶/۰	۲۴/۰	۲۲/۰	۲۶/۰	۲۴/۰	۲۲/۰
هفتم	۳۳/۳	۳۱/۶	۳۰/۰	۳۳/۳	۳۱/۶	۳۰/۰	۳۳/۳	۳۱/۶	۳۰/۰	۳۳/۳	۳۱/۶	۳۰/۰
هشتم	۲۹/۳	۲۸/۰	۲۶/۰	۲۹/۳	۲۸/۰	۲۶/۰	۲۹/۳	۲۸/۰	۲۶/۰	۲۹/۳	۲۸/۰	۲۶/۰
نهم	۳۲/۷	۳۱/۱	۲۹/۳	۳۲/۷	۳۱/۱	۲۹/۳	۳۲/۷	۳۱/۱	۲۹/۳	۳۲/۷	۳۱/۱	۲۹/۳
دهم	۳۲/۰	۳۱/۱	۲۸/۹	۳۲/۰	۳۱/۱	۲۸/۹	۳۲/۰	۳۱/۱	۲۸/۹	۳۲/۰	۳۱/۱	۲۸/۹
یازدهم	۳۲/۴	۳۱/۱	۲۹/۱	۳۲/۴	۳۱/۱	۲۹/۱	۳۲/۴	۳۱/۱	۲۹/۱	۳۲/۴	۳۱/۱	۲۹/۱
دوازدهم	۳۵/۳	۳۳/۳	۳۰/۰	۳۵/۳	۳۳/۳	۳۰/۰	۳۵/۳	۳۳/۳	۳۰/۰	۳۵/۳	۳۳/۳	۳۰/۰
سیزدهم	۳۷/۳	۳۶/۰	۳۲/۹	۳۷/۳	۳۶/۰	۳۲/۹	۳۷/۳	۳۶/۰	۳۲/۹	۳۷/۳	۳۶/۰	۳۲/۹
چهاردهم	۲۶/۷	۲۵/۳	۲۳/۷	۲۶/۷	۲۵/۳	۲۳/۷	۲۶/۷	۲۵/۳	۲۳/۷	۲۶/۷	۲۵/۳	۲۳/۷

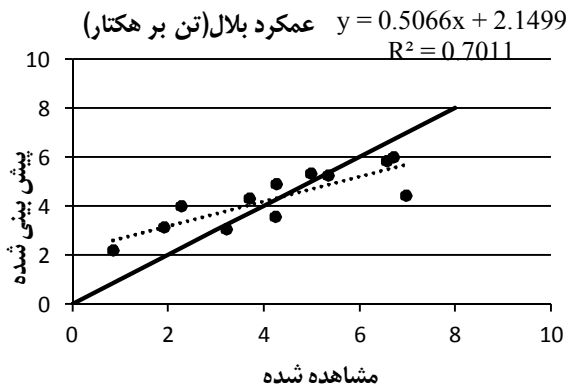
جدول ۴- مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد بیوماس و بلال ذرت علوفه‌ای

تیمار	مکان	وزن بیوماس خشک (تن بر هکتار)			وزن بلال خشک (تن بر هکتار)		
		مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	CRM (%)	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	CRM (%)
100%Dreq	ابتدا	۱۴/۲۹	۱۶/۷۵	-۱۷/۳	۶/۵۸	۵/۸۳	۱۱/۵
	وسط	۱۷/۱۵	۱۷/۱۴	۰/۰	۶/۷۳	۵/۹۷	۱۱/۳
	انتها	۱۶/۴۴	۱۵/۱۵	۷/۹	۵/۳۵	۵/۲۴	۲/۱
75%Dreq	ابتدا	۱۵/۷۱	۱۵/۷۹	-۰/۵	۴/۹۹	۵/۳۲	-۶/۷
	وسط	۱۵/۲۱	۱۴/۸۴	۲/۴	۴/۲۸	۴/۸۹	۱۲/۴۷
	انتها	۱۲/۰۳	۱۳/۱۹	-۹/۶	۳/۷۱	۴/۲۹	-۱۵/۷
50%Dreq	ابتدا	۱۶/۸۱	۱۳/۹۱	۱۷/۳	۶/۹۷	۴/۳۹	۳۷/۱
	وسط	۱۰/۱۲	۱۲/۹۲	-۲۷/۶	۲/۲۸	۳/۹۷	-۷۳/۹
	انتها	۹/۷۳	۱۰/۵۷	-۸/۶	۱/۹۲	۳/۰۹	-۶۱/۰
25%Dreq	ابتدا	۱۲/۴۷	۱۲/۰۹	۳/۱	۴/۲۵	۳/۵۳	۱۷/۰
	وسط	۱۱/۷۷	۱۰/۷۵	۸/۷	۳/۲۳	۳/۰۳	۶/۱
	انتها	۷/۸۴	۸/۲۳	-۵/۰	۰/۸۵	۲/۱۷	-۱۵۴/۳

عملکرد محصول را در هر تیمار بهتر شبیه‌سازی کرد. Parades *et al.* (2014) مراحل رشد گیاه ذرت در تیمارهای کم‌آبیاری و آبیاری کامل توسط مدل AquaCrop را شبیه‌سازی کردند. مقدار شاخص NRMSE در تخمین بیوماس و دانه به ترتیب ۱۱ و ۹ درصد به دست آمد. آن‌ها عملکرد مدل را رضایت‌بخش عنوان کردند. ضریب تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد

میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده بیوماس در هر تیمار نیز مورد مقایسه قرار گرفت. مقادیر شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE و NRMSE برای میانگین عملکرد بیوماس هر تیمار در طول جویچه به ترتیب تقریباً ۰/۳ تن بر هکتار و ۲/۴ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد خیلی خوب مدل بود (شکل ۳). مدل مقادیر میانگین

تیمار 25%Dreq نسبت به تیمار 50%Dreq ضریب تغییرات بیشتری داشته باشد هرچند نتایج شبیه‌سازی هم این نکته را تأیید می‌کند؛ اما نتایج مزرعه‌ای نشان داد که تیمار 25%Dreq دارای ضریب تغییرات کمتری نسبت به تیمار 50%Dreq است؛ زیرا عملکرد محصول در ابتدای جوینچه تیمار 50%Dreq از تیمارهای دیگر بیشتر به دست آمد که سبب زیاد شدن ضریب تغییرات عملکرد محصول و بلال خشک در طول جوینچه گردید.

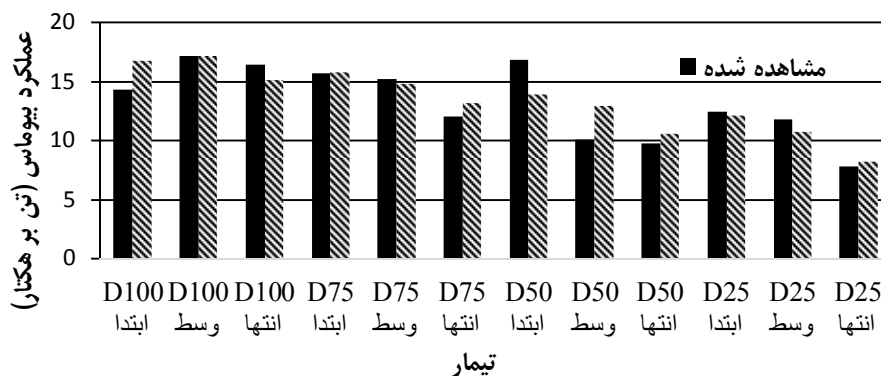


شکل ۱- مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و ضریب تبیین عملکرد بیوماس و بلال ذرت علوفه‌ای

بیوماس در طول جوینچه از تیمار آبیاری کامل تا تیمار 25%Dreq به ترتیب ۶/۵، ۹، ۱۴ و ۱۹ درصد به دست آمد. ضریب تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده کمتر از مقادیر مشاهده شده بود. علت آن است که در این تحقیق، شرایط حاصلخیزی در مدل یکسان در نظر گرفته شد و مدل غیریکنواختی محصول را بر اساس اختلاف در عمق آب آبیاری در نظر گرفت. درواقع با کمک گرفتن از مدل AquaCrop می‌توان دریافت که چند درصد از ضریب تغییرات مقادیر مشاهده شده مربوط به غیریکنواختی پروفیل عمق آب نفوذ یافته است.

شبیه‌سازی عملکرد بلال

مقادیر واقعی و شبیه‌سازی عملکرد بلال خشک ذرت علوفه‌ای در جدول (۴) نشان داده شد. در این تحقیق، چون کم‌آبیاری پس از هفت هفته و در انتهای مرحله توسعه کانوپی تا انتهای فصل رشد (مرحله گلدهی و زایشی) اتفاق افتاد تنش کم‌آبی تأثیر بیشتری بر بلال ذرت علوفه‌ای نسبت به عملکرد بیوماس گذاشت. چون تشکیل بلال بیشتر در مراحل میانی و انتهایی فصل رشد اتفاق می‌افتد درحالی‌که بیوماس بیشتر متأثر از مراحل ابتدایی و توسعه‌ای فصل رشد (دوره رویشی) است. به همین دلیل، ضریب تغییرات به دست آمده برای عملکرد بلال خشک در طول جوینچه بیشتر از ضریب تغییرات بیوماس خشک تولیدی در طول جوینچه بود. کمترین و بیشترین ضریب تغییرات بلال خشک اندازه‌گیری شده به ترتیب برای تیمار آبیاری کامل (۱۲/۱ درصد) و تیمار 50%Dreq (۷۶ درصد) به دست آمد. ضریب تغییرات در تیمارهای 75%Dreq و 25%Dreq به ترتیب ۱۵ و ۶۳ درصد بود. روند کاهش مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد بلال در طول جوینچه در مدل AquaCrop به خوبی مشاهده شد (شکل ۴). به دلیل اعمال کم آبیاری، ضریب تغییرات بلال خشک در تیمارهای 50%Dreq و 25%Dreq نسبت به دو تیمار دیگر به شدت افزایش یافت. انتظار می‌رفت



شکل ۲- مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد بیوماس ذرت علوفه‌ای

دارای دقت خوبی بود ولی تحت تنش‌های شدیدتر از دقت کمتری برخوردار بود به‌ویژه وقتی تنش در مرحله حساس رشد گیاه اتفاق بیفتد.

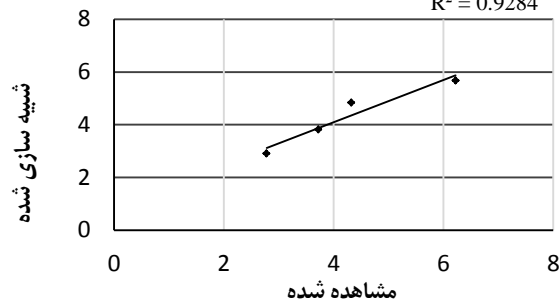
برای همه تیمارهای بیشترین مقدار شبیه‌سازی شده مربوط به ابتدای جویچه و کمترین آن مربوط به انتهای جویچه بود. مدل در هر سه مکان در تیمار آبیاری کامل میزان بلال خشک را کم برآورد کرد. بیشترین خطای مدل در شبیه‌سازی عملکرد بلال خشک انتهای تیمار Dreq 25% اتفاق افتاد. Gebreselassie *et al.* (2015) با اعمال کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد گیاه ذرت، بیشترین خطای مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد بیوماس و دانه ذرت را برای تیمار ۲۵ درصد آبیاری در سه مرحله از رشد (۸۴/۴ درصد) عنوان کردند.

میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد بلال در هر تیمار نیز مورد مقایسه قرار گرفت. مقادیر شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE و NRMSE برای میانگین هر تیمار در طول جویچه به ترتیب، ۰/۹۲، ۰/۴ تن بر هکتار و ۸/۸ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد عالی مدل بود (شکل ۳). بیشترین خطا در تیمار Dreq 25% اتفاق افتاد. مدل مقادیر میانگین بلال خشک در هر تیمار را بهتر شبیه‌سازی کرد. عملکرد مدل در تنش‌های شدید ضعیف‌تر بود.

ضریب تغییرات عملکرد بلال در طول جویچه از تیمار آبیاری کامل تا تیمار Dreq 25% به ترتیب ۶/۸، ۱۱، ۱۷ و ۲۴ درصد به دست آمد. ضریب تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده بلال خشک کمتر از مقادیر مشاهده شده بود. عملکرد بلال ذرت علوفه‌ای نیز مانند بیوماس متأثر از عوامل مختلفی است که در طول جویچه تغییرپذیر هستند. به این دلیل که در این تحقیق فقط تأثیر عمق آب نفوذ یافته بر عملکرد محصول اندازه‌گیری و به مدل داده شد و عوامل مؤثر دیگر (از جمله شرایط حاصلخیزی) برای مدل تعریف نشد ضریب تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده بلال کمتر از مقادیر مشاهده شده بود.

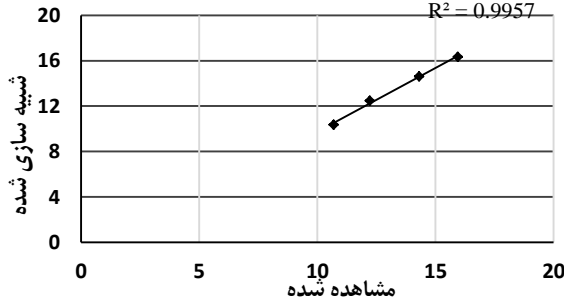
$$y = 0.7988x + 0.9042 \quad R^2 = 0.9284$$

میانگین عملکرد بلال (تن بر هکتار)



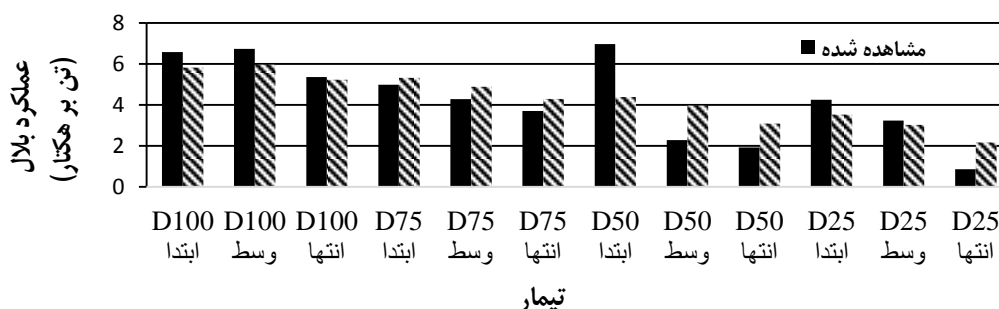
$$y = 1.1216x - 1.4709 \quad R^2 = 0.9957$$

میانگین عملکرد بیوماس (تن بر هکتار)



شکل ۳- میانگین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد بیوماس و بلال در همه تیمارها

شاخص‌های آماری RMSE و NRMSE برای تخمین عملکرد بلال خشک توسط مدل به ترتیب ۰/۶۲ تن بر هکتار و ۱۰ درصد در مرحله واسنجی و ۱/۲۵ تن بر هکتار و ۳۴/۵ درصد در مرحله صحت‌سنجی به دست آمد. با توجه به دسته‌بندی صورت گرفته برای NRMSE توسط Jamison *et al.* (1991) مدل عملکرد خوبی در تخمین بلال خشک در مرحله واسنجی داشت. ولی در مرحله صحت‌سنجی (تیمارهای کم‌آبیاری) از عملکرد موفقیت‌آمیزی برخوردار نبود. Ahmadi *et al.* (2015) گزارش کردند که مدل AquaCrop عملکرد بیوماس و دانه ذرت را تحت تنش‌های متوسط و شدید کم‌آبی به خوبی شبیه‌سازی نمی‌کند. در دیگر مطالعات با هدف شبیه‌سازی عملکرد ذرت (Katerji *et al.*, 2013; Heng *et al.*, 2009)، کلزا (Zeleke *et al.*, 2011) و گندم (Igbadun *et al.*, 2008) گزارش شد که مدل برای شبیه‌سازی آبیاری کامل و تنش‌های ملایم



شکل ۴- مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد بلال ذرت علوفه‌ای در تیمارهای مختلف

نتیجه گیری

در شبیه سازی مقدار میانگین عملکرد بیوماس و بلال خشک ذرت علوفه ای در طول جویچه داشت. نتایج این تحقیق نشان داد که می توان از مدل AquaCrop برای شبیه سازی عملکرد بیوماس ذرت علوفه ای استفاده نمود و با کمک گرفتن از این مدل می توان دریافت که چند درصد از تغییرات مکانی مقادیر مشاهده شده عملکرد بیوماس مربوط به غیریکنواختی پروفیل عمق آب نفوذ یافته است. همچنین پیشنهاد می شود مقایسه رطوبت خاک در طول جویچه با استفاده از مدل و داده های مزرعه ای صورت گیرد تا بتوان اثر تغییرات رطوبت در شرایط مزرعه ای و مدل بر عملکرد محصول را مورد بررسی قرار داد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از شورای پژوهشی دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران که از این طرح پژوهشی به شماره ۳۲۲۸۹۵/۱۰۳ حمایت مالی نمودند کمال تشکر را می نماید.

در این تحقیق، مدل AquaCrop در شبیه سازی تغییرات مکانی عملکرد ذرت علوفه ای بر اساس عمق آب نفوذ یافته در طول جویچه مورد ارزیابی قرار گرفت. کم آبیاری باعث کاهش یکنواختی عمق آب نفوذ یافته در طول جویچه گردید که منجر به افزایش ضریب تغییرات عملکرد محصول در طول جویچه شد (CV=9-33). ضریب تغییرات مکانی بلال ذرت بیشتر از بیوماس به دست آمد (CV=12.1-76). عملکرد بیوماس در مراحل واسنجی و صحت سنجی مدل به خوبی شبیه سازی شد. به طوری که مقادیر RMSE و NRMSE برای شبیه سازی عملکرد بیوماس در نقاط مختلف مزرعه به ترتیب ۱/۶ تن بر هکتار و ۱۰/۱ درصد در مرحله واسنجی و ۱/۵ تن بر هکتار و ۱۱/۹ درصد در مرحله صحت سنجی به دست آمد. ضریب تغییرات مقادیر شبیه سازی شده کمتر از مقادیر مشاهده شده بود. مدل AquaCrop، عملکرد بلال خشک ذرت علوفه ای در تیمارهای کم آبیاری را به خوبی شبیه سازی نکرد. این مدل، کار آبی بهتری

REFERENCES

- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T.B.S., Singh, M., Pathak, H. and Ahmad, T. (2012) Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 55–66.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A. and Rahnama, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100(1), 1-8.
- Ahmadi, S. H., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A. A. and Sepaskhah, A. R. (2015) Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop under Full and Deficit Irrigation Managements. *Water Resources Management*, 29(8), 2837-2853.
- Boogaard, H.L., Van Diepen, C.A., Rotter, R.P., Cabrera, J.M.C.A. and Van Laar, H.H. (1998). WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5 (No. 52). SC-DLO.
- Garcia-Vila, M. and Fereres, E. (2012) Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy*, 36, 21–31
- Gebreselassie, Y., Ayana, M. and Tadele, K. (2015). Field experimentation based simulation of yield response of maize crop to deficit irrigation using AquaCrop model, Arba Minch, Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 10(4), 269-280
- Gillies, M. H., Smith, R. J. and Raine, S. R. (2007). "Accounting for temporal inflow variation in the inverse solution for infiltration in surface irrigation." *Irrigation Science*, 25(2), 87-97.
- Heng, L.K., Hsiao, T.C., Evett, S., Howell, T. and Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCropModel for Irrigated and Water Deficient Field Maize. *Agronomy Journal*, 101: 488–498.
- Igbadun, H.E., Baanda, A.S., Tarimo, A.K.P.R. and Mahoo, H.F. (2008). Effects of deficit irrigation scheduling on yields and soil water balance of irrigated maize. *Irrigation Science*, 27, 11–23.
- Jamison, P.D., Porter, J.R. and Wilson, D.R. (1991). A test of computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, 27, 337-350.
- Katerji, N., Campi, P. and Mastrorilli, M. (2013). Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 130, 14–26.
- Kroes, J.G. and Van Dam, J.C. (2008). Reference manual SWAP version 3.2. Alterra green world Research. Wageningen. Report 1649. Available at: <http://www.swap. Alterra.nl>.
- Mebane, V.J., Day, R.L., Hamlett, J.L., Watson, J.E. and Roth, G.W. (2013). Validating the FAO AquaCrop model for rain-fed maize in Pennsylvania. *Agronomy Journal*, 105, 419–427.
- Paredes, P., de Melo-Abreu, J.P., Alves, I., Pereira, L.S. (2014). Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agricultural Water Management*, 144, 81–97.

- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Freres, E. (2012). Reference manual AquaCrop, FAO, land and water division, Rome Italy.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. (2009). AquaCrop. The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101, 438-447.
- Sepaskhah, A. R., Bazafshan, A. R. and Shirmohammadi - Aliakbarian, Z. (2006). Development and evaluation of model for yield production of wheat, maize and sugarbeet under water and salt stresses. *Biosystems Engineering*. 93(2), 139-152.
- Smith, M. (1992). CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management (No. 46). Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- Stockle, C.O., Matrin, S.A. and Campbell, G.S. (1994). Crop syst, acroping system simulation moel: water/ nitrogen budget crop yield. *Agricultural systems*, 46, 335-359.
- Stricevic, R., Dzeletovic, Z., Djurovic, N. and Cosic, M. (2014). Application of the AquaCrop model to simulate the biomass of *Miscanthus x giganteus* under different nutrient supply conditions." *GCB Bioenergy*, doi 10.1111/gcbb. 12206.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi, S., Stockle, C. and Steduto, P. (2009). Asswssment of AQUACROP, cropsyst, and wofost models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*, 101, 509-521.
- Zelege, K.T., Luckett, D. and Cowley, R. (2011). Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. *Agronomy Journal*, 103,1610-1618.
- Ziaii, G.; Babazadeh, H.; Abbasi, F.; and Kaveh, F. (2015). Evaluation of the AquaCrop and CERES-Maize Models in Assessment of Soil Water Balance and Maize Yield. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(4), 369-518. (In Farsi)
- van Dam, J.C., Huygen, J., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., Kabat, P., van Walsum, P.E.V., Groenendijk, P. and van Diepen, C.A. (1997). Theory of SWAP Version 2.0, Report #71. Department Water Resources, Wageningen Agricultural University, 167 pp.