



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۰ | دی ۱۴۰۰ (ص ۲۶۳۵-۲۶۲۳)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.319562.668904>

(مقاله علمی- پژوهشی)

Investigation of Sugarcane Water Footprint Index Components in Free Drainage, Controlled Drainage and Water Requirement Conditions (Case study: Salman Farsi Agro-industry)

SEYYED MORTEZA MORADIAN VAFAEI¹, AMIR SOLTANI MOHAMMADI^{1*}, ABDALI NASERI¹, PITER VAN OEEL²

1. Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2. Water Resources Management Group, Wageningen University and Research, the Netherlands.

(Received: March.4, 2021- Revised: July. 15, 2021- Accepted: Sep. 6, 2021)

ABSTRACT

Identifying the amount of water used to produce agricultural products is of great importance, and it can be very effective in recognizing and providing appropriate solutions to reduce water consumption in agriculture. In this study, in order to investigate the water consumption of sugarcane in Khuzestan province for sugarcane production, the water footprint index in two 25-hectare farms (free drainage and controlled drainage) from Salman Farsi agro-industry unit was used. Using the collected and available information, the AquaCrop model was calibrated. Then four irrigation scenarios (100, 110, 85, and 70% of water requirement) were implemented. Based on the results, the water footprint index was recalculated. The results showed that the amount of water required for sugarcane production in the field with free drainage was 258 cubic meters per ton. Of this amount, 12% was green water, 72% blue water, and 16% gray water. Using controlled drainage, this amount was reduced to 222 cubic meters per ton, of which green, blue, and gray water were 16, 69, and 15 percent, respectively. The results of the model showed that in scenarios I1 and I2, the water footprint index in controlled drainage is 18% lower than the free drainage. This value is 18% and 19% for I3 and I4, respectively. Comparison of the results showed that in the controlled drainage condition and supply of 85% of the plant water requirement, the water footprint index decreases by 23% compared to the normal (which is running) condition, which is the best option among the studied scenarios.

Keywords: Water Footprint Index, Drainage, Controlled, Sugarcane, AquaCrop.

*Corresponding Author's Email: a.soltani@scu.ac.ir

بررسی اجزای شاخص ردپای آب گیاه نیشکر در شرایط زهکشی آزاد، کنترل شده و تأمین نیاز آبی (مطالعه موردی: کشت و صنعت سلمان فارسی)

سید مرتضی مرادیان وفائی^۱، امیر سلطانی محمدی^{۱*}، عبدعلی ناصری^۱، پیتر وان اووئل^۲

۱. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.

۲. گروه مدیریت منابع آب، دانشگاه واگنینگن، هلند.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۴ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۴/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۶/۱۵)

چکیده

شناسایی مقدار آب مورد استفاده برای تولید محصولات کشاورزی دارای اهمیت بالایی بوده و ارزیابی آن می تواند در شناخت و ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی بسیار موثر باشد. در این تحقیق به منظور بررسی وضعیت مصرف آب گیاه نیشکر در استان خوزستان به ازاء محصول تولیدی، از شاخص ردپای آب در دو مزرعه ۲۵ هکتاری (زهکشی آزاد و زهکشی کنترل شده) از واحد کشت و صنعت سلمان فارسی استفاده گردید. همچنین با استفاده از اطلاعات برداشت شده و موجود، مدل آکواکراپ واسنجی و چهار سناریوی آبیاری ($I_1=100$ ، $I_2=115$ ، $I_3=85$ و $I_4=70$ درصد نیاز آبی) اجرا و بر اساس نتایج حاصله شاخص ردپای آب مجدداً محاسبه شد. نتایج نشان داد مقدار آب مورد نیاز برای تولید نیشکر در مزرعه با زهکشی آزاد ۲۵۸ متر مکعب بر تن بود که از این مقدار ۱۲٪ را آب سبز، ۷۲٪ آب آبی و ۱۶٪ را آب خاکستری به خود اختصاص دادند. با استفاده از زهکش کنترل شده این مقدار به ۲۲۲ متر مکعب بر تن کاهش یافت که سهم آب سبز، آبی و خاکستری به ترتیب ۱۶، ۶۹ و ۱۵ درصد بودند. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد در سناریوی I_1 و I_2 شاخص ردپای آب در زهکش کنترل شده ۱۸ درصد کمتر از زهکشی آزاد است. این مقدار برای I_3 و I_4 نیز در زهکشی کنترل شده به ترتیب ۱۸ و ۱۹ درصد کمتر از زهکشی آزاد تعیین شد. مقایسه نتایج نشان داد در حالت زهکشی کنترل شده و تأمین ۸۵٪ نیاز آبی گیاه، شاخص ردپای آب نسبت به حالت معمول (که در حال اجرا می باشد) ۲۳ درصد کاهش می یابد که بهترین گزینه در بین سناریوهای بررسی شده می باشد.

واژه های کلیدی: شاخص ردپای آب، زهکشی، کنترل شده، نیشکر، آکواکراپ.

مقدمه

و جدید در بحث مدیریت پایدار منابع آب، نشان دهنده مقدار مصرف آب و آثار آب مصرفی در تولید محصولات و ارائه خدمات بوده که توسط هوکسترا در سال (۲۰۰۲) معرفی گردیده است. مفهوم ردپای آب، آب مصرفی مستقیم و غیرمستقیم یک تولیدکننده یا یک مصرف کننده را نشان می دهد (Hoekstra, 2003). شاخص ردپای آب از سه بخش تشکیل شده است: مصارف ناشی از آب های سطحی و زیرزمینی، آب مصرفی از باران که به صورت رطوبت در پروفیل خاک ذخیره شده و حجم آب شیرین که برای رفع آلودگی آب حاصل از فعالیت مورد نظر (کشاورزی) تا حد استاندارد مجاز، مورد نیاز است که به ترتیب آب آبی، آب سبز، آب خاکستری تعریف می شوند (Hoekstra, 2007). مدل های شبیه سازی به دلیل ارائه تاثیرات کمی آب بر عملکرد محصول، ابزاری ارزشمند برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه و افزایش بهره وری آب هستند. مدل آکواکراپ^۱ از جمله

با توجه به افزایش جمعیت و لزوم تامین غذا و حفظ محیط زیست، اهمیت دادن به بحران آب در سال های اخیر و به خصوص ابتدای قرن ۲۱ بیشتر شده است. کاهش منابع آب های زیرزمینی و سطحی و از بین رفتن محیط زیست و اکوسیستم های آبی از نشانه های بحران آب در سطح ایران و جهان است (Mekonnen & Hoekstra, 2014). نتایج پژوهش ها حاکی از آن است که از سال ۲۰۰۰ میلادی، ایران در فهرست کشورهای دارای کسری آب قرار گرفته و تا سال ۲۰۳۰ منابع آب تجدید پذیر کشور کمتر از ۱۵۰۰ متر مکعب برای هر نفر خواهد بود (Yang et al., 2006). در این میان استفاده از شاخص ها و معیارهای جدید، مسیر حرکت در جهت برنامه ریزی و مدیریت بهینه و پایدار منابع آب را هموارتر می سازد. شاخص ردپای آب به عنوان یک شاخص جامع

تولید هر تن محصول می‌باشد (Reis *et al.*, 2020). در مطالعه‌ای با استفاده از مدل آکواکراپ تاثیر گسترش محصولاتی مانند برنج و ذرت در شمال شرقی چین بر منابع آب کشور چین ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که متناسب با افزایش تولید محصولات، شاخص کمبود ردپای آب نیز افزایش یافته است و با انجام آنالیز حساسیت دریافتند که افزایش شاخص کمبود ردپای آب عمدتاً ناشی از افزایش کمبود آب منطقه‌ای است که با شاخص کمبود ردپای آب و افزایش تولید منعکس شده است (Huai *et al.*, 2020).

در پژوهشی قابلیت مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی محصول نیشکر، تحت سناریوهای آبی و کود متفاوت در کشت و صنعت امیرکبیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که این مدل قادر است به خوبی عملکرد محصول و میزان زیست‌توده را شبیه‌سازی کند (Haghnazari *et al.*, 2020).

دشت خوزستان به علت داشتن انرژی بالای خورشیدی و خاک حاصلخیز از نوع رسوبی دارای استعداد بالقوه و بالایی جهت تولید نیشکر می‌باشد (Najafabadi, 2010). با توجه به سطح زیر کشت گیاه نیشکر در خوزستان و اهمیت زیاد محصول، اعمال مدیریت صحیح آبیاری با هدف صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش عملکرد نیشکر از اهمیت خاصی برخوردار است و دستیابی به روش مدیریتی صحیح می‌تواند تاثیر بسزایی در کاهش مصرف آب توسط این محصول گردد. بنابراین در این پژوهش به تعیین شاخص ردپای آب برای تولید گیاه نیشکر در استان خوزستان در شرایط مزرعه و در کشت و صنعت سلمان فارسی پرداخته شد. همچنین عملکرد نیشکر در سناریوهای مختلف آبیاری توسط مدل آکواکراپ شبیه‌سازی گردید و در نهایت با نتایج به دست آمده از مدل آکواکراپ، شاخص ردپای آب در سناریوهای مختلف آبیاری محاسبه گردید.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، جهت دستیابی به اهداف، گیاه نیشکر در شرایط مزرعه، به مدت یک سال زراعی (از مرداد ماه سال ۱۳۹۷ تا بهمن ماه ۱۳۹۸) کشت و اندازه‌گیری‌های لازم در ابتدا، طول و انتهای دوره کشت در مزرعه و آزمایشگاه انجام گردید.

شرکت کشت و صنعت نیشکر سلمان فارسی با مساحت ۱۲۷۰۰ هکتار، یکی از واحدهای هفت گانه شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی خوزستان است که در کیلومتر ۴۰ جاده اهواز-آبادان واقع شده (شکل ۱) و بهره برداری از آن در سال ۱۳۸۳ شروع شده است. اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز جهت این پژوهش در دو مزرعه و هر کدام به مساحت ۲۵ هکتار (۱۰۰۰ متر

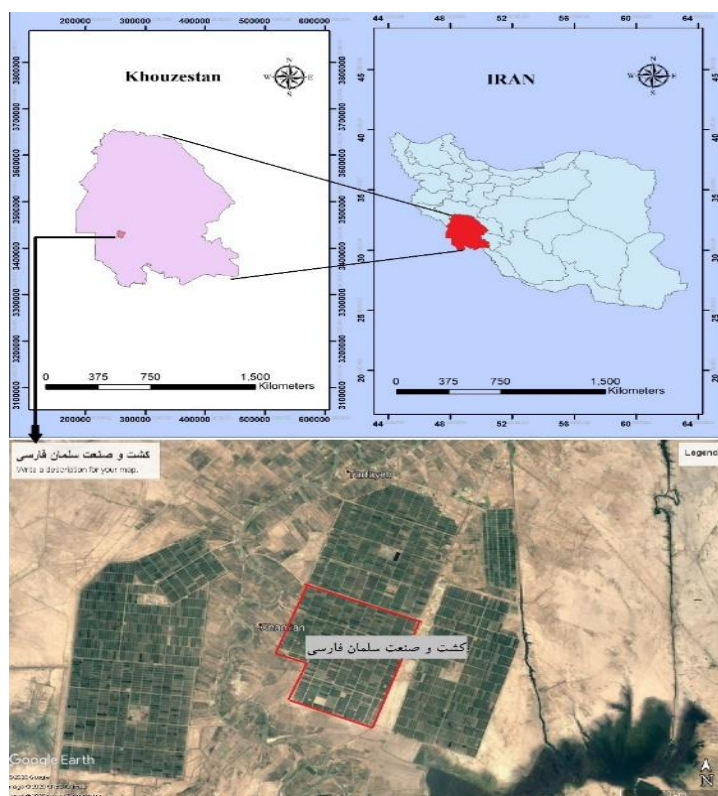
این مدل‌هاست که توسط کارشناسان سازمان فائو توسعه داده شده است و اساس آن عکس‌العمل محصول نسبت به آب مصرفی می‌باشد، از جمله قابلیت‌های آن، بررسی روند تولید در سناریوی مختلف آبیاری است (Tavakoli *et al.*, 2014).

استفاده از مدل آکواکراپ و شاخص ردپای آب در سال‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای توسط متخصصان برای ارزیابی عملکرد بسیاری از محصولات از جمله پنبه، گندم، ذرت، سیب‌زمینی، برنج و نیشکر در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات گلایی و ناصری (Golabi and Naseri, 2015)، هراث و همکاران (Herath *et al.*, 2014) و وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2015) اشاره کرد. در جنوب برزیل شاخص ردپای آب برای گیاه نیشکر در دو حالت آبیاری قطره‌ای با استفاده از سبب و آب شیرین مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که استفاده از آبیاری زیرسطحی قطره‌ای بخش مربوط به آب خاکستری را در شاخص ردپای آب بین ۲/۴ تا ۲/۷ متر مکعب کاهش می‌دهد (Barbosa *et al.*, 2017). در پژوهشی در دانشگاه توونت محققین به کاهش شاخص ردپای آب پرداختند و پس از اجرای چند تیمار نتایج نشان داد حداکثر کاهش شاخص ردپای آب تحت روش آبیاری قطره‌ای زیر سطحی (بین ۱۵ تا ۱۶ متر مکعب بر تن) حاصل می‌گردد (Chukalla *et al.*, 2017). در پژوهشی کاهش شاخص ردپای آب گیاه نیشکر با استفاده از زهکش کنترل شده در خوزستان مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی این پژوهش تعیین مقادیر مختلف این شاخص بر تولید نیشکر در شرایط آزاد و کنترل شده بود. اجزای مختلف این شاخص با اندازه‌گیری‌های مزرعه ارزیابی شد. نتایج نشان داد که استفاده از زهکش کنترل شده علاوه بر کاهش مصرف ۴۷ متر مکعب به ازای تولید هر تن محصول، (۲۵۰ متر مکعب بر تن در زهکشی آزاد و ۲۰۳ متر مکعب بر تن در زهکشی کنترل شده)، با افزایش تولید محصول (۹ تن در هکتار) به دلیل بهبود شرایط خاک، کاهش جریان ورودی و خروجی مزرعه و همچنین کاهش تلفات نیتروژن به سبب زهکشی کنترل شده همراه بوده است (Jahani *et al.*, 2017).

محققین در پژوهشی با استفاده از شاخص ردپای آب در جنوب آفریقا به بررسی کاهش مصرف آب نیشکر پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مصرف آب به مقدار ۸ تا ۱۰ متر مکعب در تن در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی کمتر از روش آبیاری بارانی خواهد شد. همچنین اثر نوع مالچ (ضخیم یا سبک) می‌تواند ۵ درصد بر روی نتایج تاثیر گذار باشد (Adetoro *et al.*, 2020). در پژوهشی با ارزیابی اجزای شاخص ردپای آب طی یک دوره ۱۵ ساله در برزیل اعلام گردید میزان این شاخص برای نیشکر ۱۶۶ متر مکعب به ازای

در مزارع مورد پژوهش ضریب هدایت آبی اشباع (K) 1 m.day^{-1} ، ضریب زهکشی (q) 6 mm.day^{-1} و عمق لایه غیر قابل نفوذ (D) ۴m می‌باشد. بافت خاک عموماً از جنس لومی رسی شنی و رسی شنی می‌باشد که مشخصات آن در جدول (۱) آمده است.

طول، ۲۵۰ متر عرض - مجموعاً ۵۰ هکتار) انجام گردیده است. در یکی از مزارع تخلیه زهکش‌های زیرزمینی به صورت آزاد (L7-5) بوده (عمق ۱,۸۰ متر از سطح زمین) و در مزرعه دیگر (L7-6) زهکش‌ها به صورت کنترل شده و با عمق ۱,۰۰ متر از سطح زمین تخلیه صورت پذیرفته است.



شکل ۱- موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- اطلاعات خاک مزارع مورد مطالعه

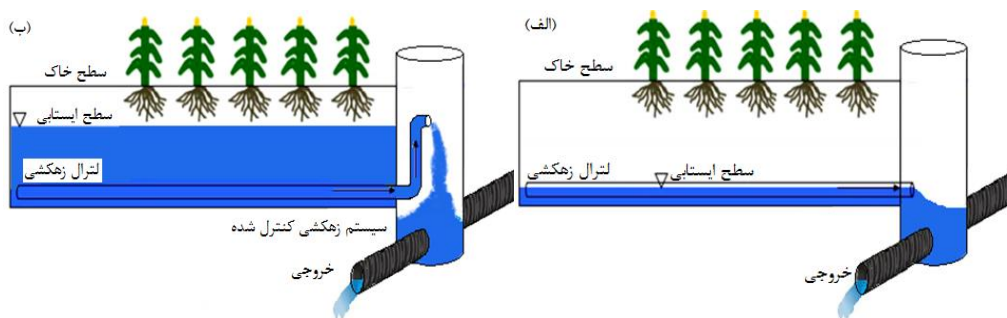
نام مزرعه	بافت خاک	عمق لایه (cm)	شن	سیلت	رس	جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	مواد آلی (%)	ECe (dS/m)	pH
L7-5	S.C.L	۰-۴۰	۵۹/۷	۱۷/۶	۲۲/۱	۱/۴۱	۰/۳۳	۴/۱	۷/۶
L7-5	S.C.L	۴۰-۸۰	۵۱/۵	۲۰/۳	۲۸/۳	۱/۴۵	۰/۳۲	۴/۰	۷/۶
L7-5	S.L	۸۰-۱۲۰	۵۵/۳	۲۸/۱	۱۸/۹	۱/۴۶	۰/۲۹	۴/۲	۷/۶
L7-6	C.L	۰-۴۰	۴۱/۴	۲۷	۳۲/۵	۱/۵۵	۰/۲۵	۳/۴	۷/۸
L7-6	S.C.L	۴۰-۸۰	۵۶/۷	۱۹/۶	۲۹/۲	۱/۴۹	۰/۲۷	۳/۸	۷/۸
L7-6	C.L	۸۰-۱۲۰	۴۲/۳	۲۹/۹	۳۴/۷	۱/۵۳	۰/۲۲	۳/۹	۷/۷

می‌گیرد. در این سیستم آبیاری سطحی آب به مخزنی که ۵ متر ارتفاع دارد (برای تأمین هد آب) و سپس توسط لوله‌هایی که زیر زمین تعبیه شده‌اند به تانک آب بتنی کوچک منتقل و از آنجا توسط هیدروفلوم و سوپاپ نصب شده روی آن به فاروها (به طول ۲۵۰ و عرض ۱/۸۶ متر) می‌ریزد. برای تأمین آب مزارع این لوله‌ها به موازات طول مزرعه قرار گرفته‌اند. برای تعیین دور آبیاری از اندازه‌گیری رطوبت غلاف برگ استفاده می‌شود. بدین ترتیب که

روش آبیاری

آبیاری مزارع نیشکر با آب رودخانه کارون با متوسط هدایت الکتریکی آن ۲/۶ دسی‌زیمنس بر متر انجام شد. لازم به ذکر است هدایت الکتریکی مناسب آب آبیاری برای تولید حداکثر محصول برای گیاه نیشکر ۱/۱ دسی‌زیمنس بر متر است. (Doorenbos and Kassam, 1979). آب از رودخانه با کانال بتنی روباز منتقل می‌شود و سپس با استفاده از سیستم کم‌فشار مورد استفاده قرار

به فواصل ۶۰ متر می‌باشد که به کلکتورهای مجاور مزرعه تخلیه می‌گردند. برای اندازه‌گیری و کنترل لتراترها در محل تخلیه به کلکتور منهول‌هایی تعبیه گردیده و سازه مربوط به کنترل سطح آب در زهکش کنترل شده در آن قرار داده شده است. سیستم کار این سازه به این صورت است که به وسیله یک زانوی ۹۰ درجه لتراتر مزرعه به سمت بالا هدایت شده و سپس توسط یک رایزر تا ارتفاع مد نظر (۱/۰۰ متر از سطح زمین) برای کنترل سطح آب بالا آورده شده است و در نهایت توسط یک زانوی ۹۰ درجه جریان آب به صورت افقی تغییر یافته و بدین ترتیب ریزش زه‌آب در ارتفاع مدنظر صورت گرفته و زهکشی کنترل شده صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است تمامی اتصالات آب‌بند گردیده است. در شکل (۲) نمای شماتیک زهکشی کنترل شده و آزاد نشان داده شده است.



شکل ۲- زهکشی آزاد (الف) و زهکشی کنترل شده (ب)

لایسیمتر موجود است). در این مرکز برای بررسی نیاز آبی گیاه، از لایسیمترهای حجمی زهکش‌دار استفاده می‌شود. این لایسیمترها حدود ۱۲۰ متر مربع مساحت داشته و خود از ۱۰ عدد لایسیمتر کوچک با ابعاد ۶*۲ (مساحت ۱۲ متر مربع) و عمق حدود ۲ متر تشکیل شده‌اند و طراحی آن‌ها به نحوی است که شرایطی کاملاً مشابه شرایط مزرعه را دارا بوده و بادقت بالایی تبخیر و تعرق گیاه نیشکر اندازه‌گیری می‌شود. پس از به‌دست آوردن تبخیر و تعرق گیاه نیشکر، اجزای سبز و آبی شاخص ردپای آب با استفاده از روابط زیر محاسبه شد (Hoekstra et al., 2011):

(رابطه ۱)

$$ET_{green} = \text{Min}(ET_C \cdot P_{eff}) \quad (mm)$$

(رابطه ۲)

$$ET_{blue} = ET_C - P_{eff} \quad \text{if } ET_C > P_{eff} \quad (mm)$$

$$ET_{blue} = 0 \quad \text{if } ET_C < P_{eff} \quad (mm)$$

در این روابط ET_{blue} و ET_{green} تبخیر تعرق روزانه سبز و

آبی بر حسب میلی‌متر در روز (mm/day) است. پارامتر P_{eff} بارش روزانه موثر است که از طریق معادله زیر محاسبه گردید.

از هر ۴ مزرعه یک مزرعه به عنوان نمونه انتخاب گردیده و در این مزارع منتخب نیز ۵ ایستگاه (کراپ لاگ) مشخص شده است. در طول فصل رشد هر هفته یک یا دو نوبت نمونه‌گیری جهت اندازه‌گیری میزان رطوبت غلاف برگ انجام می‌شود و با بررسی میزان رطوبت در هر زمان، میزان کمبود رطوبت مشخص گردیده و سپس از طریق آبیاری کمبود رطوبت جبران می‌گردد. به‌طور کلی نیشکر در طول دوره کاشت ۲۲ نوبت آبیاری می‌گردد.

سیستم زهکشی

این مطالعه بر روی دو مزرعه انجام شده است که یکی از مزارع (L7-5) دارای سیستم زهکشی آزاد (و مرسوم در واحد کشت و صنعت) با عمق ۱/۸۰ و مزرعه دیگر (L7-6) دارای سیستم زهکشی کنترل شده می‌باشد که سطح ایستایی را در عمق ۹۰ سانتی‌متری از سطح خاک نگه می‌دارد. هر مزرعه دارای ۴ لتراتر

روش تعیین شاخص ردپای آب

چندین روش ارزیابی و تعیین ردپای آب توسط بسیاری از کارشناسان توسعه یافته است که در این میان روش ارائه شده توسط هوکسترا و همکاران در سال ۲۰۱۱ معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش آب مصرف شده به سه جزء تقسیم می‌شود که پس از تعیین هر جزء و با جمع کردن این مقادیر میزان آب مورد نیاز برای یک محصول به‌دست می‌آید. در این روش میزان کل آب مورد استفاده جهت تولید محصول به سه قسمت، شامل آب آبی، آب سبز و آب خاکستری تقسیم می‌گردد. برای به‌دست آوردن میزان آب آبی و سبز، ابتدا باید تبخیر و تعرق محصول محاسبه شود. برای به‌دست آوردن مقادیر تبخیر و تعرق محصول نیشکر در منطقه، می‌توان از روش‌های مختلف از جمله پنمن مانیتث، پنمن مانیتث فائو، لایسیمتر و ... استفاده نمود. با توجه به اینکه روش لایسیمتر از دقت بالاتری برای محدوده مورد مطالعه برخوردار است، در این پژوهش از اطلاعات لایسیمتر استفاده شد (لازم به ذکر است واحد کشت و صنعت سلمان فارسی در مجاورت مرکز تحقیقات نیشکر قرار دارد و در این مرکز

(رابطه ۳)

$$P_{eff} = (P \times 125 - (0.6 \times P)) / 125$$

for $P \leq 250/3(mm)$

$$P_{eff} = (125/3) + 0.1 \times P$$

for $P > 250/3(mm)$

در این رابطه P بارندگی کل و P_{eff} بارندگی موثر روزانه بر حسب میلی‌متر در روز است.

پس از تعیین موارد فوق، اجزای شاخص ردپای آب طی دوره رشد کامل گیاه و با استفاده از روابط زیر محاسبه شد (Hoekstra et al., 2011).

$$CWU_{green} = 10 \times \sum_{i=1}^{365} ET_{green_i}$$

(رابطه ۴)

$$CWU_{blue} = 10 \times \sum_{i=1}^{365} (I_{eff})_i$$

در این روابط CWU میزان تجمع آب آبی و سبز مصرف شده برای دوره رشد گیاه را بر حسب متر مکعب بر هکتار (m^3/ha) نشان می‌دهد. عدد ۱۰ نیز عمق آب را بر حسب میلی‌متر در واحد سطح زمین تبدیل می‌کند.

ET_{green} از تفریق بارش موثر در طول دوره رشد از میانگین مقدار متوسط تبخیر محصول در هر روز تعیین می‌گردد. I_{eff} اشاره دارد به میزان رطوبتی که برای جایگزینی رطوبت خاک در ناحیه ریشه نیشکر (۶۰ سانتیمتر از سطح خاک) در طی دوره رشد تحت عنوان آبیاری مصرف می‌شود.

زمانی که CWU_{green} و CWU_{blue} (مجموع آبیاری و بارندگی موثر دوره رشد محصول) به دست آمد، به ازای تولید محصول سالانه برای بخش سبز و آبی شاخص ردپای آب از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Crop\ yield}$$

(رابطه ۵)

$$WF_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Crop\ yield}$$

(رابطه ۶)

که عبارتند از میزان آب سبز و آبی برای تولید نیشکر به ازای تولید محصول و واحد آن (m^3/ton) است.

سپس به منظور بررسی بار آلودگی، با توجه به کاربرد کود نیتروژن به عنوان متداولترین کود مورد استفاده، مولفه سوم ردپای آب نیشکر یعنی آب خاکستری برآورد شد. آب خاکستری عبارت است از حجم آب مورد نیاز برای رقیق‌سازی کودهای کشاورزی هدر رفته ناشی از تولید محصول. این مفهوم توسط هوکسترا و همکاران در سال ۲۰۱۱ ارائه شد (Ramezani Etedali, 2017).

میزان آن از طریق معادله زیر به دست می‌آید:

$$WF_{grey} = \frac{\alpha \times AR / (C_{Max} - C_{Nat})}{Crop\ yield}$$

(رابطه ۷)

α عبارت است از درصد تلفات کودهای نیتروژنی، AR

مقدار مصرف کود نیتروژن (kg/ha) می‌باشد. C_{Nat} نیز غلظت طبیعی نیتروژن که برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین حداکثر غلظت قابل قبول نیتروژن در آب‌های سطحی است که بر اساس استاندارد آژانس حفاظت محیط زیست "EPA" (Richardson, 2003) و استاندارد سازمان محیط زیست ایران، برابر با ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر بیان شده است.

در نهایت کل آب مورد نیاز برای محصول با توجه به رابطه زیر محاسبه شد:

$$WF_{total} = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey} \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در انتها این میزان برای مزارع تحت کشت با روش آبیاری جویچه‌ای به دست خواهد آمد. اجزای این رابطه در قسمت‌های بالا شرح داده شده است.

تشریح مدل آکواکراپ

این مدل مقدار عملکرد محصول را بر اساس رابطه (۹) شبیه‌سازی می‌کند.

$$B = WP_{adj}^* \sum_{i=1}^n \left(\frac{Tr}{ET_0} \right) \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در این رابطه B توده گیاهی به عنوان عملکرد گیاه بر حسب (ton/ha)، WP_{adj} بهره‌وری مصرف آب که توسط تبخیر تعرق مرجع و غلظت دی اکسید کربن اصلاح و نرمال شده است و بر حسب (kg/m^3)، Tr تعرق گیاه بر حسب (mm/day) و ET_0 تبخیر تعرق گیاه مرجع بر حسب (mm/day) می‌باشد. این مدل با استفاده از متغیرهای اقلیمی، گیاه، خاک و مدیریتی، عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌نماید و باید برای هر محصول و در هر منطقه خاص واسنجی و ارزیابی گردد. بدین منظور ابتدا با استفاده از داده‌های به دست آمده از مزرعه، مدل واسنجی گردید و پس از اصلاح ضرایب (که در جدول ۵ به آن‌ها اشاره شده است)، از آن جهت پیش‌بینی تولید محصول در شرایط آبیاری متفاوت (سناریوها) استفاده شد.

در این پژوهش از مدل برای پیش‌بینی تولید محصول در سناریوهای مختلف آبیاری (چهار تیمار) استفاده شده است. تیمار اول مربوط به آبیاری کامل (I_1) ۱۰۰٪ است. تیمار دوم (I_2)، ۱۵٪ مازاد بر نیاز آبی گیاه یعنی بیش آبیاری (۱۱۵٪) می‌باشد. تیمار سوم (I_3) و چهارم (I_4) نیز به ترتیب مربوط به تأمین ۸۵٪ و ۷۰٪ آب مورد نیاز گیاه هستند. سپس شاخص ردپای آب برای این حالت‌ها محاسبه و مقایسه گردیدند. چشم پوشی از آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز در شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی از فرضیه‌های حاکم بر مدل آکواکراپ است.

برای سنجش اعتبار و درستی نتایج شبیه‌سازی مدل از

مشاهده شده است. چنانچه تمام مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با هم برابر شود، مقدار عددی R^2 برابر ۱ و $NRMSE$ برابر صفر خواهد شد (Moriasi *et al.*, 2007)

داده‌های ورودی مورد نیاز مدل

ورودی‌های مدل شامل چهار دسته اطلاعات هواشناسی، گیاه، مدیریتی و خاک است. جدول (۲) فهرست داده‌های مورد نیاز هر بخش را نشان می‌دهد.

آماره‌های ضریب تعیین (R^2) و میانگین مربعات خطای نرمال شده $(NRMSE)$ استفاده شد. فرمول‌های این آماره‌ها به صورت زیر است.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$NRMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

در این روابط P_i مقادیر پیش‌بینی شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد نمونه‌ها و \bar{O} مقدار متوسط پارامتر

جدول ۲- داده‌های ورودی مدل AquaCrop

AquaCrop			
ورودی‌های مدل AquaCrop			
داده‌های هواشناسی	داده‌های مربوط به گیاه	داده‌های مدیریتی	داده‌های خاک
حداقل دما	پارامترهای ثابت	مدیریت آبیاری	بافت خاک
حداکثر دما	پارامترهای ویژه کاربر	مدیریت زراعی	تعداد لایه‌های خاک
بارش		هدایت هیدرولیکی اشباع	
تبخیر تعرق روزانه گیاه مرجع		رطوبت حجمی در حد اشباع	
غلظت دی اکسید کربن موجود در جو		ظرفیت زراعی	
		نقطه پژمردگی	

محاسبه شد که نتایج آن به شرح جدول (۳) می‌باشد. با توجه به اطلاعات لایسمتر تبخیر تعرق گیاه نیشکر بدست آمد. بر این مبنا میزان تبخیر تعرق بین (0.6 mm/day) (در زمانی از دوره رشد که رطوبت در بالاترین و دما در پایین حد خود یعنی بهمن ماه) و (1.9 mm/day) (در زمانی که رطوبت در کمترین و دما بیشترین مقدار یعنی تیر ماه را دارد) حاصل گردید. این بدان معناست که در تیر ماه گیاه نیشکر بیشترین آب را نیاز دارد و با توجه به اینکه میانگین بارش در این ماه صفر می‌باشد باید تأمین آب مورد نیاز با آبیاری انجام گردد. همچنین در دی ماه فعالیت گیاه کم بوده و دلیل آن کاهش دمای هوا می‌باشد و با توجه به وجود بارش‌های زمستانه در صورت نیاز برای تکمیل آب مورد نیاز گیاه باید آبیاری صورت پذیرد. بر اساس این محاسبات میانگین تبخیر تعرق گیاه نیشکر (3.6 mm/day) در طی دوره رشد می‌باشد.

مجموع بارش موثر در طی دوره رشد گیاه 340 میلی‌متر بود که بیشترین آن در آذر ماه با میزان 76 و کمترین آن در ماه‌های بدون بارش (تابستان) و در نهایت با میانگین (mm/mon) 17 بدست آمد.

همچنین با محاسبه میزان آب آبی و سبز با استفاده از روابط ذکر شده در دوره رشد نیشکر، نتایج به شرح نمودار (۱) حاصل گردید.

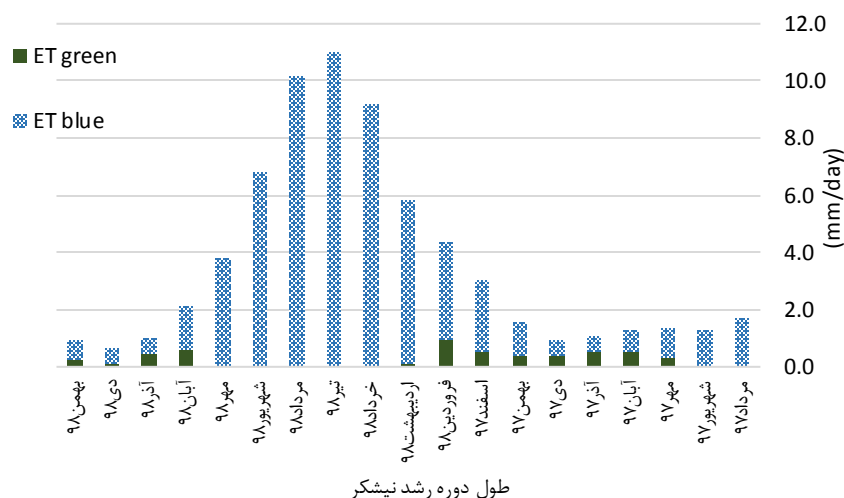
داده‌های هواشناسی مورد نیاز جهت اجرای مدل با استفاده از اطلاعات ثبت شده در ایستگاه هواشناسی واحد کشت و صنعت سلمان فارسی در طی دوره رشد اخذ گردیدند. همچنین میزان دی اکسید کربن موجود در اتمسفر به صورت پیش‌فرض از سال 1902 تا 2099 موجود است (Golabi and Naseri, 2015). داده‌های گیاهی مورد نیاز مدل شامل پارامترهای ثابت و ویژه کاربر است. مقادیر پارامترهای گیاهی ثابت با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کند و برای گیاهان زراعی مهم به صورت پیش‌فرض در مدل وجود دارد. علاوه بر پارامترهای ثابت، برخی اطلاعات مورد نیاز برای اجرای شبیه‌سازی، به گونه و محصول زراعی بستگی دارد یا طبق شرایط مدیریتی و محیطی مختلف، مقادیر متفاوتی را داراست که پارامترهای مخصوص کاربر نامیده می‌شود. از جمله این پارامترها می‌توان تاریخ و تراکم کشت، زمان رسیدن مراحل فنولوژیکی گیاه و حداکثر عمق ریشه را نام برد که برای هر ناحیه و محصول با توجه به شرایط خاص خود متغیر است و کاربر تعیین می‌کند (Golabi and Naseri, 2015).

نتایج

در این پژوهش ابتدا شاخص ردپای آب گیاه نیشکر مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب مقدار ردپای آب گیاه نیشکر در دو جز آب آبی و سبز و بارش موثر و تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از روابط ۱ تا ۸

جدول ۳- نتایج محاسبات تبخیر تعرق روزانه آبی و سبز

ET _{blue} (mm/day)	ET _{green} (mm/day)	P _{eff} (mm/mon)	ET _c (mm/day)	P (mm/mon)	طول دوره (روز)	تاریخ
۳/۲	۰/۰	۰/۰	۳/۲۴	۰	۱۳	۹۷/۰۵/۳۱
۲/۱	۰/۰	۰/۰	۲/۰۹	۰	۳۱	۹۷/۰۶/۳۱
۱/۵	۴/۱	۹/۵	۱/۶۸	۹/۸	۳۰	۹۷/۰۷/۳۰
۰/۸	۷/۹	۳۴/۴	۱/۰۴	۳۵/۶	۳۰	۹۷/۰۸/۳۰
۰/۶	۷/۷	۷۰/۰	۰/۸۲	۷۷/۳	۳۰	۹۷/۰۹/۳۰
۰/۶	۶/۰	۲۷/۴	۰/۷۶	۲۸	۳۰	۹۷/۱۰/۳۰
۱/۲	۵/۷	۲۳/۵	۱/۳۶	۲۴/۴	۳۰	۹۷/۱۱/۳۰
۲/۵	۷/۴	۱۲/۲	۲/۷۵	۱۲/۵	۲۹	۹۷/۱۲/۲۹
۳/۴	۱۴/۳	۱۶/۸	۳/۹۱	۱۷/۱	۳۱	۹۸/۰۱/۳۱
۵/۸	۱/۳	۱/۳	۵/۸۰	۱/۳	۳۱	۹۸/۰۲/۳۱
۹/۲	۰/۰	۰/۰	۹/۱۹	۰/۰	۳۱	۹۸/۰۳/۳۱
۱۱/۰	۰/۰	۰/۰	۱۰/۹۸	۰/۰	۳۱	۹۸/۰۴/۳۱
۱۰/۲	۰/۰	۰/۰	۱۰/۲۰	۰/۰	۳۱	۹۸/۰۵/۳۱
۶/۸	۰/۰	۰/۰	۶/۸۳	۰/۰	۳۱	۹۸/۰۶/۳۱
۳/۸	۰/۰	۰/۰	۳/۸۴	۰/۰	۳۰	۹۸/۰۷/۳۰
۱/۵	۹/۳	۴۶/۶	۱/۸۳	۵۱/۷	۳۰	۹۸/۰۸/۳۰
۰/۵	۷/۱	۷۶/۱	۰/۷۷	۸۶/۹	۳۰	۹۸/۰۹/۳۰
۰/۶	۱/۳	۲/۱	۰/۶۲	۲/۱	۳۰	۹۸/۱۰/۳۰
۰/۷	۲/۱	۱۹/۱	۰/۲۸	۲۰/۶	۲۰	۹۸/۱۱/۲۰



نمودار ۱- میزان آب آبی و سبز جهت محاسبه شاخص رد پای آب نیشکر در طی یک سال زراعی

که تبخیر تعرق محصول در بالاترین حد است، تبخیر تعرق نیشکر بیشتر در قالب تبخیر تعرق آبی تأمین می‌شود که آب مورد نیاز جهت این امر از طریق آبیاری سطحی کم فشار در اختیار گیاه قرار داده می‌شود.

در واحد کشت و صنعت سلمان فارسی به طور متوسط ۳۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود برای مزارع استفاده می‌شود که در جدول (۴) به تقسیم آن اشاره شده است. همچنین میزان ضریب آلفا به صورت تجربی و توسط عوامل کشت و صنعت تعیین گردید.

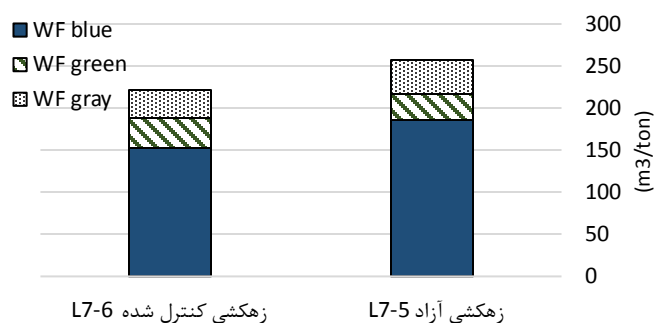
با توجه به نمودار (۱) ملاحظه می‌شود که تبخیر تعرق آبی در دی ماه کمترین مقدار و در تیر ماه بیشترین مقدار خود را که به ترتیب ۰/۶ و ۱۱ (mm/day) است را دارا می‌باشد. میانگین تبخیر تعرق آبی برای دوره رشد گیاه ۳/۳ میلی‌متر در روز است. تبخیر تعرق سبز در ماه‌های گرم و بدون بارش سال (تابستان) صفر بوده و در فروردین ماه ۰/۹ میلی‌متر در روز می‌باشد. همچنین میانگین تبخیر تعرق سبز در طول دوره رشد گیاه ۰/۳ میلی‌متر در روز می‌باشد. این مطالب نشان می‌دهند زمانی

بنابراین اجزای شاخص ردپای آب برای تولید نیشکر در شرایط زهکشی آزاد و کنترل شده به شرح نمودار (۲) می‌باشد.

آب خاکستری برای مزرعه با استفاده از رابطه ۷ و جدول شماره (۴) در مزرعه با زهکشی کنترل شده و آزاد به ترتیب ۳۴ و ۴۱ متر مکعب به ازای هر تن محصول تولیدی به دست آمد.

جدول ۴- میزان و تقسیم کود دهی در مزارع

نام مزرعه	سیستم زهکشی	میزان کود مصرفی (AR) (Kg/ha)	تقسیم کود دهی	α
L7-5	آزاد	۳۰۰	نیمه دوم اردیبهشت ۶۰٪ نیمه اول تیر ۴۰٪	۱۰-۱۵٪
L7-6	کنترل شده	۳۰۰	نیمه دوم اردیبهشت ۶۰٪ نیمه اول تیر ۴۰٪	۱۰-۱۵٪



شاخص ردپای آب (WaterFootprint)

نمودار ۲- محاسبه شاخص ردپای آب برای گیاه نیشکر در حالت زهکشی کنترل شده و زهکشی آزاد با استفاده از اطلاعات میدانی

کنترل شده ۱۴ درصد کمتر بوده که موجب صرفه جویی در مصرف آب خواهد شد. با توجه به اینکه بخش خاکستری شاخص ردپای آب در زهکشی کنترل شده ۳۴ متر مکعب و در زهکشی آزاد ۴۱ متر مکعب به ازای تولید هر تن محصول می‌باشد می‌توان گفت از دیدگاه زیست محیطی استفاده از زهکشی کنترل شده به مراتب (۱۷٪ کمتر) بهتر از زهکشی آزاد است، چرا که بخش خاکستری نشان‌دهنده میزان نیتروژن خروجی سیستم زهکشی می‌باشد. تحقیقات جهانی و همکاران (۲۰۱۷) نیز نتایج مشابهی را برای کاهش شاخص ردپای آب نشان داد. ایشان شاخص ردپای آب برای گیاه نیشکر در حالت زهکشی کنترل شده ۲۰۳ و زهکشی آزاد ۲۴۹ متر مکعب به ازای هر تن تولید محصول ارائه دادند.

به منظور شبیه‌سازی میزان عملکرد محصول نیشکر تحت چهار سناریوی آبیاری ($I_1=100$ ، $I_2=115$ ، $I_3=85$ و $I_4=70$ درصد نیاز آبی) در ابتدا مدل AquaCrop نسبت به پارامترهای گیاهی به کار رفته در مدل واسنجی شد.

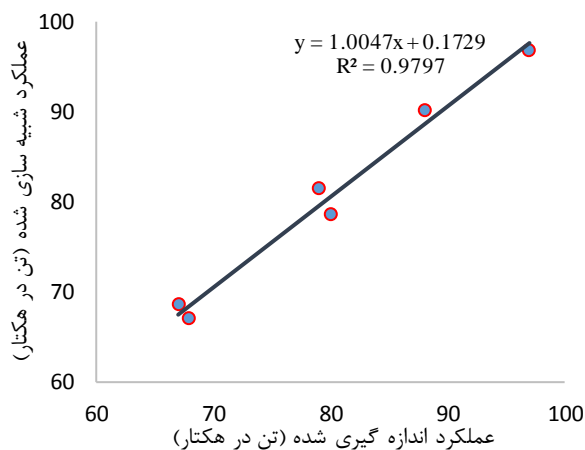
برای شبیه‌سازی عملکرد ابتدا مدل نسبت به پارامترهای گیاهی بکار رفته در مدل AquaCrop واسنجی شد. هدف از واسنجی مدل تنظیم ورودی‌های گیاهی جهت استفاده از آن است. جدول (۵) نتایج واسنجی مدل را نشان می‌دهد. پس از واسنجی مدل، شبیه‌سازی میزان عملکرد محصول

پس از انجام عملیات برداشت، میزان محصول از مزرعه با زهکشی آزاد ۹۷/۹ تن در هکتار و در مزرعه با زهکشی کنترل شده ۹۴/۹ تن در هکتار برداشت شد. اگرچه این اعداد اختلاف چندانی با تحقیقات صورت گرفته در مزارع نیشکر خوزستان ندارد (Jahani et al., 2017). این میزان در مقایسه با کشور برزیل که بزرگ‌ترین تولید کننده نیشکر در جهان است و دارای میانگین تولید ۷۲ تن در هکتار بوده است عدد قابل توجهی است (Scarpore et al., 2016). همچنین میزان تولید نیشکر در کشورهای هند و پاکستان ۶۳ و ۵۶ تن در هکتار می‌باشد (FAO, 2014). عامل اصلی بالا بودن میزان تولید در ایران نسبت به این کشورها، علاوه بر سازگاری گیاه نیشکر با شرایط آب و هوایی استان خوزستان، مدیریت نظام‌مند مزارع نیشکر در این استان است. البته لازم به ذکر است میانگین عملکرد تولید نیشکر در کشور پرو ۱۳۳ تن بر هکتار می‌باشد که این عدد نشان می‌دهد افزایش عملکرد در خوزستان با افزایش دقت و مطالعات و از بین بردن اثرات کاهنده در تولید محصول، قابل دستیابی خواهد بود. با توجه به محصول برداشت شده میزان شاخص ردپای آب برای این دو مزرعه به ترتیب ۲۵۸ و ۲۲۲ متر مکعب به ازای هر تن تولید محصول می‌باشد. طبق نتایج به دست آمده در زهکشی آزاد، میزان محصول ۲/۱۶ درصد بیش از حالت زهکشی کنترل شده است. این در حالی است که شاخص ردپای آب در حالت زهکشی

با مدل انجام گرفت و نتیجه صحت‌سنجی در نمودار (۳) و آماره - (NRMSE) در جدول (۶) قابل ملاحظه است. های ضریب تعیین (R^2) و میانگین مربعات خطای نرمال شده

جدول ۵- پارامترهای گیاهی به کار رفته در مدل AquaCrop برای شبیه سازی عملکرد نیشکر

پارامتر گیاهی	مقدار	واحد	روش تعیین
دمای پایه T_{base}	۱۰	c	واسنجی
دمای بالا T_{upper}	۵۰	c	واسنجی
پوشش کانوپی اولیه در زمان تکمیل ۹۰٪ سبز شدن CC_0	۷/۰	cm ²	واسنجی
ضریب رشد کانوپی CGC	۰/۱۲۵	%/day	پیش فرض
حداکثر کانوپی گیاه CC_x	۹۰	%	واسنجی
ضریب کاهش کانوپی CDC	۰/۰۷۶	%/day	پیش فرض
ضریب تعرق گیاهی برای پوشش کامل $K_{C_{tr}}$	۱/۱	-	پیش فرض
آستانه بالای تخلیه رطوبتی خاک برای گسترش کانوپی P_{upper}	۰/۵۵	-	پیش فرض
آستانه پایین تخلیه رطوبتی خاک برای گسترش کانوپی P_{lower}	۰/۲۵	-	پیش فرض
فاکتور شکل ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی	۳	-	پیش فرض



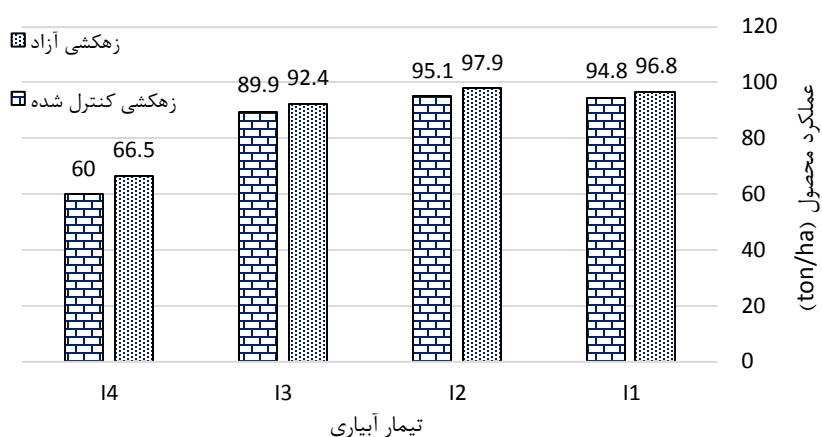
نمودار ۳- شبیه سازی عملکرد نیشکر با مدل AquaCrop تحت سناریوهای آبیاری زهکشی آزاد

جدول ۶- آماره‌های محاسبه شده برای ارزیابی مدل آکواکراپ در شبیه سازی عملکرد نیشکر

مقدار عددی	نوع آماره
۰/۹۸	R^2
۲/۰۳	NRMSE

عملکرد نشان می‌دهد. مقدار NRMSE نیز ۲/۰۳ می‌باشد که طی تقسیم بندی این نمایه، اعداد کوچکتر از ۱۰ نشان دهنده عملکرد مناسب مدل است.

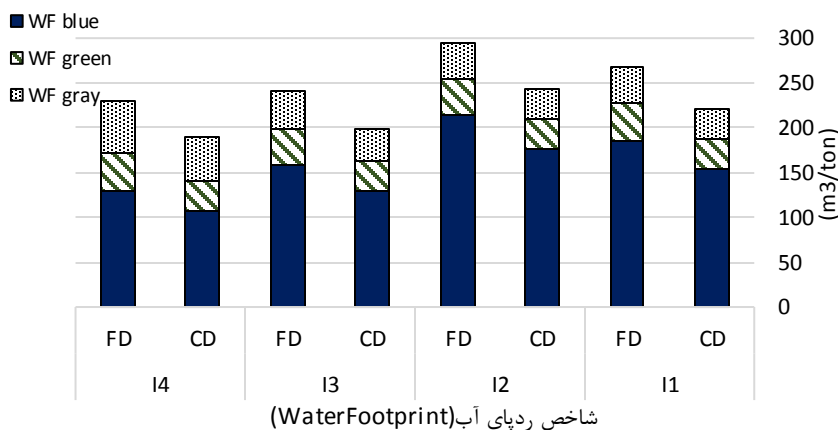
مطابق نمودار (۳) و جدول (۶) آماره R^2 که نسبت پراکندگی را بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری نشان می‌دهد، ۰/۹۸ به دست آمد که توانایی مناسب مدل را در شبیه سازی



نمودار ۴- شبیه‌سازی عملکرد نیشکر با مدل AquaCrop تحت سناریوهای آبیاری

زهکشی آزاد و کنترل شده قابل ملاحظه است. در تیمار I3 کاهش محصول به میزان ۴/۵ و ۵/۱٪ و در نهایت برای تیمار I4 کاهش محصول ۳۱/۳ و ۳۶/۷٪ (نسبت به آبیاری کامل) برای زهکشی آزاد و کنترل شده به دست آمده است. حال پس از محاسبه اجزای شاخص ردپای آب برای تیمارهای چهارگانه در دو حالت زهکشی آزاد (FD) و کنترل شده (CD) نتایج به شرح نمودار زیر است.

در نمودار (۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد محصول توسط مدل آکواکراپ در سال زراعی ۱۳۹۷ تحت سناریوهای آبیاری ذکر شده نشان داده شده است. این مدل عملکرد تیمار آبی I1 را در زهکش آزاد و کنترل شده با اختلاف ۰/۲٪ و ۰/۱٪ با مقدار برداشت شده از مزرعه پیش‌بینی کرده است که نشان دهنده دقت خوب مدل است. در تیمار I2 افزایش عملکرد به ترتیب به میزان ۱/۱ و ۰/۳٪ نسبت به حالت آبیاری کامل برای



نمودار ۵- شاخص ردپای آب برای گیاه نیشکر تحت سناریوهای آبیاری

بود، دارای اختلاف شاخص ردپای آب به میزان ۳,۸ و ۰,۵ درصد می‌باشند. این اختلاف (شاخص) در سناریو I2 (بیش آبیاری) برای زهکشی آزاد و کنترل شده نسبت به آبیاری معمول (۱۰۰٪) موجب افزایش ۱۰ درصدی شاخص در هر دو حالت زهکشی گردیده است. در سناریو I3 (کم آبیاری ۸۵٪) میزان شاخص برای زهکشی کنترل شده و آزاد ۱۰ درصد کمتر از آبیاری کامل می‌باشد. در سناریو I4 کاهش شاخص در زهکشی آزاد و کنترل شده به ترتیب ۱۴ و ۱۵ درصد نسبت به آبیاری کامل است.

همان‌گونه که در نمودار (۵) ملاحظه می‌گردد شاخص ردپای آب برای گیاه نیشکر در تمامی سناریوهای آبیاری در زهکشی کنترل شده کمتر از زهکشی آزاد است. در سناریو I1 و I2 شاخص ردپای آب در مزارع با زهکشی کنترل شده ۱۸ درصد کمتر از زهکشی آزاد است. این مقدار برای I3 و I4 به ترتیب ۱۸ و ۱۹ درصد می‌باشد. در همه سناریوها زهکشی کنترل شده موجب کاهش شاخص ردپای آب می‌گردد. همچنین شاخص ردپای آب برای تیمار I1 که عملکرد محصول مدل در زهکشی آزاد و کنترل شده به ترتیب با اختلاف ۰/۱ و ۱/۱ پیش‌بینی شده

بحث

استفاده گردد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه از شاخص ردپای آب در دو مزرعه جهت بررسی وضعیت مصرف آب گیاه نیشکر در استان خوزستان به ازای محصول تولیدی، استفاده گردید. همچنین مدل آکوکراپ تحت اطلاعات موجود مورد واسنجی قرار گرفت و پس از آن براساس چهار سناریو آبیاری اجرا گردید و براساس نتایج آن مجدد شاخص ردپای آب محاسبه شد. طبق نتایج، میزان شاخص ردپای آب برای دو مزرعه به ترتیب ۲۵۸ و ۲۲۲ متر مکعب به ازای هر تن تولید محصول برآورد گردید. همچنین نتیجه اعتبارسنجی مدل که با استفاده از ضریب R^2 انجام گرفت گویای شبیه‌سازی با دقت بالای مدل در تخمین عملکرد محصول بود. همچنین با بررسی سناریوهای آبیاری اجراشده توسط مدل آکوکراپ ملاحظه می‌گردد کشت نیشکر در شرایط استان خوزستان در حالت زهکشی کنترل شده و آزاد در حالت تیمار کم آبی بیش از ۳۰ درصد محصول کاهش می‌یابد. شاخص ردپای آب برای گیاه نیشکر در تمامی سناریوهای آبیاری در زهکشی کنترل شده کمتر از زهکشی آزاد است.

سپاس‌گزاری

بدین وسیله نویسندگان این مقاله از جناب مهندس نصیریان مدیر عامل کشت و صنعت سلمان فارسی و جناب مهندس پیرپور مدیر واحد آمار و برنامه ریزی کشت و صنعت سلمان فارسی که در مهیا شدن بستر همکاری جهت انجام این پژوهش همکاری نمودند تقدیر و تشکر بعمل می‌آید. همچنین از سازمان آب و برق خوزستان بابت حمایت مالی تشکر می‌گردد.

"هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

بر اساس نتایج حاصله، زهکشی کنترل شده (۹۴/۹ تن در هکتار) در مقابل زهکشی آزاد (۹۷/۹ تن در هکتار) موجب کاهش عملکرد گیاه در واحد سطح می‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهد بخش سبز شاخص ردپای آب گیاه نیشکر در حالت زهکشی کنترل شده ۳۵ متر مکعب در تن بوده که نسبت به زهکشی آزاد یعنی ۳۱ متر مکعب در تن ۱۳ درصد بیشتر می‌باشد. علاوه بر این بخش آبی شاخص ردپای آب نیشکر در زهکشی کنترل شده به دلیل کم شدن آب مورد نیاز در هر آبیاری نسبت به زهکشی آزاد به میزان ۱۸ درصد کمتر خواهد بود که تقریباً ۳۳ متر مکعب در تن مصرف آب را کاهش می‌دهد. این میزان به تنهایی ۱/۱۴ برابر میانگین شاخص ردپای آب برای تولید محصول نیشکر در پاکستان (۲۹ متر مکعب در تن) است (Scarpore *et al.*, 2016; van Steenberg *et al.*, 2015). همچنین بخش خاکستری شاخص ردپای آب در زهکشی کنترل شده ۱۷ درصد کمتر می‌باشد که تقریباً ۷ متر مکعب به ازای تولید هر تن نیشکر موجب صرفه جویی می‌گردد. میانگین جهانی این بخش از شاخص ردپای آب ۱۳ متر مکعب به ازای هر تن محصول می‌باشد (Mekonnen and Hoekstra, 2014) که متأسفانه علیرغم کاهش این مقدار در زهکشی کنترل شده در این بخش کماکان فاصله زیادی با میانگین جهانی وجود دارد که باید جهت کاهش این آیتم تمهیداتی در نظر گرفته شود. همچنین با بررسی سناریوهای آبیاری اجراشده با مدل آکوکراپ ملاحظه می‌گردد کشت نیشکر در شرایط استان خوزستان در حالت زهکشی کنترل شده و تأمین ۸۵٪ نیاز آبی گیاه موجب کاهش ۲۳ درصدی شاخص ردپای آب نسبت به حالت معمول که در حال اجرا می‌باشد می‌گردد. در نهایت با توجه به اینکه شاخص ردپای آب در زهکشی کنترل شده ۱۴٪ کمتر از زهکشی آزاد می‌باشد پیشنهاد می‌گردد در مزارع نیشکر استان خوزستان از روش زهکشی کنترل شده

REFERENCES

- Adetoro, A.A., Abraham, S., Paraskevopoulos, A.L., Owusu-Sekyere, E., Jordaan, H. and Orimoloye, I.R. 2020. Alleviating water shortages by decreasing water footprint in sugarcane production: The impacts of different soil mulching and irrigation systems in South Africa. *Groundwater for Sustainable Development* 11, 100464.
- Barbosa, E.A.A., Matsura, E.E., dos Santos, L.N.S., Gonçalves, I.Z., Nazário, A.A. and Feitosa, D.R.C. 2017. Water footprint of sugarcane irrigated with treated sewage and freshwater under subsurface drip irrigation, in Southeast Brazil. *Journal of Cleaner Production* 153, 448-456.
- Chukalla, A.D., Krol, M.S. and Hoekstra, A.Y. 2017. Marginal cost curves for water footprint reduction in irrigated agriculture: guiding a cost-effective reduction of crop water consumption to a permit or benchmark level. *Hydrology and earth system sciences* 21(7), 3507.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. 1979. Yield response to water. *Irrigation and drainage paper* (33), 257.
- FAO., F.a.A.O.o.t.U.N. 2014, www.fao.org, Rome, Italy.
- Golabi, M. and Naseri, A.A. 2015. Assessment Aquacrop Model to Predict the Sugarcane Yield and Soil Salinity Profiles under Salinity Stress. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 46(4),

- 685-694. (In Farsi)
- Haghnazari, F., Ghanbarian, M., Sheini Dashtegol, A. and Varnaseri, V. 2020. Evaluation of Sugarcane Yield Affected as Irrigation Level and Fertilizer by using Aquacrop Model. *Crop Science Research in Arid Regions* 2(1), 87-96. (In Farsi)
- Herath, I., Green, S., Horne, D., Singh, R. and Clothier, B. 2014. Quantifying and reducing the water footprint of rain-fed potato production, part I: measuring the net use of blue and green water. *Journal of cleaner production* 81, 111-119.
- Hoekstra 2007. Human appropriation of natural capital: comparing ecological footprint and water footprint analysis.
- Hoekstra, A.Y. 2003. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade, pp. 25-47.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Mekonnen, M.M. and Aldaya, M.M. (2011) The water footprint assessment manual: Setting the global standard, Routledge.
- Huai, H., Chen, X., Huang, J. and Chen, F. 2020. Water-Scarcity Footprint Associated with Crop Expansion in Northeast China: A Case Study Based on AquaCrop Modeling. *Water* 12(1), 125.
- Jahani, B., Soltani Mohammadi, A., Nasser, A.A., Van Oel, P.R. and Sadeghi Lari, A. 2017. Reduction of Sugarcane Water Footprint by Controlled Drainage, in Khuzestan, Iran. *Irrigation and Drainage* 66(5), 884-895.
- Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. 2014. Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological indicators* 46, 214-223.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3), 885-900.
- Najafabadi, R.A., Mohammad amin. 2010. Investigation of the effect of organic matter by vertical mulching method on physical and chemical properties of soil and improvement of sugarcane yield, Islamic Azad University, Dezful Branch, Iran, Dezful. (In Farsi)
- Ramezani Etedali, H.A., Behnam 2017. Estimation of virtual water footprint components in barley production on national and provincial scale. *Water research in agriculture (soil and water sciences)* 30, 431-444. (In Farsi)
- Reis, A., Santos, A.C.d., Anache, J.A.A., Mendiondo, E.M. and Wendland, E.C. 2020. Water footprint analysis of temporary crops produced in São Carlos (SP), Brazil. *RBRH* 25.
- Richardson, S.D. 2003. Disinfection by-products and other emerging contaminants in drinking water. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 22(10), 666-684.
- Scarpore, F.V., Hernandez, T.A.D., Ruiz-Corrêa, S.T., Kolln, O.T., de Castro Gava, G.J., dos Santos, L.N.S. and Victoria, R.L. 2016. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. *Journal of cleaner production* 112, 4576-4584.
- Tavakoli, A., Liaghat, A. and Alizadeh, A. 2014. Soil Water Balance, Sowing Date and Wheat Yield Using AquaCrop Model under Rainfed and Limited Irrigation. (In Farsi)
- Van Steenbergen, F., Kaiserani, A.B., Khan, N.U. and Gohar, M.S. 2015. A case of groundwater depletion in Balochistan, Pakistan: Enter into the void. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 4, 36-47.
- Wang, Y., Wu, P., Engel, B. and Sun, S. 2015. Comparison of volumetric and stress-weighted water footprint of grain products in China. *Ecological Indicators* 48, 324-333.
- Yang, H., Wang, L., Abbaspour, K.C. and Zehnder, A.J. 2006. Virtual water trade: an assessment of water use efficiency in the international food trade.