نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۵، جلد ۱۳، آذر - دی ۱۳۹۸، ص. ۱۵۳۷-۱۵۲۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 13, Dec.-Jan. 2019, p. 1527-1537

# تعیین بهره‌وری آب نرمال شده و بررسی حساسیت مدل آکوکراپ برای گیاه تربچه

مهری حاجی‌زاده[۱]، علی رحیمی خوب[۲*]، ساسان علی‌نیا فرد[۳]، مریم وراوی‌پور[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۳۰

## چکیده

مدل آکواکراپ یکی از مدل‌های شبیه‌ساز عملکرد محصول است که برای مدیریت کم آبیاری توسط کارشناسان فائو ارائه شده است. این مدل داده-های ورودی کمتری نسبت به سایر مدل‌های مشابه لازم دارد. یکی از داده‌های وردی این مدل پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده است که باید برای هر گیاه معلوم باشد. این پارامتر برای گیاه تربچه که جزء گیاهان C3 است تاکنون تعیین نشده است، لذا هدف نخست این پژوهش تعیین آن برای منطقه پاکدشت و هدف دوم آن تحلیل حساسیت مدل آکواکراپ نسبت به داده‌های ورودی تبخیر و تعرق مرجع (ETo)، بهره‌وری آب نرمال شده ($WP^*$)، پوشش گیاهی در مرحله اولیه رشد (CCo) و حداکثر پوشش گیاه (CCx) است. این پژوهش درگلخانه تحقیقاتی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران در منطقه پاکدشت در سال زراعی ۱۳۹۶ انجام شد. برای به‌دست آوردن پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده گیاه تربچه یک دوره کشت شد و با استفاده از روش Steduto et al., 2009 مقدار آن ۱۱/۳ گرم بر متر مربع تعیین شد. برای تعیین حساسیت مدل به داده‌های ورودی از روش Beven et al., 1979 استفاده شد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد مدل آکواکراپ بیشترین حساسیت را به پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده برای شرایط آبیاری کامل دارد که در آن ضریب حساسیت ۰/۸۸ برآورد گردید. در شرایط کم آبیاری بیشترین حساسیت مدل بر روی پارامتر تبخیر و تعرق مرجع است و هر چه کم آبیاری شدیدتر باشد ضریب حساسیت افزایش می‌یابد. ضریب حساسیت در کم آبیاری ۶۰ درصدی برابر ۱۰/۱۹- برآورد شد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی حساسیت مدل آکوکراپ برای سایر محصولات و مناطق مختلف انجام گردد.

**واژه‌های کلیدی:** تبخیر و تعرق مرجع، حداکثر پوشش گیاه، ضریب حساسیت، پوشش گیاهی اولیه

## مقدمه

مدل آکوکراپ یک ابزار با ارزش برای مدیریت آب در مزرعه و محاسبه اثر کم آبیاری بر عملکرد محصول می‌باشد. سادگی، نیاز به حداقل داده ورودی و دقت قابل قبول مدل از مزایای استفاده از آن می‌باشد. با توجه به کاهش منابع آب، تغییرات اقلیمی و کاهش سهم بخش کشاورزی از آب موجود به علت رشد صنعت و جمعیت شهری، بهبود راندمان مصرف آب[۵] (WUE) مبتنی بر تولید بیشتر به ازای هر واحد آب مصرفی بسیار با اهمیت است. برای نیل به این هدف، آگاهی دقیق از رابطه بین مصرف آب و عملکرد محصول ضروری است (Alizadeh et al. 2010). مدل رشد گیاهی آکوکراپ، در حال حاضر یکی از جدیدترین مدل‌های رشد گیاهی است و یک مدل شبیه‌سازی رشد بر اساس مقدار آب مصرفی در گیاه می‌باشد.

از زمان ارائه مدل آکواکراپ تاکنون پژوهش‌های زیادی در رابطه با صحت سنجی و واسنجی برخی از پارامترهای مدل آکواکراپ برای محصولات مختلف در مناطق مختلف جهان انجام شده است. Abedinpour et al. (2011) اقدام به واسنجی و اعتبارسنجی مدل آکواکراپ تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری، در منطقه نیمه‌خشک مزرعه مرکز تحقیقات منابع آب دهلی‌نو در هندوستان برای محصول ذرت دانه‌ای پرداختند. تیمارهای اعمال شده شامل، ۱- تیمار بدون آبیاری و بسنده‌کردن به بارش ۲- تیمار آبیاری در رطوبت ۵۰ درصد ظرفیت زراعی ۳- آبیاری در رطوبت ۷۵ درصد ظرفیت زراعی و ۴- تیمار آبیاری‌کامل بودند. کشت را در دو سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ انجام دادند و داده‌های سال اول را جهت واسنجی و داده‌های سال دوم را برای اعتبارسنجی مدل به‌کار بردند. براساس نتیجه‌گیری صورت گرفته، بیشترین و کمترین دقت مدل در بحث پیش‌بینی، به‌ترتیب مربوط به تیمار آبیاری کامل و بدون آبیاری بود. همچنین در

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
۲- استاد گروه آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران
۳- استادیار گروه علوم باغبانی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
۴- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی،پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
(* - نویسنده مسئول: Email: akhob@ut.ac.ir)

5- Water Use Efficiency

بحث خطای شبیه‌سازی کمترین و بیشترین خطا برای صفت عملکرد دانه ۰/۴۷ و ۵/۹۱ درصد بود و برای بیوماس کل، خطاها در محدوده ۴/۳۶ و ۱۱/۰۵ درصد قرار داشت. درکل آنها عملکرد مدل آکواکراپ را برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی عملکر دانه و بیوماس کل محصول ذرت دانه‌ای تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری قابل قبول ارزیابی کردند Zhang et al. (2013) به منظور بررسی عملکرد مدل آکواکراپ بر روی محصول گندم زمستانه در شرایط دیم، مطالعه‌ای در فلات جنوبی چین انجام دادند و داده‌های آزمایش مزرعه‌ای چند ساله برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در شبیه‌سازی بیوماس، پوشش گیاهی، رطوبت خاک و عملکرد دانه را مورد استفاده قرار دادند. بر اساس نتایج آنها، محدوده خطا (ریشه میانگین مربعات) از ۰/۱۶ تا ۰/۳۸ تن در هکتار برای شبیه‌سازی بیوماس، ۱/۸۷ تا ۴/۱۵ درصد برای پوشش گیاهی، ۰/۵ تا ۱/۴۴ تن در هکتار برای عملکرد دانه و ۵/۷ تا ۲۲/۵۶ میلی‌متر برای رطوبت حجمی خاک به دست آمد. به طور کلی، عملکرد مدل برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی و عملکرد از بیوماس و رطوبت حجمی خاک دقیق‌تر بود و مدل آکوکراپ قادر به شبیه‌سازی عملکرد گندم زمستانه در شرایط دیم می‌باشد و برای بهبود بیشتر این مدل ممکن است تغییر در شیوه‌های مدیریتی مختلف از جمله سطح باروری خاک و آبیاری در این منطقه لازم باشد.

Iqbal et al (2014) مدل آکواکراپ را برای محصول زمستانه گندم در دشت شمالی چین واسنجی و صحت سنجی قراردادند. نتایج بررسی آن ها نشان داد، عملکرد زیست توده در شرایط مختلف کم آبیاری با دقت مناسبی توسط مدل برآورد می شود. Kim . (2015) et al شبیه‌سازی‌های آکواکراپ و برآوردهای RS تحت شرایط بدون تنش برای رشد پوشش گیاهی سه محصول ذرت و جو و یونجه در اعتبارسنجی و واسنجی مورد مقایسه قرار دادند که جهت ارزیابی مقادیر شاخص ضریب کارایی آن‌ها به‌ترتیب ۰/۹۴، ۰/۹۷، ۱ و ۰/۹۷، ۰/۹۷، ۰/۸۵ بدست‌آمد.

مدل آکواکراپ برای تعدادی محصول و برخی از مناطق ایران مورد ارزیابی قرار گرفته است. Rahimikhoob et al. (2014) مدل آکواکراپ را برای ذرت علوفه‌ای در منطقه قزوین مورد واسنجی قرار دادند. بر اساس نتایج آنها متوسط خطای مدل حدود ۱۰ درصد تعیین شد. Haydarinia et al. (2012) از این مدل برای برنامه ریزی کم آبیاری پنبه در ایستگاه هاشم آباد گرگان استفاده کردند. در تحقیق ایشان، برنامه آکواکراپ با استفاده از داده های زراعی دو سال متناوب واسنجی گردید ضریب تعیین در شبیه سازی محصول در دو سال، به ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۷۶ بدست آمد. Khalili et al. (2014) آکواکراپ را برای شبیه سازی عملکرد گندم دیم در خراسان شمالی بکار بردند. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که مدل آکواکراپ با دقت بالایی قابلیت مدل سازی عملکرد محصول را دارا می باشد. به طوری که ضریب تعیین، میانگین مجذور مربعات خطای استاندارد و نرمال شده، راندمان مدل و شاخص توافق بین مقادیر عملکرد دانه اندازه گیری شده و شبیه سازی شده، به ترتیب۰/۸۶، ۰/۰۶۲، ۵/۲۳۵ ، ۰/۹۱۷، ۰/۸۷۷ به دست آمد. Mohammadi et al. (2015) به منظور اعتبار سنجی مدل آکواکراپ تحت تنش همزمان شوری و کم آبی، در مشهد مدل فوق را مورد واسنجی و صحت سنجی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد مدل دقت خوبی در شبیه سازی دارد. همچنین تحلیل حساسیت آن‌ها نشان داد که مدل نسبت به ضریب گیاهی، بهره روی آب نرمال شده، شاخص برداشت (HI0)، رطوبت در ظرفیت زراعی ، شرایط اولیه رطوبت خاک حساس‌تر از سایر پارامترهاست.

مدل آکواکراپ دارای پارامترهای ورودی متعددی است که می توان به چهار گروه تقسیم شود: ۱) پارامترهای آب و هوایی مثل دمای حداقل و حداکثر روزانه، بارندگی و تبخیر و تعرق مرجع، ۲) پارامترهای مربوط به خاک مثل بافت خاک، قابلیت نگهداری رطوبت در خاک در لایه‌های مختلف خاک،۳) پارامترهای مقادیر عمق آبیاری در طول فصل رشد و ۴) پارامترهایی که مربوط به گیاه می‌شود مثل دماهای پایه و حداکثر، پوشش گیاهی، تعداد بوته‌ها در هکتار و ضریب بهره‌وری نرمال شده. بسیاری از پارامترهای فوق برای گیاه ثابتند و یا با اندازه‌گیری مشخص می‌شوند ولی برخی از پارامترها را نمی‌توان با قطعیت برآورد کرد مثل تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ETo)، بهره‌وری نرمال شده آب ($WP^*$)، درصد پوشش گیاهی مرحله اولیه رشد (CCo) و حداکثر پوشش گیاهی (CCx). تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از مدل‌هایی که در این ارتباط تدوین شده برآورد می‌شود. مدلی که برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع استفاده می‌شود بستگی به داده‌های هواشناسی دارد که در دسترس است. سازمان فائو برای شرایطی که داده‌های کامل هواشناسی اندازه‌گیری شده باشد معادله پنمن مانتیث فائو را توصیه کرده است (Allen et al. 1998). ولی وقتی برخی از پارامترها اندازه‌گیری نشده باشد سایر روش‌های تجربی و ریاضی استفاده می‌شود و در این شرایط بدیهی است که مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع با خطا برآورد می‌شود. مدل آکواکراپ برای برآورد زیست توده در طی رشد از پارامتر درصد پوشش گیاهی استفاده می‌کند. این پارامتر در مراحل مختلف رشد با استفاده از معادلاتی در مدل آکواکراپ بر اساس پوشش گیاهی اولیه و حداکثر پوشش گیاهی در مرحله میانی تعیین می‌گردد. بهره‌وری آب نرمال شده یکی از پارامترهای مهم برای تعیین زیست‌توده گیاهی در مدل آکواکراپ است (Karimi organy et . al 2015)بهره‌وری نرمال شده آب در مدل آکواکراپ، میزان عملکرد گیاه در واحد سطح در شرایط پوشش ۱۰۰ درصد (کامل) و بدون هیچ‌گونه تنشی (اعم از تنش آبی، شوری و دمایی) تعریف شده است. این پارامتر در نرم‌افزار آکواکراپ برای هر گیاه ثابت در نظر گرفته شده است ( Steduto et al. 2009). تحقیقات نشان داده است این پارامتر مقدار مشخص و

ثابتی نمی‌باشد و برای هر منطقه و نوع رقم گیاه متفاوت است (Karimi organy et al. 2015).

هدف نخست از انجام این پژوهش تعیین پارامتر بهره وری نرمال شده آب برای گیاه تربچه می باشد این پارامتر تاکنون برای این گیاه که جزو نباتات C3 می‌باشد به دست نیامده است. همچنین پارامترهای مدل آکوکراپ پوشش کنوپی (CC)، تبخیر و تعرق مرجع ($ET_0$)، بهره وری آب نرمال شده ($WP^*$) از پارامترهای مهم مدل به شمار می روند. ازآنجایی که پارامترهای ورودی مدل بر نتایج خروجی آن موثر است به همین علت ورودی ها باید با دقت بالایی اندازه گیری یا تعیین شوند. برای تعیین CC باید دو پارامتر پوشش گیاهی اولیه $CC_o$ و $CC_x$ تعیین شوند لذا این دو پارامتر باید با دقت تعیین شوند. لذا هدف بعدی این پژوهش این است که پارامترهای $CC_o$، $CC_x$، $ET_o$ و $WP^*$ به عنوان پارامتر های مهم مدل آکوکراپ آنالیز حساسیت شوند و معلوم شوند کدام یک از پارامترها حساس تر هستند؟ و تغییر هر کدام از پارامترها چه تاثیری بر نتایج مدل خواهد گذاشت؟ از آنجائیکه مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد زیست توده برای شرایط کم آبیاری بنیان شده، لذا در این پژوهش حساسیت هر یک از پارامترهای فوق بر اثر کم آبیاری مورد بررسی قرار گرفته است. محصول مورد بررسی گیاه تربچه و منطقه مورد مطالعه شهرستان پاکدشت می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### تشریح مدل

در این پژوهش از نسخه ۶ مدل آکواکراپ استفاده شد. در این مدل، مقدار عملکرد محصول (زیست‌توده) تا i امین روز پس از کاشت از رابطه (۱) حساب می‌شود (Steduto et al. 2009 ) :

$$B = WP* \sum \frac{T_{r.i}}{ET_{o.i}} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، B عملکرد محصول (زیست‌توده) قسمت هوایی گیاه تا i امین روز پس از کاشت ( گرم بر متر مربع)، $WP^*$ بهره‌وری آب نرمال شده (گرم بر متر مربع) ، $T_{r,i}$ تعرق روزانه گیاه (میلیمتر در روز) و ETo,i تبخیر و تعرق مرجع (میلی متر در روز) می‌باشند.

پارامتر بهره‌وری آب (WP) عبارتست از عملکرد محصول به ازای واحد آب مصرفی گیاه است و در مدل آکواکراپ از نرمال شده آن برای شبیه سازی زیست توده استفاده می‌کند. در تعریف پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده ($WP^*$) فرض شده که گیاه بدون تنش آبی و کمبود مواد غذایی رشد می‌کند و این پارامتر از تقسیم بهره‌وری آب بر تبخیر و تعرق مرجع حاصل می‌شود. از آنجا که تبخیر و تعرق مرجع یک پارامتر اقلیمی است، لذا بهره‌وری آب نرمال شده برای هر گیاه در اقلیم‌های مختلف مقدار ثابت فرض شده است. بهره‌وری آب نرمال شده در مدل آکواکراپ بصورت زیر تعریف شده است Steduto (et al. 2009) :

$$WP* = \frac{B}{\left(\sum \frac{T_{r.i}}{ET_{o.i}}\right)} \qquad (۲)$$

در رابطه( ۲)، $WP^*$ بهره‌وری آب نرمال شده (گرم بر مترمربع)، B عملکرد زیست‌توده تا i امین روز پس از کاشت (گرم بر مترمربع)، $T_{r,i}$ تعرق تجمعی گیاه تا i امین روز پس از کاشت (میلی‌متر) و $ET_{o,i}$ تبخیر و تعرق مرجع تا i امین روز پس از کاشت (میلی‌متر) می‌باشد. برای تعیین $WP^*$، پراکنش داده‌های نسبت تجمعی تعرق گیاه به تبخیر– تعرق مرجع ($\sum \frac{Tr}{ETo}$) و زیست‌توده تجمعی (B) رسم شده و ضریب بهترین خطی که مبداء مختصات به نقاط برازش گردد، بهره‌وری آب نرمال شده خواهد بود (Steduto et al. 2009 ). در این پژوهش ی مقدار $T_{r,i}$ با استفاده از مدل آکواکرپ تعیین شد. پارامتر $T_{r,i}$ در مدل آکواکراپ از رابطه زیر محاسبه می‌شود Steduto (et al. 2009):

$$T_r = K_S \times K_C \times CC \times ET_o \qquad (۳)$$

در رابطه فوق، $K_s$ ضریب تنش آبی، $K_C$ ضریب گیاهی، CC ضریب پوشش گیاهی و $ET_o$ تبخیر و تعرق مرجع (mm) می‌باشند. در این پژوهش برای تعیین $wp^*$ برنامه آبیاری به‌صورتی بوده که گیاه تحت تنش آبی قرار نگیرد، لذا ضریب $K_s$ برابر با یک در نظر گرفته شد. ضریب گیاهی $K_C$ نسبت بین تبخیر و تعرق گیاه بدون تنش آبی به تبخیر و تعرق مرجع است. این ضریب در مدل آکواکراپ با استفاده از روش ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو (Allen et al. 1998) در طول دوره رشد برآورد می‌شود ضریب پوشش گیاهی در مدل آکواکراپ از زمان کاشت بذر تا پایان مرحله توسعه با استفاده از دو معادله زیر برآورد می‌شود (Steduto et al. 2009):

$$CC = CC_o \times e^{(CGC \times t)} \qquad (۴)$$

$$CC = CC_x - [CC_x - CC_o \times e^{(-CGC \times t)}] \qquad (۵)$$

رابطه (۴)، برای دوره زمانی کاشت بذر تا نیمه مرحله توسعه استفاده می‌شود و رابطه (۵) برای دوره زمانی از نیمه مرحله توسعه تا آخر مرحله توسعه است. در معادلات فوق، CC پوشش گیاهی در t روز پس از کاشت، $CC_x$ حداکثر پوشش گیاهی، $CC_o$ پوشش اولیه گیاه در زمان t=0 و CGC نرخ رشد پوشش گیاه در روز است. در روابط فوق، CDC نرخ کاهش پوشش گیاهی و t زمان بر حسب روز که از مرحله چهارم رویش (پیری) شروع می‌شود.

### مشخصات محل آزمایش

آزمایشات این پژوهش در شرایط آبیاری کامل درگلخانه

تحقیقاتی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران در منطقه پاکدشت در سال زراعی ۱۳۹۶ بر روی گیاه تربچه انجام شد. این گلخانه در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۲۷ متر واقع است. برای کشت محصول از گلدان‌هایی به ارتفاع ۱۵و قطر ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. هر ۱۵ سانتی‌متر خاک ریخته شده، کمی متراکم نموده و کناره‌های آن طوری متراکم گردید که آب در کناره‌ها به صورت مجرا، یکدفعه به انتهای گلدان حرکت نکند. کاشت بذر تربچه ابتدا در سینی کشت انجام شد، سپس بعد از۱۷روز نشاء آن‌ها به گلدان منتقل شد و با آرایش مثلثی کشت شد. دلیل انتخاب آرایش مثلثی در اختیار گذاشتن فضای بیشتر به قسمت هوایی گیاه است. فواصل گیاهان از یکدیگر ۸ سانتی‌متر و فواصل گیاهان ازدیواره، ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آبیاری گلدان‌ها به صورت دستی انجام شد. باتوجه به این موضوع که پارامتر بهره وری نرمال شده برای آبیاری کامل و بدون تنش آبی تعریف شده، به همین علت آبیاری گلدان‌ها به صورتی انجام گردید که تنش آبی به گیاه وارد نشود به منظور تعیین زمان مناسب و مقدار آبیاری در طول فصل کشت، از روابط وزنی رطوبتی استفاده شد. بدین صورت که وزن خاک خشک شده گلدان، وزن گلدان در وضعیت رطوبت زراعی (FC) و وزن گلدان در وضعیت (Wilting point) بدست آمد. حال باتوجه به وزن‌های محاسبه شده اجازه می‌دهیم ۳۰ درصد از آب از گلدان خارج شود (آب سهل‌الوصول). هر روز با وزن کردن گلدان‌ها، این میزان را کنترل می‌کنیم و زمانیکه آبیاری لازم باشد، آبیاری به میزانی که رطوبت خاک به ظرفیت زراعی برسد، صورت می‌گیرد تا گیاه دچار تنش آبی نشود در طول فصل رشد، محلول هوکلند بصورت دستی و متناوب، همراه با آب آبیاری مورد استفاده قرار گرفت. حداقل دمای مورد نیاز گیاه تربچه ۱۸-۱۶ درجه سانتی‌گراد است. دمای متوسط که بهترین رشد در آن صورت می‌گیرد حدود ۲۷-۲۲ درجه است و حداکثر دما که آسیبی به گیاه وارد نمی‌کند حدود ۳۲-۳۰ درجه سانتیگراد است. رطوبت مناسب برای رشد این گیاه حدود ۷۰٪ است و بیشتر از آن باعث بروز بیماریهای قارچی می‌شود. از نظر شدت نور لازم برای رشد بهینه مقدار ۱۵۰۰۰-۱۰۰۰۰ لوکس مناسب است و طول روز مورد نیاز ۱۴-۱۲ ساعت برای به دست آوردن عملکرد مناسب کافی است. به همین علت دمای حداکثر و حداقل گلخانه به ترتیب ۳۰ و ۱۰ سانتی گراد تنظیم شد. و هر زمان که دما از آستانه دمایی تنظیم شده کمتر یا بیشتر شود دستگاه فن و پد به طور اتوماتیک روشن می‌شود و دمای گلخانه را تنظیم خواهد کرد. درزمستان دمای آب آبیاری کم است و باعث صدمه به ریشه گیاه تربچه می شود که در نتیجه باید آب مصرفی به دمای ۴۰-۳۵ درجه رسانده شود تا دمای محیط ریشه به ۲۳-۲۰ درجه برسد. هر هفته ۳ گلدان برای اندازه گیری بیوماس (زیست توده) کنار گذاشته شد. نمونه‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد برای خشک شدن قرار داده شدند و این فرآیند تا ثابت شدن وزن نمونه‌ها ادامه داشت. وزن خشک نمونه‌ها بعنوان عملکرد ماده خشک (زیست توده) ثبت گردید. عوامل محیطی مهم و تأثیرگذار بر تبخیر- تعرق گیاهان گلخانه‌ای عبارتند از:۱) نور،۲) دما، ۳) رطوبت نسبی هوا و ۴)تهویه. دما در گلخانه با محیط خارج از آن متفاوت بوده و رطوبت داخل گلخانه به مراتب بیشتر از خارج می‌باشد. قبل از کشت محصولات، گلخانه به ابزارهای لازم برای اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی مؤثر بر تبخیر- تعرق، مجهز گردید. این ابزارها شامل دماسنج، رطوبت‌سنج، فشارسنج و لوکس‌متر بود که با استفاده از آنها پارامترهای دما، رطوبت، فشار هوا و کمبود فشاربخاراشباع و تشعشع داخل گلخانه اندازه‌گیری شد پارامتر های مورد نظر به صورت روزانه ثبت گردید. پارامتر ساعت آفتابی از ایستگاه هواشناسی پردیس استخراج شد. تخمین دقیق تبخیر- تعرق در گلخانه، یک پارامتر کلیدی در مصرف بهینه آب در کشت گلخانه‌ای محسوب می‌شود. اندازه‌گیری غیرمستقیم تبخیر- تعرق در گلخانه روشی برای محاسبه تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی می‌باشد. تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش پنمن فائو مانتیث (Allen et al., 1998) محاسبه شد. طبق پیشنهاد فائو، سرعت باد در گلخانه ۰/۵ متر بر ثانیه درنظر گرفته شد.

### تحلیل حساسیت

متغیرهای مدل‌های چند متغیره مثل مدل آکواکراپ ابعاد و دامنه تغییرات مختلفی دارند و برای مقایسه ضریب حساسیت متغیرها نسبت بهم باید از روشی استفاده شود که ضریب حساسیت نسبی بدون بعد برآورد شود. در این پژوهش از روش (Beven et al. 1979) استفاده شده است.

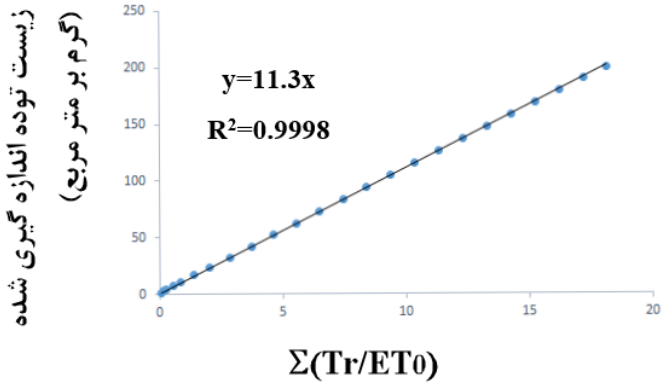
$$S_{Vi} = \lim_{\Delta Vi \to 0} \left( \frac{\Delta y / y}{\Delta vi / vi} \right) = \frac{\partial y}{\partial vi} \cdot \frac{vi}{y} \qquad (۶)$$

در معادله فوق، $S_{vi}$ ضریب حساسیت نسبی بدون بعد است (از این به بعد" ضریب حساسیت" نامیده می‌شود)، i vi امین متغیر و y عملکرد محصول است. بطور کلی، مثبت و یا منفی بودن ضریب حساسیت یک متغیر نشان دهنده این است که با افزایش متغیر، عملکرد محصول افزایش و یا کاهش می‌یابد. بزرگ بودن ضریب حساسیت به این معنی است که متغیر مورد بررسی اثرات بیشتری بر روی عملکرد محصول دارد. از نظر ترسیمی، ضریب حساسیت شیب زاویه منحنی حساسیت در نقطه مقدار اصلی متغیر مدل است. در این پژوهش مقادیر اصلی پارامترهای مورد بررسی شامل $CC_o$، $CC_x$، $ET_o$ و $WP^*$ که مشخص شدند، یک دامنه تغییر برای هر کدام معین شده و در این دامنه مقادیر مختلفی انتخاب و با ارائه آنها به مدل، عملکرد زیست توده شبیه‌سازی می‌گردد. برای تعیین آنالیز حساسیت مدل، در هر نوبت یکی از پارامترهای ورودی مدل با افزایش و کاهش ۵ تا ۱۵٪ با نمو ۵ درصد تغییر داده شد. و بقیه پارامتر ها ثابت

نگه داشته شدند و مدل با استفاده از شرایط جدید اجرا گردید. سپس برای هر یک از متغیرهای مورد بررسی، پراکنش مقادیر متغیر ورودی و عملکرد زیست توده ترسیم و بهترین معادله برازش بین نقاط تعیین گردید. ضریب حساسیت هر متغیر از حاصل ضرب شیب معادله در نقطه مقدار اصلی در نسبت مقدار اصلی متغیر ورودی به عملکرد (Vi/y) برآورد شد. از آنجائیکه مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد زیست توده برای شرایط کم آبیاری بنیان شده، لذا مطالعه اثر کم آبیاری بر روی ضریب حساسیت هر یک از پارامترهای فوق مهم می‌باشد. در این تحقیق پس از تعیین $WP^*$، مدل فوق با ۴ سناریو آبیاری مورد اجرا قرار گرفت و ضریب حساسیت برای این سناریوها مورد بررسی قرار گرفت. . این ۴ سناریو عبارت بودند: ۱) آبیاری کامل (I1)، ۲) کم آبیاری به میزان ۸۰ درصد آبیاری کامل (I2)، ۳) کم آبیاری به میزان ۷۰ درصد آبیاری کامل (I3) و ۴) کم آبیاری به میزان ۶۰ درصد آبیاری کامل (I4).

## نتایج و بحث

دستاوردهای این تحقیق در دو بخش تقسیم می‌شود. در بخش اول پارامتر بهره‌وری نرمال شده گیاه تربچه محاسبه گردید و در بخش دوم پارامترهای CC، $ET_o$ و $WP^*$ به عنوان پارامتر های مهم مدل آکوکراپ آنالیز حساسیت شد. همانطور که در بخش مواد و روش‌ها ذکر شد، برای تعیین پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده با استفاده از روش Steduto، پراکنش داده‌های نسبت تجمعی تعرق گیاه به تبخیر- تعرق مرجع ($\sum \frac{Tr}{ETo}$) و زیست‌توده تجمعی رسم شده و این پارامتر برابر با ضریب بهترین خط برازش شده به نقاط است. لذا پراکنش داده‌های نسبت تجمعی تعرق گیاه به تبخیر- تعرق مرجع و زیست‌توده تجمعی در شکل (۱) ارائه شده است. ضریب معادله خطی که از مبداء مختصات به این نقاط برازش شده، بر واحد گرم در متر مربع است ملاحظه می‌شود، نقاط مقدار بهره‌وری آب نرمال شده با دقت بسیار خوبی بر روی بهترین خط انطباق (۱:۱) قرار دارند و ضریب تبیین حدود ۱ می‌باشد. و لذا بهره‌وری آب نرمال شده با استفاده از روش Steduto برابر ۱۱/۳ گرم بر مترمربع است.




**شکل ۱- رابطه بین عملکرد زیست‌توده و تعرق نرمال شده تجمعی برای تبخیر-تعرق**

مدل آکواکراپ با استفاده از مقدار واسنجی شده $WP^*$ با اعمال ۴ سناریو مختلف آبیاری (I1 تا I4) مورد اجرا قرار گرفت و مقدار زیست توده در انتهای دوره رشد بترتیب ۲/۲۸، ۲/۰۹ و ۱/۸۳ تن در هکتار برآورد شد. مقادیر اصلی پارامترهای ورودی مدل که در این پژوهش مورد تحلیل حساسیت قرار گرفتند ( $ET_o$، $WP^*$، CCo ، CCx) و عملکرد واقعی زیست‌توده در سناریوهای آبیاری در جدول (۱) ارائه شده است. برای تحلیل حساسیت هر یک از پارامترهای ورودی مدل با افزایش و کاهش ۱۵٪ با نمو ۵ درصد تغییر داده شد و با استفاده از مدل آکواکرپ عملکرد زیست توده شبیه سازی شد.

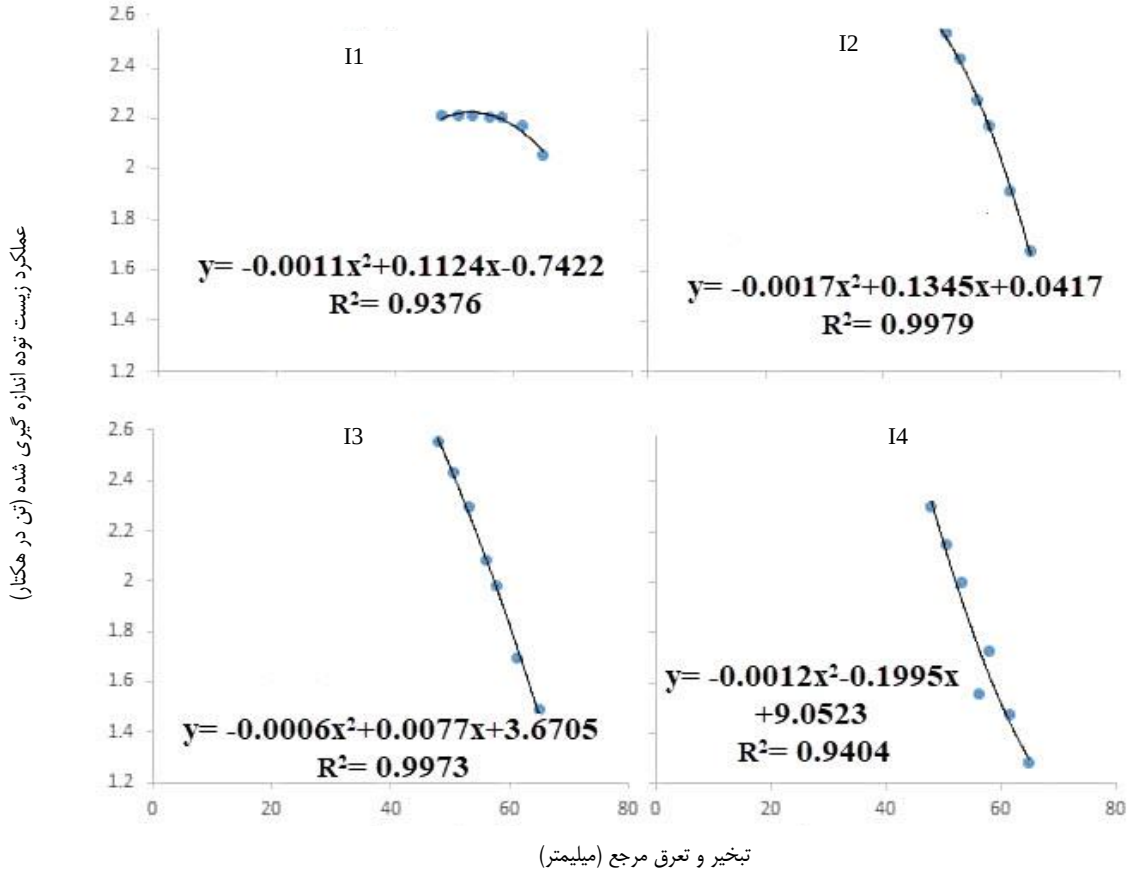
تغییرات عملکرد زیست توده در مقابل متغیرهای تبخیر و تعرق گیاه مرجع ($ET_0$)، بهره وری نرمال شده ($WP^*$)، پوشش گیاهی در مرحله اولیه رشد (CCo) و حداکثر پوشش گیاه (CCx) برای سناریوهای مختلف آبیاری در اشکال ۲ تا ۵ ارائه شده است. بهترین معادله با ضریب تعیین بالا به نقاط برازش شد و این معادلات در اشکال ارائه شده است.

در اشکال فوق ملاحظه می‌شود مقادیر ضریب تعیین کلیه متغیرها نسبت به عملکرد زیست توده نزدیک به یک است و نشاندهنده آن است که تغییرات زیست توده تا حدود ۱۰۰ درصد از معادلات نشان داده شده در شکل پیروی می‌کند. مقایسه اشکال با هم نشان می‌دهد فقط متغیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع از تابع درجه ۲ پیروی می‌کند و بقیه متغیرها تابع خطی هستند.

**جدول ۱- مقادیر اصلی $ET_0$ در دوره رشد، CCo و CCx و عملکرد واقعی زیست توده در تیمارهای آبیاری.**

| عملکرد واقعی زیست توده در سناریوهای مختلف آبیاری( Ton/ha) | | | | $CC_x$ % | $CC_0$ % | $WP^*$ gr $m^{-2}$ | $ET_0$ (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 60% I4 | 70% I3 | 80% I2 | آبیاری کامل I1 | | | | |
| 1/835 | 2/085 | 2/282 | 2/6 | 97 | 7/07 | 11/3 | 56 |

با توجه به معادلات مندرج در شکل (۲) با سناریو آبیاری کامل (I1)، حداکثر برآورد زیست توده با مقدار $ET_0$ برابر ۵۱/۱ میلی‌متر بدست می‌آید که این مقدار نسبت به مقدار واقعی (۵۶ میلی‌متر) حدود ۹۱ درصد است. به عبارتی اگر مقدار تبخیر و تعرق مرجع با دقتی بیش از ۹۱ درصد وارد مدل آکواکراپ شود، در این صورت عملکرد زیست توده کمتر از واقعیت شبیه‌سازی می‌شود. اگر دقت برآورد کمتر از ۹۱ درصد باشد، در این صورت عملکرد زیست توده بیش از واقعیت شبیه‌سازی می‌شود و روند افزایشی دارد. در سناریو کم آبیاری به میزان ۸۰ درصد آبیاری کامل (I2) حداکثر برآورد زیست توده با مقدار $ET_0$ برابر ۳۹/۶ میلی‌متر بدست می‌آید که این مقدار حدود ۷۰ درصد مقدار واقعی $ET_0$ است که این میزان در بازه تغییرات این پژوهش نبوده و از رابطه ریاضی مندرج در شکل بدست آمده است و در عمل این مقدار خطا اتفاق نمی‌افتد. همچنین در سناریوهای کم آبیاری ۷۰ و ۸۰ درصد (I3 و I4) نیز مقادیر حداکثر برآورد زیست توده با مقدار $ET_0$ بترتیب برابر ۶/۴ و ۸۳ میلی‌متر شبیه‌سازی می‌شود که با بازه مورد بررسی این پژوهش فاصله زیادی دارد.

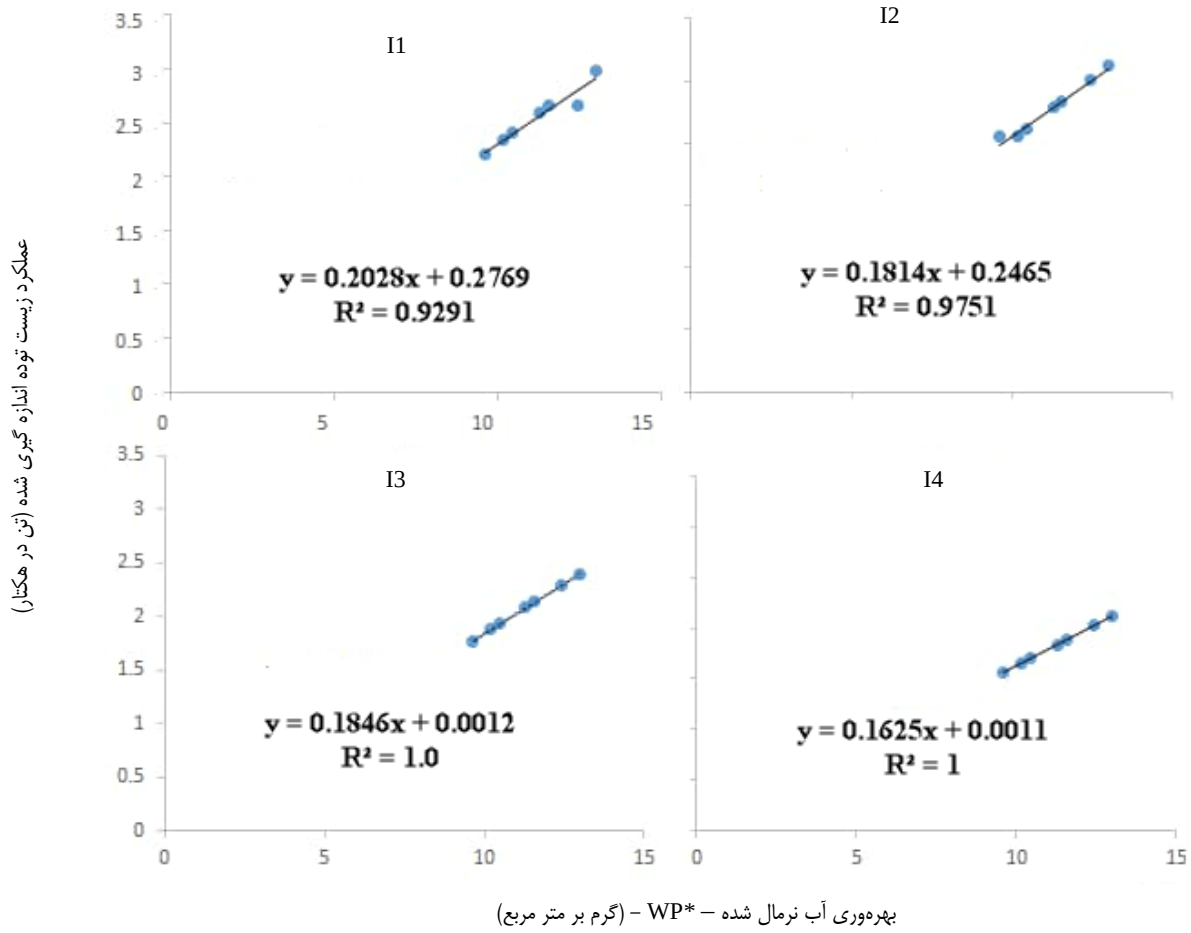



**شکل۲-تغییرات عملکرد زیست توده و تبخیر و تعرق گیاه مرجع در سناریوهای مختلف آبیاری**

در مجموع در بازه مورد بررسی این پژوهش یعنی بازه $ET_0$ بین ۴۷/۶ تا ۶۴/۴ میلی‌متر، روند شبیه سازی عملکرد زیست توده معکوس دارد یعنی اگر مقدار $ET_0$ بیش از مقدار واقعی وارد مدل آکواکراپ شود، عملکرد کمتر از واقعیت برآورد می‌شود. با استفاده از معادله (۶) ضریب حساسیت مدل آکواکراپ نسبت به متغیر $ET_0$ برای تیمارهای I1 تا I4 بترتیب۰/۲۳-، ۱/۳۸-، ۱/۶۰- و ۱۰/۱۹- برآورد

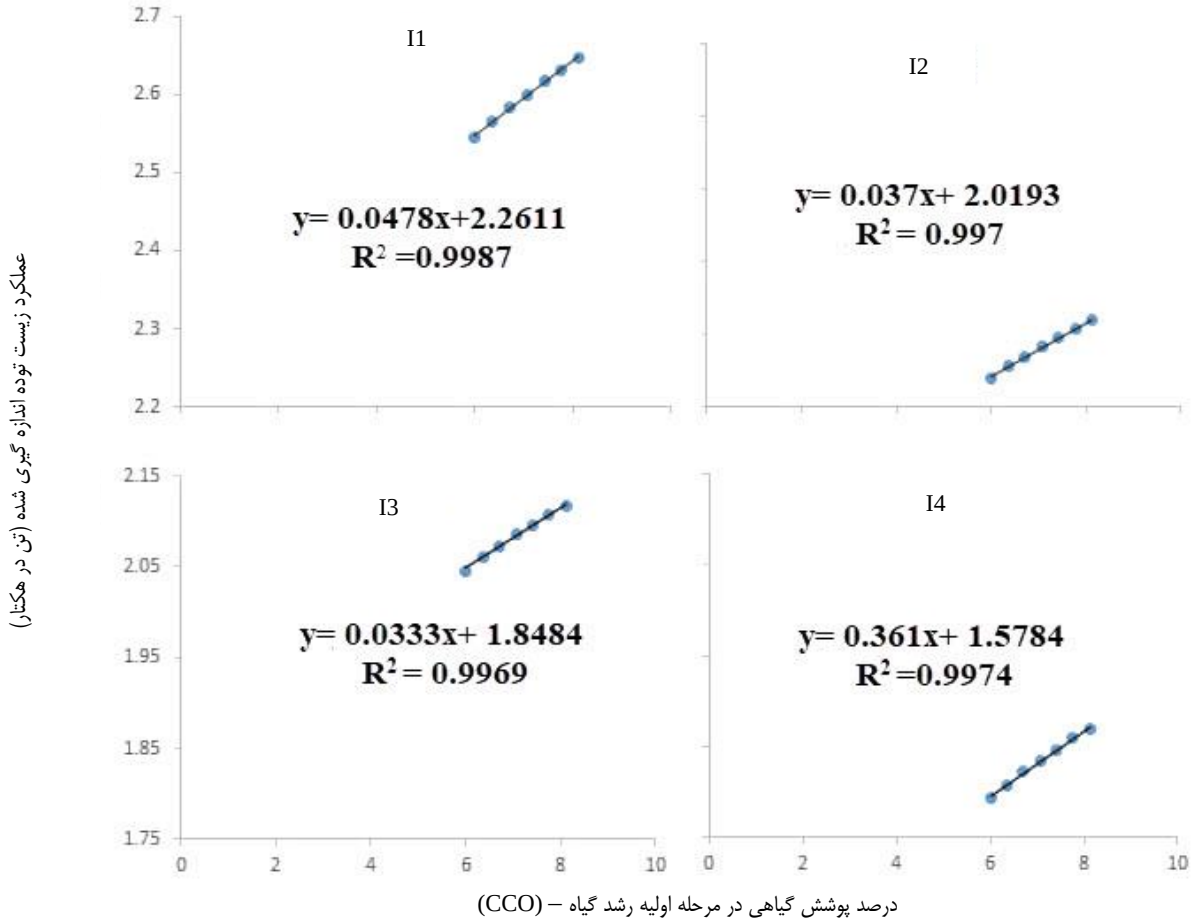
شده است. علامت منفی این اعداد روند معکوس بین عملکرد زیست توده با $ET_0$ را نشان می‌دهد. مقایسه این ارقام نشان دهنده این است که کمترین حساسیت در سناریو آبیاری کامل اتفاق میافتد و بیشترین حساسیت در سناریو کم آبیاری ۶۰ درصد پیش می‌آید و در کل حساسیت مدل آکواکراپ با افزایش کم آبیاری افزایش پیدا می‌کند.

تغییرات عملکرد زیست توده در مقابل تغییر بهره وری آب نرمال شده در سناریوهای آبیاری در شکل (۳) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود این تغییرات از رابطه خطی پیروی می‌کند و با افزایش پیش‌بینی بهره وری آب نرمال شده مقدار زیست توده نیز افزایش می‌یابد. ضریب حساسیت برای سناریوهای آبیاری I1 تا I4 بترتیب برابر ۰/۸۸، ۰/۹۰، ۱/۰ و ۱/۰ می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود کمترین حساسیت در آبیاری کامل و بیشترین حساسیت در کم آبیاری ۷۰ و ۶۰ درصد اتفاق می افتد.




**شکل۳- تغییرات عملکرد زیست توده و بهره وری نرمال شده درسناریوهای مختلف آبیاری**

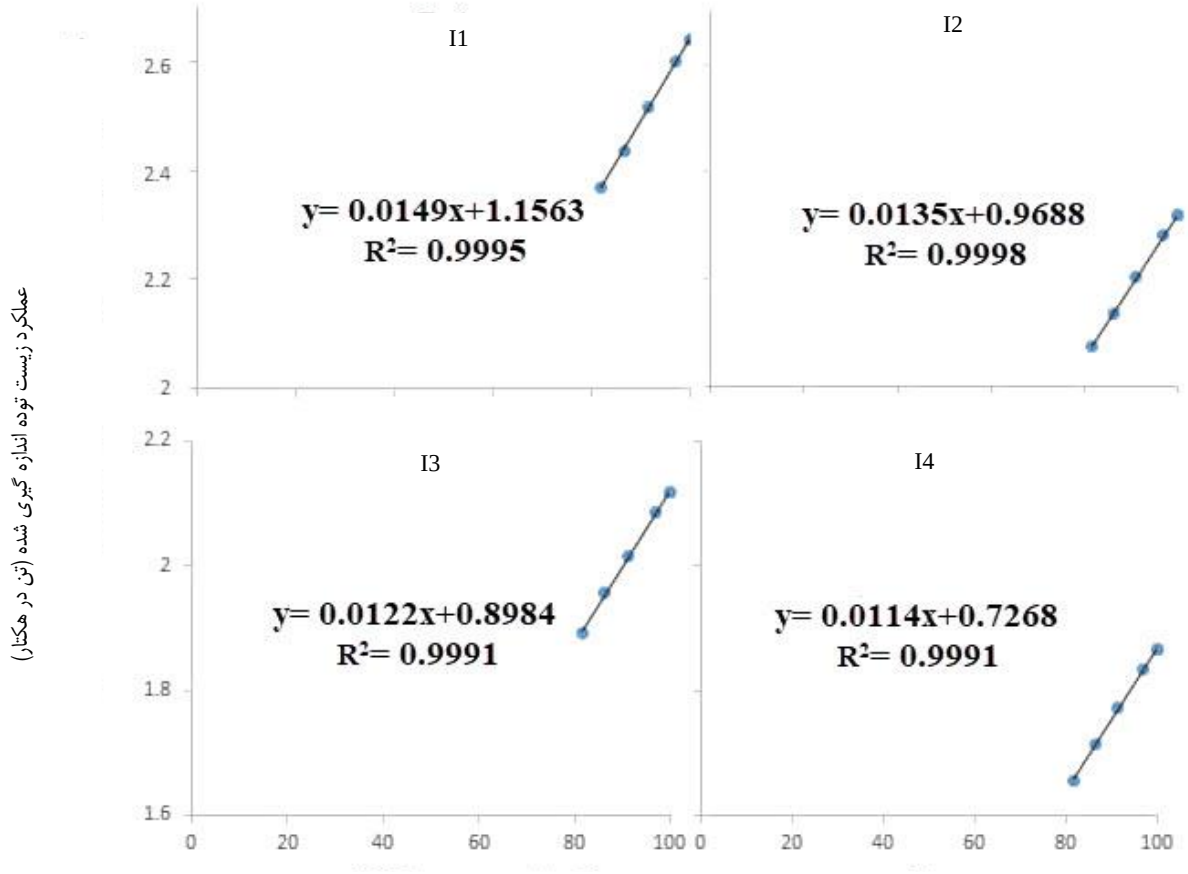
تغییرات عملکرد زیست توده و پوشش گیاهی اولیه درسناریوهای مختلف آبیاری در شکل ۴ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود در هر سناریو این تغییرات خطی است و روند یکسانی دارند با افزایش پوشش گیاهی اولیه، عملکرد زیست توده نیز افزایش پیدا می‌کند. ضریب حساسیت سناریوهای I1 تا I4 بترتیب ۰/۱۳، ۰/۱۱، ۰/۱۱ و ۱/۴ برآورد شده است. این ارقام نشان می‌دهد مدل آکواکراپ حساسیت چندانی در آبیاری کامل و کم آبیاری با شدت های ۸۰ و ۷۰ درصد ندارد ولی در کم آبیاری شدید (۶۰ درصد) حساسیت زیادتری نسبت به بقیه دارد.




**شکل ٤- تغییرات عملکرد زیست توده و پوشش گیاهی در مرحله اول رشد در سناریوهای مختلف آبیاری**

تغییرات عملکرد زیست توده و حداکثر پوشش گیاهی در سناریوهای مختلف آبیاری در شکل (۵) مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌شود روند تغییرات خطی و مثبت است و عملکرد زیست توده با افزایش برآورد حداکثر پوشش گیاهی بیشتر از واقعیت شبیه‌سازی می‌شود. ضرایب حساسیت مدل با پارامتر حداکثر پوشش گیاهی در سناریوهای مختلف آبیاری I1 تا I4 بترتیب ۰/۵۶، ۰/۶۰، ۰/۵۶ و ۰/۵۸ برآورد شده است. لذا با توجه به تغییرات اندک این ضرایب نسبت به یکدیگر، مدل آکواکراپ حساسیتی به پارامتر پوشش گیاهی در سناریوهای مختلف آبیاری ندارد.

ضرایب حساسیت متغیرهای ورودی مدل آکواکراپ در تیمارهای مختلف آبیاری در جدول (۲) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود، مدل آکواکراپ در آبیاری کامل بیشترین حساسیت را به پارامتر بهره وری آب نرمال شده دارد و کمترین حساسیت را به پوشش گیاهی اولیه دارد. ولی مدل در سناریوهای کم آبیاری بیشترین حساسیت را به پارامتر تبخیر و تعرق مرجع نشان می‌دهد. و در مجموع با افزایش کم آبیاری، مدل آکواکراپ با افزایش شدت کم آبیاری دقت شبیه سازی آن کمتر می‌شود.




**شکل ۵- تغییرات عملکرد زیست توده و حداکثر پوشش گیاهی در سناریوهای مختلف آبیاری**

**جدول ۲- ضرایب حساسیت متغیرهای ورودی مدل آکواکراپ در تیمارهای مختلف آبیاری.**

| متغیر ورودی | تیمار آبیاری | | | |
|---|---|---|---|---|
| | آبیاری کامل | ٪۸۰ | ٪۷۰ | ٪٦۰ |
| | I1 | I2 | I3 | I4 |
| تبخیر و تعرق مرجع (ET0) | -0/23 | -1/37 | -1/60 | -10/19 |
| بهره وری نرمال شده(WP) | 0/88 | 0/90 | 1/0 | 1/0 |
| پوشش گیاهی در مرحله اولیه رشد(CC0) | 0/13 | 0/11 | 0/11 | 1/39 |
| حداکثر پوشش گیاه(CCx) | 0/56 | 0/60 | 0.56 | 0/58 |

## نتیجه گیری

در این پژوهش پارامتر بهره‌وری نرمال شده آب برای گیاه تربچه که جزء نباتات C3 می‌باشد برابر ۱۱/۳ گرم بر متر مربع بدست آمد. این پارامتر تاکنون برای این گیاه به دست نیامده بود. همچنین حساسیت مدل آکواکراپ به پارامترهای ورودی تبخیر و تعرق مرجع، بهره‌وری آب نرمال شده، پوشش گیاهی در مرحله اولیه رشد و حداکثر پوشش گیاه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل آکواکراپ بیشترین حساسیت را به پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده برای شرایط آبیاری کامل دارد لذا برآورد صحیح و دقیقی از این پارامتر لازم می‌باشد. در شرایط کم آبیاری بیشترین حساسیت مدل بر روی پارامتر تبخیر و تعرق مرجع است که روند معکوس بر روی عملکرد زیست توده دارد و افزایش برآورد این پارامتر باعث می‌شود عملکرد زیست توده کمتر از واقعیت شبیه‌سازی گردد به ویژه در کم‌آبیاری‌های زیاد عملکرد زیست توده خیلی کمتر از واقعیت تعیین

می‌شود. توصیه می‌شود در تحقیقات آتی، تحلیل حساسیت بر روی سایر نباتات و در اقلیم‌های مختلف انجام شود و با نتایج این پژوهش مقایسه گردد.

## منابع


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.

Alizadeh H. A., Nazari B., Parsinezhad M., RAMAZANI E. H. and Janbaz H. R. (2010). Evaluation of AquaCrop model on wheat deficit irrigation in Karaj area. *Iranin Journal of* Irrigation and Drainage, 4(2), 273-283. [in Persian]

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*.

Beven K. (1979). A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. Journal of Hydrology, *44*(3-4), 169-190.

Haydarinia M., Naseri. A. A. and Broomand-Nasab. S. (2012). Investigate the possibilitiy of application of AquoCrop model for irrigation scheduling of sunflower in Ahwaz. Journal of Water Resources, 5(1), 39-41. [in Persian]

Iqbal M. A., Shen Y., Stricevic R., Pei H., Sun H., Amiri E. and del Rio S. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. Agricultural Water Management, 135, 61-72.

Khalili N., Davary K., Alizadeh A., Kafi M., and Ansari H. (2014). Simulation of Rainfed wheat yield using AquaCrop Model, Case Study: Sisab Rainfed Researches Station, Northern Khorasan area Journal of Water and Soil, 28(5), 930-939. [in Persian]

Karimi Avargani H., Rahimikhib A. and Nazari Fard M.(2015). Calibration and verification of AquaCrop model for barley in Pakdasht area Iranian Water and soil research, 74(3), 579. [in Persian]

Kim D. and Kaluarachchi J. (2015). Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional crop information. Agricultural Water Management, 149, 143-155.

Mohammadi M., Davary K., GHahreman B., Ansari H., and Haghverdi A. (2015). Calibration and validation of the aquacap model for the simulation of spring wheat yield under stress at the same time, salinity and drought. Journal of Water Research in Agriculture, 29(3), 278-295. [in Persian]

Rahimikhoob H., Sotoodehnia A. and Massahbavani A. R. (2014). Calibration and evaluation of AquaCrop for Maize in Qazvin region. Iranian Journal of lrrigation and Drainage, 8(1), 108-115. [in Persian]

Steduto P., Hsiao T. C., Raes D. and Fereres E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal. 101(3), 426-437.

Zhang W., Liu W., Xue Q., Chen J. and Han X. (2013). Evaluation of the AquaCrop model for simulating yield response of winter wheat to water on the southern Loess Plateau of China. Water Science and Technology, 68(4).

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 13, Dec.-Jan. 2019, p. 1527-1537

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۵، جلد ۱۳، آذر - دی ۱۳۹۸، ص. ۱۵۳۷-۱۵۲۷

# Determination of Normalized Water Productivity and Sensitivity Analysis of AquaCrop Model for Radish Product

**M. Hajizade[1], A. Rahimikhoob[2*], S. Aliniaeifard [3], M. Varavipour[4]**

Recived: Dec.08, 2018 Accepted: Feb.19, 2019

## Abstract

AquaCrop model simulates biomass yield under deficit irrigation management. This model developed by FAO and requires less input data than other similar models. One of the input data of this model is the normalized water productivity (wp*) that should be known for each plant. This parameter for the radish plant, which is part of the C3 plant, has not yet been determined. Therefore, the first objective of this study is to determine it for Pakdasht area and its second objective is to analyze the sensitivity of the Aquacrop model to the input data of reference evapotranspiration (ETo), Wp*, initial canopy cover (CCo) and maximum canopy cover(ccx). This research was carried out in the research center of Abourayhan Campus, University of Tehran in Pakdasht District during 2018 crop year. According to the results of this study, normalized water productivity of radish was determined to be 11.3 g / m2. The results of sensitivity analysis showed that the AquaCrop model has the most sensitivity to the normalized water productivity parameter for full irrigation conditions, in which the sensitivity coefficient was estimated to be 0.88. Under deficit condition, the model is most sensitive to the ETo parameter, and the less irrigation is more severe, the sensitivity coefficient increases. The sensitivity coefficient for 60% deficit irrigation was -10.99.

**Keywords:** initial vegetation, Maximum vegetation cover, Reference evapotranspiration, Sensitivity coefficient

1- Master Student, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran,Pakdasht
2- Professor, Irrigation and Drainage Engineering, ]Aburaihan College, University of Tehran
3- Assistant Professor, Department of Horticulture, Aburaihan Campus, University of Tehran, Pakdasht, Iran
4- Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Pakdasht, Iran
(* - Corresponding Author Email: akhob@ut.ac.ir)