



Sensitivity Analysis of AquaCrop in Wheat Farms (Case Study: Ahvaz and Shusha Cities)

Adel Bavi^{*}

Assistant Professor, Faculty of Engineering, Shohadaye Hoveizeh Campus of Technology, Shahid Chamran University of Ahvaz, Dashte Azadegan, Iran.

*Corresponding Author: a.bavi@scu.ac.ir

Keywords:

Normalized water productivity, Sensitivity analysis, Harvest index

Abstract

Introduction

The AquaCrop plant model is one of the most widely used models for simulating the yield of cereals, including wheat. This model was developed by Steduto et al. (2009) with the aim of simulating crop performance in arid and semi-arid conditions. Its high efficiency, user-friendly graphical interface, low dependence on extensive data for simulation, and acceptable accuracy have made AquaCrop one of the most commonly used models among researchers in less than two decades. The model requires four input files to run simulations. However, since most plant parameters are not directly measured in the field, it is essential to investigate the sensitivity of the AquaCrop model to changes in these parameters during the calibration stage.

Received:

16 Jan 2025

Revised:

05 Apr 2024

Accepted:

06 Apr 2024

Materials and Methods

In this study, a sensitivity analysis of the AquaCrop model was conducted using data collected from wheat farms, including soil properties, irrigation water, and yield, in the cities of Shush and Ahvaz, Iran, over four consecutive years (2020 to 2023). The study farms covered an area of 20 hectares, where wheat was sown in early December and harvested in mid-June. In Shusha, irrigation water was sourced from the Karkheh River, with an average salinity of $1.4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, while in Ahvaz, irrigation water came from the

How to cite this article:

Bavi, A. (2025). Sensitivity Analysis of AquaCrop in Wheat Farms (Case Study: Ahvaz and Shusha Cities). *Journal of Drought and Climate change Research* (JDCR), 3(11), 97-116. [10.22077/jdcr.2025.8760.1108](https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8760.1108)



Karun River, with an average salinity of $1.9 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. The climates of the two cities are similar, and no significant temperature differences were observed during the study period. Total rainfall in Shusha ranged from 196 to 307 mm, and in Ahvaz, it ranged from 90 to 220 mm across the four years of the experiment. The sensitivity of the AquaCrop model was evaluated for six input parameters: normalized water productivity, crop coefficient for transpiration, crop canopy growth coefficient, crop canopy decline coefficient, initial crop coefficient, and harvest index.

Results and Discussion

The results showed that the AquaCrop model is highly sensitive to changes in normalized water productivity, harvest index, and crop coefficient for transpiration ($0.2 < Sp < 1.0$), moderately sensitive to the crop canopy growth coefficient ($0.05 < Sp < 0.2$), and slightly sensitive to the crop canopy decline coefficient and initial crop coefficient ($Sp < 0.05$). Changes in normalized water productivity, with a steep slope, caused variations in wheat yield in both Shusha and Ahvaz farms. The yield changes in the low and high ranges of this parameter during the years 2020–2023 in Shusha were 0.50%, 31.5%, 20.9%, and 15.2%, respectively, while in Ahvaz they were 0.75%, 0.50%, 22.5%, and 36.6%, respectively. Comparing these results with those of other parameters showed that, on average, the AquaCrop model's response to wheat yield simulation from changes in normalized water productivity in Shusha was about 7%, 15%, 21%, and 23% greater than the response to changes in harvest index, crop coefficient for transpiration, crop canopy growth coefficient, and initial crop coefficient, respectively. The corresponding values in Ahvaz were 8%, 16%, 24%, and 37%. As a result, although the model's sensitivity to changes in normalized water productivity was higher than that to other parameters, this sensitivity was more pronounced in Ahvaz, where wheat yield was lower than in Shusha. This indicates that the AquaCrop model's sensitivity is more intense at lower yield levels. On the other hand, the model's sensitivity remained constant concerning spatial changes (from Shusha to Ahvaz) but varied with temporal changes (from 2020 to 2023). Furthermore, yield changes in the model showed an inverse relationship with increases in the crop canopy decline coefficient, while they had a direct relationship with increases in the other parameters.

Conclusion

The results showed that as wheat yield increased, the sensitivity of the AquaCrop model to changes in all parameters decreased. As a result, when wheat-based farms are newly established, the simulation sensitivity is higher due to their initially low yields compared to older farms. On the other hand, changing the location of the farm from Shusha to Ahvaz did not result in any variation in the AquaCrop model's sensitivity. Therefore, the results of the sensitivity analysis from one farm

can be generalized to other similar farms. Among the input parameters of the AquaCrop model, the highest sensitivity was observed for normalized water productivity, harvest index, and maximum crop coefficient for transpiration. Thus, it is recommended that greater attention be given to these parameters in wheat-based farms compared to others.



تحلیل حساسیت مدل AquaCrop در مزارع گندم بنیان

(مطالعه موردی: شهرستان‌های اهواز و شوش)



عادل باوی*

استادیار، دانشکده فنی، پردیس فنی شهدای هویزه، دانشگاه شهید چمران اهواز، دشت آزادگان، ایران.

*نویسنده مسئول: a.bavi@scu.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی:

مدل AquaCrop یکی از مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی از جمله گندم می‌باشد که توسط محققان زیادی در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش، تحلیل حساسیت این مدل گیاهی با استفاده از داده‌های برداشت‌شده از مزارع گندم بنیان از جمله خصوصیات خاک، آب آبیاری، عملکرد و شرایط کشت گندم در طول چهار سال متوالی (۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲) در شهرستان‌های شوش و اهواز انجام گردید. حساسیت مدل AquaCrop نسبت به شش پارامتر ورودی این مدل شامل بهره‌وری آب نرمال شده، حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق، ضریب رشد پوشش گیاهی، ضریب زوال پوشش گیاهی، ضریب پوشش گیاهی اولیه و شاخص برداشت بود. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop نسبت به تغییرات مقدار بهره‌وری آب نرمال شده، شاخص برداشت و حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق دارای حساسیت زیاد ($0.2 < Sp < 1.0$)، نسبت به ضریب رشد پوشش گیاهی دارای حساسیت متوسط ($0.05 < Sp < 0.2$) و نسبت به ضریب زوال پوشش گیاهی و ضریب پوشش گیاهی اولیه دارای حساسیت کم ($Sp < 0.05$) می‌باشد. تغییرات عملکرد این مدل نسبت به افزایش مقدار پارامتر ضریب زوال پوشش گیاهی نتیجه معکوس داشت در حالی که نسبت به افزایش سایر پارامترها نتیجه مستقیم نشان داد. این حساسیت نسبت به تغییرات مکانی (از شوش به اهواز) ثابت ولی نسبت به تغییرات زمانی (از ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲) متغیر بود. در واقع، با بهبود عملکرد گندم در طول سال‌های مورد مطالعه، از حساسیت مدل AquaCrop کاسته شد. براساس کلیه نتایج، چون حساسیت مدل AquaCrop تحت تأثیر تغییرات مکانی قرار نگرفت؛ می‌توان از این نتایج در سایر مزارع گندم بنیان در کشور نیز استفاده کرد.

بهره‌وری آب نرمال شده، تحلیل حساسیت، شاخص برداشت

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۰/۲۷

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۴/۰۱/۱۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۱/۱۷

مقدمه

مدل گیاهی AquaCrop به عنوان یکی از مدل‌های پرکاربرد برای شبیه‌سازی عملکرد غلات، از جمله گندم، به شمار می‌رود. این مدل گیاهی توسط استودئو و همکاران (Steduto et al., 2009) و با هدف شبیه‌سازی گیاهان در شرایط خشک و نیمه‌خشک بسط داده شد. کارایی بالا، واسطه گرافیکی کاربرپسند، وابستگی کم به داده‌های زیاد برای شبیه‌سازی و دقت قابل قبول از جمله ویژگی‌هایی بود که باعث شد این مدل گیاهی در طول کمتر از دو دهه اخیر به عنوان یکی از مدل‌های پرکاربرد بین محققان شناخته شود (Aghajanian et al., 2023; Jorenush et al., 2024). این مدل گیاهی به چهار فایل ورودی برای اجرای شبیه‌سازی نیاز دارد. این فایل‌ها شامل پارامترهای هواشناسی، گیاهی، مدیریت مزرعه و خاک است (Steduto et al., 2009). پارامترهای هواشناسی شامل متغیرهای دمای هوا، بارندگی، تبخیر-تعرق و دی‌اکسید کربن است. پارامترهای مدیریت مزرعه عمدتاً شامل مقدار و زمان آبیاری است. پارامتر خاک نیز شامل مشخصات خاک منطقه از جمله درصد رطوبت خاک در حالت FC و PWP می‌باشد. این پارامترها در مزرعه و توسط محققان تعیین می‌شوند. لیکن، عمده‌ی پارامترهای گیاهی در مزرعه تعیین نمی‌شوند و لازم است حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات آن‌ها در مرحله‌ی واسنجی بررسی شود (Raes et al., 2012). این عمل سبب می‌شود تا کاربر بتواند با سرعت بالا و دقت بیشتر به واسنجی این مدل گیاهی بپردازد و نتایج به دست آمده نیز به شرایط واقعی نزدیک‌تر گردد (Gao et al., 2019).

یکی از اهداف اولیه تجزیه و تحلیل حساسیت در AquaCrop تعیین چگونگی تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد محصول است. در برخی مطالعات، پارامترهایی مانند حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق، تبخیر و تعرق پتانسیل و سطوح رطوبت خاک به عنوان عوامل تعیین‌کننده حیاتی عملکرد محصول شناسایی شده‌اند. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای که توسط نصرالهی و همکاران (Nasrolahi et al., 2024) انجام شد مشاهده گردید که تغییرات عملکرد گندم نسبت به

مقادیر بهره‌وری آب نرمال شده می‌تواند منجر به اختلاف قابل توجهی در عملکرد پیش‌بینی شده برای گندم شود. به‌طور مشابه، ژائو و همکاران (Gao et al., 2019) نشان دادند که عملکرد بالاترین حساسیت را نسبت به پارامترهای رطوبت خاک داشت. در پژوهشی رحیمی‌خوب و همکاران (Rahimikhoob et al., 2020) به ارزیابی پارامترهای ورودی مدل AquaCrop پرداختند. این محققان گزارش کردند که دو پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده و حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق بیشترین تغییرات را در عملکرد گیاه ریحان به وجود آوردند. به همین دلیل، این محققان بر لزوم دقت در برآورد این پارامترها قبل از واسنجی تأکید کردند. ژین و همکاران (Jin et al., 2018) در بررسی تحلیل حساسیت مدل AquaCrop نشان دادند که پارامتر حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق سبب بیشترین تغییر در عملکرد کلزا گردید.

بینش به‌دست‌آمده از تحلیل‌های حساسیت AquaCrop پیامدهای مهمی برای توسعه پیش‌بینی در بخش کشاورزی دارد. درک اینکه کدام پارامترها بیشترین تأثیر را بر عملکرد محصولات زراعی، از جمله گندم، دارند به محققان اجازه می‌دهد تا رفتار مدل گیاهی مورد استفاده را قبل از واسنجی بررسی کنند (Adla et al., 2024). علی‌رغم مزایای تجزیه و تحلیل حساسیت در مدل AquaCrop، چندین چالش وجود دارد. یکی از محدودیت‌های مهم عدم قطعیت مرتبط با تخمین پارامتر ورودی است. تنوع در شرایط محلی، خطاهای اندازه‌گیری و نوسانات زمانی می‌تواند منجر به عدم دقت در ورودی‌های مدل شود، بنابراین بر قابلیت اطمینان نتایج تحلیل حساسیت تأثیر می‌گذارد (Nasrolahi et al., 2024). علاوه بر این، در حالی که تجزیه و تحلیل حساسیت در مقیاس مکانی و زمانی، درک جامع‌تری از روابط ورودی-خروجی این مدل گیاهی ارائه می‌دهد، نیازمند توسعه مطالعات در چند پایلوت و در زمان‌های بیشتری در مقایسه با مطالعات قبلی است. در واقع، مطالعات انجام شده محققان تاکنون به سطح محدودی از داده‌های آزمایشی اشاره دارد در حالی که استفاده از مدل AquaCrop در طرح‌های کلان ملی و بین‌المللی

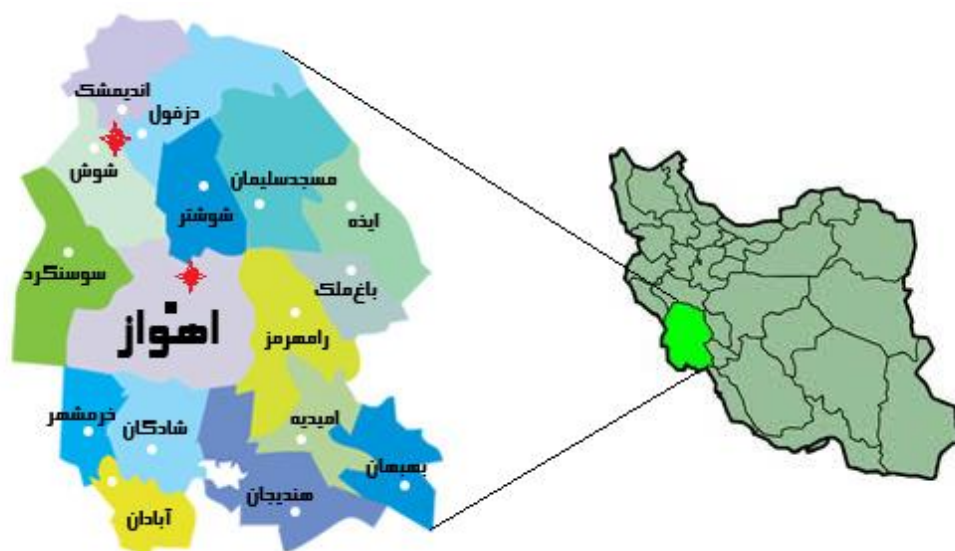
اوایل آذر کاشته و در اواسط خرداد برداشت گردید. تراکم کاشت در هر دو مزرعه ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار بود و رقم گندم مهرگان کاشته شد. کلیه پارامترها مانند آبیاری، خاک‌ورزی و مبارزه با علف‌های هرز در این مزارع یکسان بود و کشاورزان در هر پایلوت به اعمال این عملیات می‌پرداختند. آب آبیاری در مزارع شهرستان شوش از رودخانه کرخه با متوسط شوری ۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر و آب آبیاری در شهرستان اهواز از رودخانه کارون با متوسط شوری ۱/۹ دسی‌زیمنس بر متر انجام گردید. اقلیم این دو شهرستان مشابه است و تفاوت چندانی در دمای هوای آن‌ها در طول آزمایش وجود نداشت (جدول ۱). مجموع بارندگی در شهرستان شوش در سال‌های اول تا چهارم آزمایش بین ۳۰۷-۱۹۶ میلی‌متر و در شهرستان اهواز بین ۲۲۰-۹۰ میلی‌متر متغیر بود. مشخصات خاک مزارع مورد مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده و خصوصیات خاک مزارع نیز تقریباً نزدیک به یکدیگر است. برداشت گندم توسط کمباین انجام گردید و عملکرد در این مزارع نیز براساس تعیین وزن توسط باسکول با دقت ۱۰۰ کیلوگرم به دست آمد.

مستلزم شناخت کافی از حساسیت این مدل می‌باشد. مطالعه پژوهش‌های مشابه پیشین نشان داد که تاکنون مطالعه‌ای در خصوص بررسی حساسیت مدل AquaCrop در سایت‌های واقعی و به مدت طولانی انجام نشده است. بنابراین، در این مطالعه به تحلیل حساسیت مدل AquaCrop در مزارع گندم در دو منطقه متفاوت و در یک بازه‌ی طولانی‌مدت (چهار ساله) در استان خوزستان پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر براساس داده‌های برداشت شده از مزارع گندم‌بنیان در خلال سال‌های ۱۳۹۹-۱۴۰۲ در دو شهرستان شوش و اهواز انجام گردید. این شهرستان‌ها در مرکز استان خوزستان و به‌ترتیب در موقعیت جغرافیایی $32^{\circ}19'$ شمالی - $48^{\circ}24'$ شرقی و $31^{\circ}35'$ شمالی - $48^{\circ}45'$ شرقی قرار دارند. مناطق مورد مطالعه در اطراف دو شهرستان شوش و اهواز در شکل ۱ نشان داده شده است. مساحت مزارع تحت مطالعه ۲۰ هکتار بود و گندم در این مزارع در



شکل ۱. نقشه موقعیت مزارع در دو شهرستان شوش و اهواز (موقعیت مزارع با ستاره قرمز مشخص شده است).

Fig 1. The location map of farms in the two cities of Shusha and Ahvaz (the location of the farms is marked with a red star).

جدول ۱. مشخصات پارامترهای هواشناسی در پایلوت‌های مورد مطالعه.

Table 1. Specifications of meteorological parameters in the studied pilots.

نام شهرستان	نام پارامتر	2020	2021	2022	2023
Name of the city	Name of the parameter				
شوش Shusha	بارندگی (میلی‌متر) Rainfall (mm)	307	235	104	196
	متوسط دمای حداقل (درجه سانتی‌گراد) Average minimum temperature (Degree Celsius)	16.5	16.6	17.3	17.3
	متوسط دمای حداکثر (درجه سانتی‌گراد) Average maximum temperature (Degree Celsius)	32.6	32.8	34.5	33.8
اهواز Ahvaz	بارندگی (میلی‌متر) Rainfall (mm)	155	220	90	119
	متوسط دمای حداقل (درجه سانتی‌گراد) Average minimum temperature (Degree Celsius)	19.5	19.3	20.1	20.0
	متوسط دمای حداکثر (درجه سانتی‌گراد) Average maximum temperature (Degree Celsius)	34.0	34.2	35.8	35.0

جدول ۲. برخی مشخصات خاک مزارع گندم مورد مطالعه

Table 2. Some soil characteristics of the studied wheat fields

شهرستان City	عمق Depth	pH	EC	بافت خاک Soil texture	مخصوص ظاهری Apparent specific gravity	وزن OC	رطوبت در FC Humidity in FC	رطوبت در PWP Humidity in PWP
	cm	–	dS.m ⁻¹	–	gr.cm ⁻³	%	%w/w	%w/w
شوش Shusha	0-30	7.8	4.9	Loam Clay Sand	1.48	0.7	17.9	9.3
اهواز Ahvaz	0-30	7.5	5.2	Loam Clay Sand	1.43	0.3	18.1	10.0

تحلیل حساسیت

ورودی‌های مدل AquaCrop شامل داده‌های اقلیم، خاک، آب آبیاری و گیاه است. داده‌های اقلیمی شامل داده‌های نشان داده شده در جدول (۱) می‌باشد که برای مدل تعریف گردید. داده‌های خاک شامل پارامترهای ارائه شده در جدول (۲) است. داده‌های آبیاری نیز شامل شوری آب آبیاری و مقدار آن است. داده‌های گیاهی نیز شامل طیف وسیعی از پارامترهای ورودی است که در این پژوهش به تحلیل حساسیت آن‌ها پرداخته شد. این پارامترها هیچ‌کدام در مزرعه اندازه‌گیری نمی‌شوند و در مرحله واسنجی به دست می‌آیند. به همین دلیل اطلاع از میزان حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات آن‌ها اهمیت زیادی برای محاسبه مقادیر دقیق آن‌ها در مرحله واسنجی دارد. روش تحلیل حساسیت به صورت دستی و براساس ارزیابی میزان تغییر خروجی مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی انجام گردید. معیار تعیین پارامترهای مورد نظر در تحلیل حساسیت، روابط حاکم بر این مدل بود.

در مدل AquaCrop فرض بر این است که عملکرد گیاه براساس نسبتی از تبخیر-تعرق واقعی به حداکثر شبیه‌سازی می‌شود. در واقع، میزان تبخیر-تعرق توسط میزان پوشش گیاهی تعیین می‌گردد و این پارامتر با تفکیک سهم تبخیر از تعرق، میزان زیست‌توده را در مقیاس روزانه محاسبه می‌کند. با در نظر داشتن مجموع زیست‌توده روزانه و درصد شاخص برداشت، عملکرد نهایی تعیین می‌گردد. این فرضیات حاکم بر مدل در روابط (۱) تا (۶) نشان داده شده است.

پوشش گیاهی

مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی ابتدا به تعیین پوشش گیاهی براساس یکی از سه رابطه‌ی زیر می‌پردازد (Steduto et al., 2009):

$$CC = CC_0 \times e^{tCGC} \quad (۱)$$

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{CC_x^2}{CC_0} \times e^{-tCGC} \quad (۲)$$

$$CC = CC_x \left[1 - 0.05 \left(e^{\frac{CDC}{CC_x} \times t} - 1 \right) \right] \quad (۳)$$

در این روابط، CC_0 پوشش گیاهی اولیه^۱ (سانتی‌متر مربع برای هر گیاه)، CGC ضریب رشد پوشش گیاهی^۲ (درصد روز)، CDC ضریب کاهش پوشش گیاهی^۳ (درصد روز) و t زمان (روز) است. این سه رابطه در طول دوره رشد گیاهان و به ترتیب در ابتدای دوره رشد، مرحله توسعه و مرحله زوال مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تعرق گیاهی

براساس میزان توسعه پوشش گیاهی، مقدار تعرق براساس رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$T_{ri} = K_s \times CC \times K_{CTrx} \times ET_0 \quad (۴)$$

در این رابطه، K_s ضریب تنش آبی (-) و K_{CTrx} حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق^۴ (-) است.

زیست‌توده

با استفاده از رابطه‌ی (۴)، عملکرد زیست‌توده گیاهان زراعی براساس رابطه‌ی زیر در مدل AquaCrop تعیین می‌شود:

$$B = WP^* \sum_{i=1}^n \frac{T_{ri}}{ET_0} \quad (۵)$$

در این معادله، B عملکرد زیست‌توده تجمعی (گرم بر مترمربع)، WP^* بهره‌وری آب نرمال شده^۵ (گرم بر مترمربع)، Tr_i تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر در روز) و ET_0 تبخیر-تعرق مرجع (میلی‌متر در روز)، n تعداد روزهای پس از کشت و i شماره روز است.

عملکرد

عملکرد گیاهان زراعی، از حاصل ضرب عملکرد زیست‌توده در شاخص برداشت^۶ (HI) مطابق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$Y = B \times HI \quad (۶)$$

1 Crop Canopy Cover

2 Crop Canopy Growth Coefficient

3 Crop Canopy Decline Coefficient

4 Crop Coefficient for Transpiration

5 Normalized Water Productivity

6 Harvest Index

به همین دلیل، مطابق جدول (۳)، مقادیر اولیه، حدود پایین و بالا و نمو تغییرات این پارامترها در این پژوهش تعیین گردید. این مقادیر براساس مشخصات اولیه پارامترها در مدل AquaCrop برای گیاه زراعی گندم برداشت شد.

بنابراین، پارامترهای پوشش گیاهی اولیه، ضریب رشد پوشش گیاهی، ضریب کاهش پوشش گیاهی، بهره‌وری آب نرمال شده، حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق و شاخص برداشت از جمله عوامل اساسی برای تعیین میزان حساسیت در این مدل گیاهی هستند.

جدول ۳. مقادیر اولیه، حدود پایین و بالا و نمو تغییرات پارامترهای مورد مطالعه.

Table 3. Initial values, lower and upper limits, and evolution of changes in the studied parameters.

پارامتر Parameter	علامت Sign	واحد Unit	مقدار اولیه Initial Value	حد پایین Lower Value	حد بالا Upper Value	نمو تغییرات Increment
بهره‌وری آب نرمال شده Normalized water productivity	WP*	g.m^{-2}	15	13	17	1
حداکثر ضریب تعرق گیاهی Maximum crop coefficient for transpiration	KCTrx	-	1.1	0.09	1.1	0.05
پوشش گیاهی اولیه Initial canopy cover	CCo	$\text{cm}^2.\text{plant}^{-1}$	6.7	6.5	6.9	0.1
ضریب رشد پوشش گیاهی Canopy cover growth coefficient	CGC	$\%\text{day}^{-1}$	4.9	2.9	6.9	1
ضریب کاهش پوشش گیاهی Canopy cover decline coefficient	CDC	$\%\text{day}^{-1}$	7.2	7.0	7.4	1
شاخص برداشت Harvest index	HI	%	48	42	54	3

نوع پارامتر می‌تواند مثبت یا منفی باشد. مقادیر مثبت نشان دهنده افزایش عملکرد و مقادیر منفی نشان دهنده کاهش عملکرد با تغییرات پارامتر مورد نظر است. مقدار ضریب حساسیت با توجه به جدول (۴) در چهار گروه کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد قرار می‌گیرند (Lenhart et al., 2002).

برای تعیین میزان حساسیت پارامترهای معرفی شده در جدول (۳)، از رابطه‌ی باون مطابق زیر استفاده شد:

$$S_{pi} = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta P}{P}} = \frac{\partial y}{\partial P} \times \frac{P}{y} \quad (7)$$

در این رابطه، S_{pi} ضریب حساسیت، P_i پارامتر مورد بررسی و y مقدار زیست‌توده است. مقادیر S_{pi} بر حسب

جدول ۴. طبقه‌بندی ضریب حساسیت.

Table 4. Classification of sensitivity coefficient.

گروه Group	دامنه تغییرات ضریب حساسیت Range of sensitivity coefficient changes	توضیحات Status
1	$0 \leq Sp < 0.05$	کم Low
2	$0.05 \leq Sp < 0.2$	متوسط Moderate
3	$0.2 \leq Sp < 1$	زیاد High
4	$1 \leq Sp $	بسیار زیاد Very high

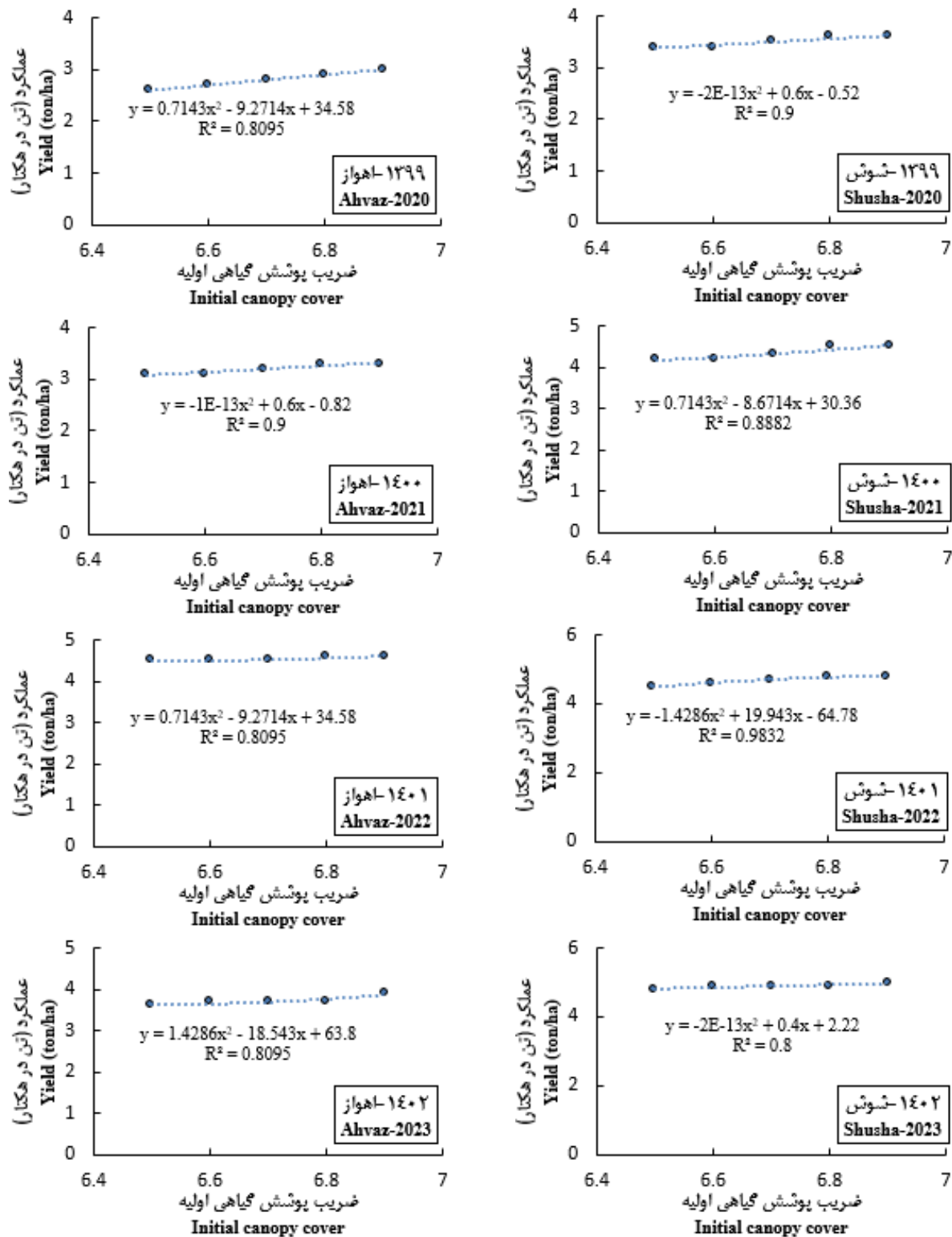
نتایج و بحث

نتایج تغییرات عملکرد گندم برای هر دو شهرستان شوش و اهواز براساس تغییرات ضریب پوشش گیاهی اولیه در شکل (۲) نشان داده شده است. در شهرستان شوش، با تغییر مقدار پوشش گیاهی اولیه از ۶/۵ به ۶/۹ سانتی متر مربع بر گیاه، مقدار عملکرد در سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲ به ترتیب ۵/۸، ۷/۱، ۶/۶ و ۴/۱ تن در هکتار بود. این مقادیر برای شهرستان اهواز به ترتیب ۱۵/۳، ۶/۴، ۲/۲ و ۸/۳ درصد به دست آمد. همان طور که در شکل (۲) نیز مشاهده می‌شود؛ در سال ۱۳۹۹، شیب خط تغییرات عملکرد برای شهرستان اهواز بیشتر از شوش است. در حالی که با مقایسه سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ بین دو شهرستان شوش و اهواز، نتایج عکس به دست آمد. شیب تغییرات در سال ۱۴۰۲ برای شهرستان اهواز بیشتر از شوش بود. در واقع، عملکرد گندم در شهرستان شوش طی سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲ به ترتیب ۳/۵، ۴/۳، ۴/۷ و ۴/۹ تن در هکتار بود در حالی که عملکرد گندم در این سال‌ها برای شهرستان اهواز به ترتیب ۲/۸، ۳/۲، ۴/۵ و ۳/۷ تن در هکتار به دست آمد. به همین دلیل، در سال ۱۳۹۹، که اختلاف عملکرد بین دو شهرستان زیاد است؛ بیشترین اختلاف بین شیب تغییرات عملکرد نیز به دست آمد. شیب تغییرات ۱۵/۳ در سال ۱۳۹۹ برای شهرستان اهواز به دلیل پایین بودن عملکرد در حد پایین ضریب گیاهی اولیه (۲/۶ تن در هکتار) و بالا بودن اختلاف بین عملکرد در دو حد پایین و بالای مقدار ضریب گیاهی اولیه (۰/۴ تن در هکتار) بود. اختلاف حدود بالا و پایین عملکرد برای شهرستان اهواز در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ به ترتیب ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۳ بود. بنابراین می‌توان اختلاف عملکرد در حدود بالا و پایین ضریب گیاهی اولیه را مهم‌ترین عامل تغییرات شیب در این شهرستان در نظر گرفت. از طرف دیگر، اختلاف حدود بالا و پایین عملکرد برای شهرستان شوش در طی سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲ به ترتیب ۰/۲، ۰/۳، ۰/۳ و ۰/۲ بود. از این رو، می‌توان اختلاف حدود پایین و بالا برای این شهرستان را نیز عامل تغییرات شیب در نظر گرفت. تفاوت بین شیب خطوط در این دو شهرستان نیز به دلیل اختلاف

عملکرد گندم آن‌ها است.

شیب تغییرات عملکرد با تغییر ضریب رشد پوشش گیاهی نسبت به پارامتر ضریب رشد پوشش گیاهی اولیه بیشتر بود (شکل ۳). این نتایج توسط سایر محققان از جمله نصرالهی و همکاران (Nasrolahi et al., 2024) و رحیمی‌خوب و همکاران (Rahimikhoob et al., 2020) نیز گزارش شده است. این محققان به علت این موضوع اشاره‌ای نکردند و احتمالاً بیشتر بودن حساسیت مدل AquaCrop نسبت به ضریب رشد پوشش گیاهی به دلیل بیشتر بودن اثر آن بر عملکرد گندم مرتبط باشد. در شهرستان شوش، با تغییر ضریب رشد پوشش گیاهی از ۲/۹ به ۶/۹، عملکرد گندم از ۳/۳ به ۳/۷ تن در هکتار در سال ۱۳۹۹ تغییر کرد. در حالی که دامنه تغییرات عملکرد گندم در سال‌های ۱۴۰۰، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ به ترتیب ۴/۶-۴/۲، ۴/۸-۴/۵ و ۵/۰-۴/۸ تن در هکتار بود. با توجه به دامنه‌ی تغییرات به دست آمده، میزان تغییرات عملکرد در سال‌های ۱۳۹۹ الی ۱۴۰۲ در این شهرستان به ترتیب ۱۲/۱، ۹/۵، ۶/۶ و ۴/۱ درصد تعیین گردید. عملکرد گندم در شهرستان اهواز در طی سال‌های ۱۳۹۹ الی ۱۴۰۲ به ترتیب در دامنه‌ی ۳/۲-۲/۳، ۴/۴-۲/۸، ۴/۷-۴/۳ و ۴/۰-۳/۴ تن در هکتار متغیر بود. میزان تغییرات عملکرد بین حدود پایین و بالای ضریب رشد پوشش گیاهی به ترتیب ۳۹/۱، ۲۱/۴، ۹/۳ و ۱۷/۶ درصد بود. بالا بودن میزان تغییرات عملکرد در شهرستان اهواز نسبت به شوش را می‌توان در پایین بودن عملکرد در این شهرستان در نظر گرفت. همان طور که در شکل (۲) نیز مشاهده شد، هر چه عملکرد گندم در حدود پایین پارامترهای ورودی مدل AquaCrop کمتر باشد، احتمال بالا بودن شیب تغییرات وجود دارد. از طرفی، با افزایش عملکرد گندم طی سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲، کاهش میزان تغییرات در هر دو شهرستان مشاهده گردید. بنابراین، می‌توان اثر افزایش عملکرد بر کاهش حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی را مشاهده کرد.

در شکل (۴) تغییرات عملکرد نسبت به مقادیر مختلف شاخص برداشت برای هر دو شهرستان نشان داده شده است. شاخص برداشت حاصل تقسیم عملکرد

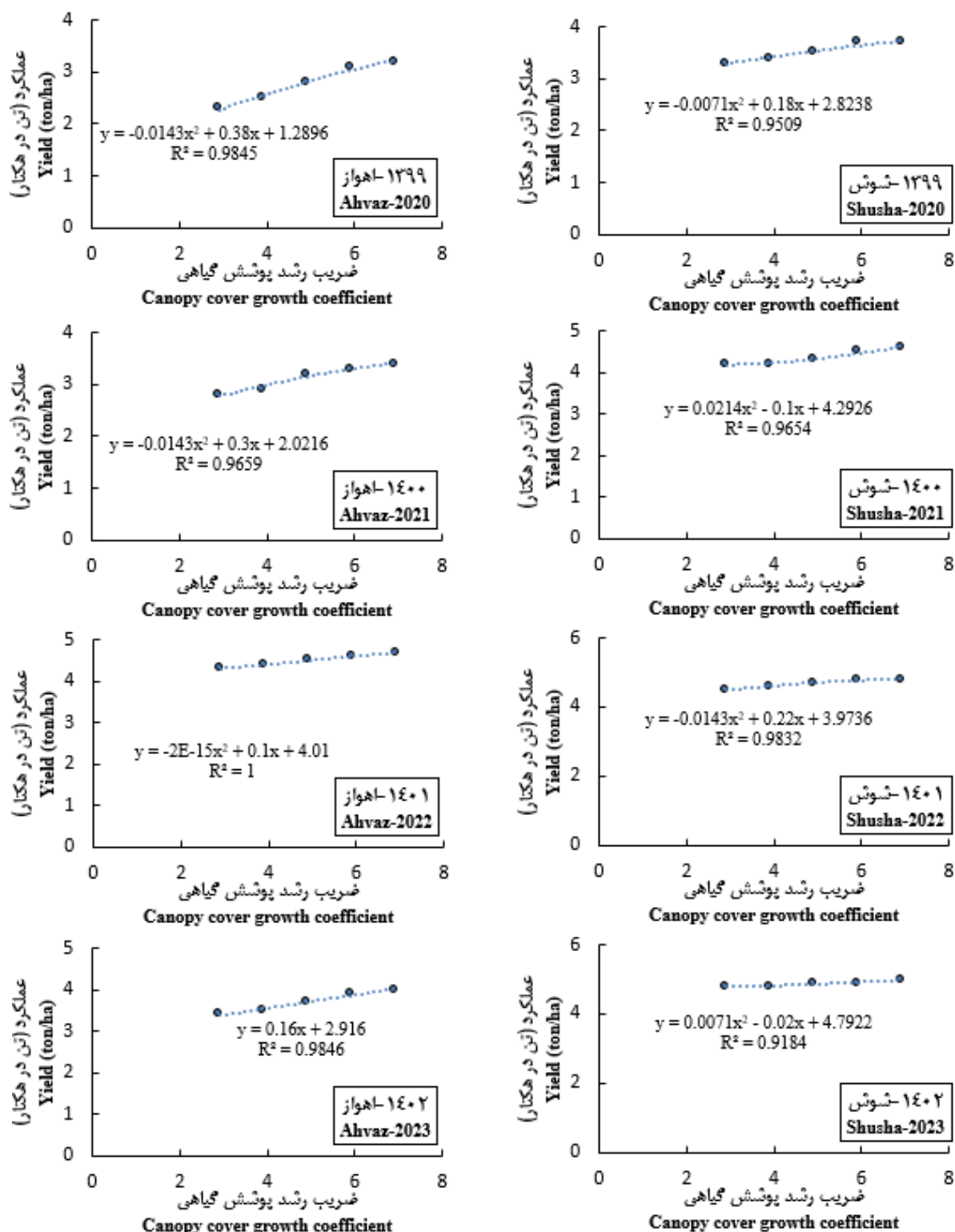


شکل ۲. مقادیر عملکرد گندم در طی چهار سال تحت مطالعه براساس تغییرات ضریب پوشش گیاهی اولیه.

Fig 2. Wheat yield values during the four years under study, based on changes in the initial vegetation cover coefficient.

در شهرستان شوش و از ۲/۱ به ۳/۴ تن در هکتار در شهرستان اهواز براساس حدود پایین و بالای شاخص برداشت تغییر کرد. بنابراین، میزان تغییرات در

بر زیست توده است. بنابراین رابطه مستقیمی بین تغییرات عملکرد و شاخص برداشت وجود دارد. در سال ۱۳۹۹، عملکرد گندم از ۳/۰ به ۴/۰ تن در هکتار



شکل ۳. مقادیر عملکرد گندم در طی چهار سال تحت مطالعه براساس تغییرات ضریب رشد پوشش گیاهی.

Fig 3. Wheat yield values during the four years under study are based on changes in the canopy cover growth coefficient.

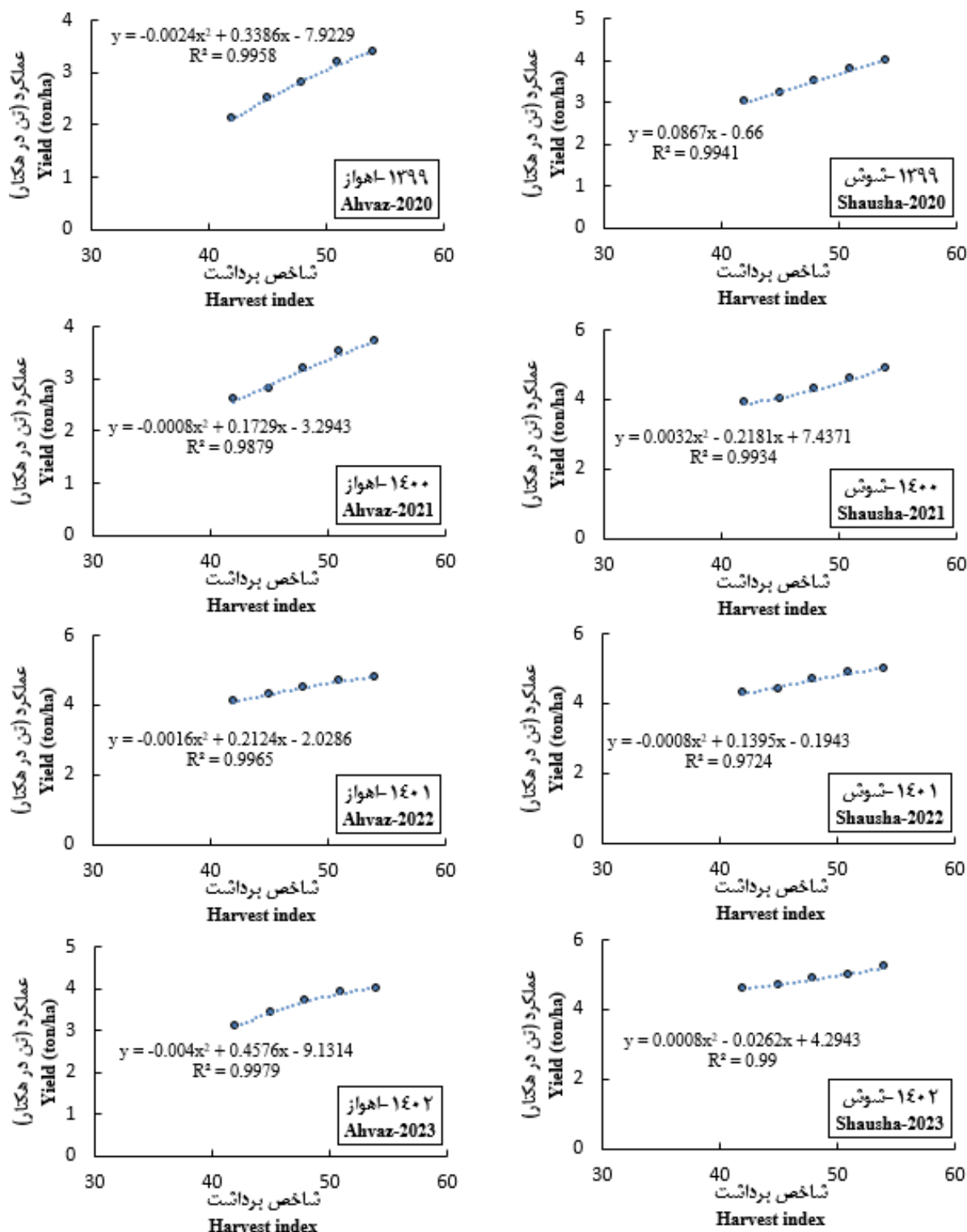
۳/۹، ۵/۰-۴/۳ و ۵/۲-۴/۶ تن در هکتار و میزان تغییرات در این سال‌ها به ترتیب ۲۵/۶، ۱۶/۲ و ۱۳/۰ درصد بود. دامنه‌ی تغییرات عملکرد در شهرستان اهواز برای

شهرستان‌های شوش و اهواز به ترتیب ۳۳/۳ و ۶۱/۹ درصد بود. دامنه‌ی تغییرات عملکرد برای شهرستان شوش در سال‌های ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۲ به ترتیب ۴/۹-

برای شهرستان اهواز به ترتیب ۵۰/۰، ۳۳/۳، ۱۱/۹ و ۲۵/۰ درصد به دست آمد در حالی که این تغییرات برای شهرستان شوش به ترتیب ۲۵/۸، ۱۲/۱، ۸/۸ و ۸/۵ درصد بود. مقایسه نتایج به دست آمده در شکل‌های (۲) تا (۵) نشان داد که میزان تغییرات عملکرد گندم با تغییر شاخص برداشت بیشتر از سایر پارامترها بود. تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده با شیب زیادی سبب تغییر عملکرد گندم در هر دو شهرستان شوش و اهواز شد (شکل ۶). میزان تغییرات عملکرد گندم در محدوده‌ی پایین و بالای این پارامتر در سال‌های ۱۴۰۲-۱۳۹۹ در شهرستان شوش به ترتیب ۵۰/۰، ۳۱/۵، ۲۰/۹ و ۱۵/۲ درصد و در شهرستان اهواز به ترتیب ۷۵/۰، ۵۰/۰، ۲۲/۵ و ۳۶/۶ درصد بود. مقایسه این نتایج با سایر پارامتر نشان داد که به‌طور متوسط، واکنش مدل AquaCrop به شبیه‌سازی عملکرد گندم با تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده در شهرستان شوش حدود ۷، ۱۵، ۲۱ و ۲۳ درصد از واکنش این مدل نسبت به تغییرات پارامترهای شاخص برداشت، حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق، ضریب رشد پوشش گیاهی و ضریب پوشش گیاهی اولیه بیشتر بود. این نتایج برای شهرستان اهواز به ترتیب برابر با ۸، ۱۶، ۲۴ و ۳۷ درصد به دست آمد. در نتیجه، گرچه واکنش مدل AquaCrop نسبت به تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده بیشتر از سایر پارامترها بود لیکن در شهرستان اهواز، که عملکرد گندم در آن کمتر از شهرستان شوش بود، این تغییرات با شدت بیشتری مشاهده گردید. علت این است که حساسیت مدل AquaCrop در مقادیر عملکرد پایین‌تر گندم شدیدتر است.

واکنش عملکرد گندم نسبت به افزایش ضریب زوال پوشش گیاهی معکوس بود (شکل ۷). در واقع، با افزایش مقدار این پارامتر در هر دو شهرستان مورد مطالعه، عملکرد گندم کاهش یافت. علت آن است که افزایش این پارامتر در انتهای دوره رشد، سبب می‌شود تا میزان پوشش گیاهی به‌شدت کاهش یافته و فرصت لازم برای تولید گندم صورت نگیرد. میزان کاهش عملکرد گندم طی سال‌های تحت مطالعه در شهرستان شوش به ترتیب ۵/۸، ۷/۱، ۶/۶ و ۴/۱ درصد و در شهرستان اهواز به ترتیب ۱۵/۳، ۶/۴

سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ به ترتیب ۲/۶-۳/۷، ۴/۱-۴/۸ و ۳/۱-۴/۰ تن در هکتار و دامنه‌ی تغییرات عملکرد گندم برای این سال‌ها به ترتیب ۴۲/۳، ۱۷/۰ و ۲۹/۰ درصد به دست آمد. افزایش میزان تغییرات در سال ۱۴۰۲ برای شهرستان اهواز به دلیل کاهش عملکرد گندم در این سال بود. در صورتی که کاهش حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات شاخص برداشت در هر دو شهرستان با افزایش عملکرد گندم مشاهده گردید. در شکل (۵) تغییرات عملکرد گندم نسبت به تغییرات حداکثر ضریب تعرق گیاهی نشان داده شده است. شیب تغییرات عملکرد در این پارامتر نسبت به پارامترهای ضریب پوشش گیاهی اولیه و ضریب رشد پوشش گیاهی بیشتر بود به‌طوری که عملکرد گندم در شهرستان شوش در حدود پایین این پارامتر برای سال‌های ۱۳۹۹ الی ۱۴۰۲ به ترتیب به ۳/۱، ۴/۱، ۴/۵ و ۴/۷ تن در هکتار رسید. این در حالی بود که مقدار عملکرد در حدود پایین برای پارامتر ضریب پوشش گیاهی اولیه و ضریب رشد پوشش گیاهی در سال ۱۳۹۹ به ترتیب ۳/۴ و ۳/۳ تن در هکتار به دست آمد. مقادیر عملکرد گندم برای حدود بالای این پارامترها در سال ۱۳۹۹ به ترتیب ۳/۶ و ۳/۷ تن در هکتار و برای حداکثر ضریب تعرق گیاهی برابر با ۳/۹ تن در هکتار بود. این شرایط برای سال‌های بعدی نیز وجود داشت و از این رو، دامنه‌ی تغییرات بیشتر برای عملکرد گندم با تغییر مقادیر حداکثر ضریب تعرق گیاهی نشان دهنده بالا بودن حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییر این پارامتر است. این نتایج توسط سایر محققان از جمله نصرالهی و همکاران (Nasrolahi et al., 2024) و سرکهکی و همکاران (Sarkohaki et al., 2020) نیز گزارش شده است. این محققان نیز حداکثر ضریب تعرق گیاهی را به عنوان یکی از پارامترهای با حساسیت زیاد در مدل AquaCrop گزارش کردند. عملکرد گندم در حدود پایین این پارامتر در شهرستان اهواز طی سال‌های ۱۴۰۲-۱۳۹۹ به ترتیب ۲/۲، ۲/۷، ۴/۲ و ۳/۲ تن در هکتار و عملکرد این گیاه زراعی در حدود بالای این پارامتر در خلال سال‌های ۱۳۹۹ الی ۱۴۰۲ به ترتیب ۳/۳، ۳/۶، ۴/۷ و ۴/۰ تن در هکتار بود. بنابراین میزان تغییرات عملکرد گندم در این سال‌ها

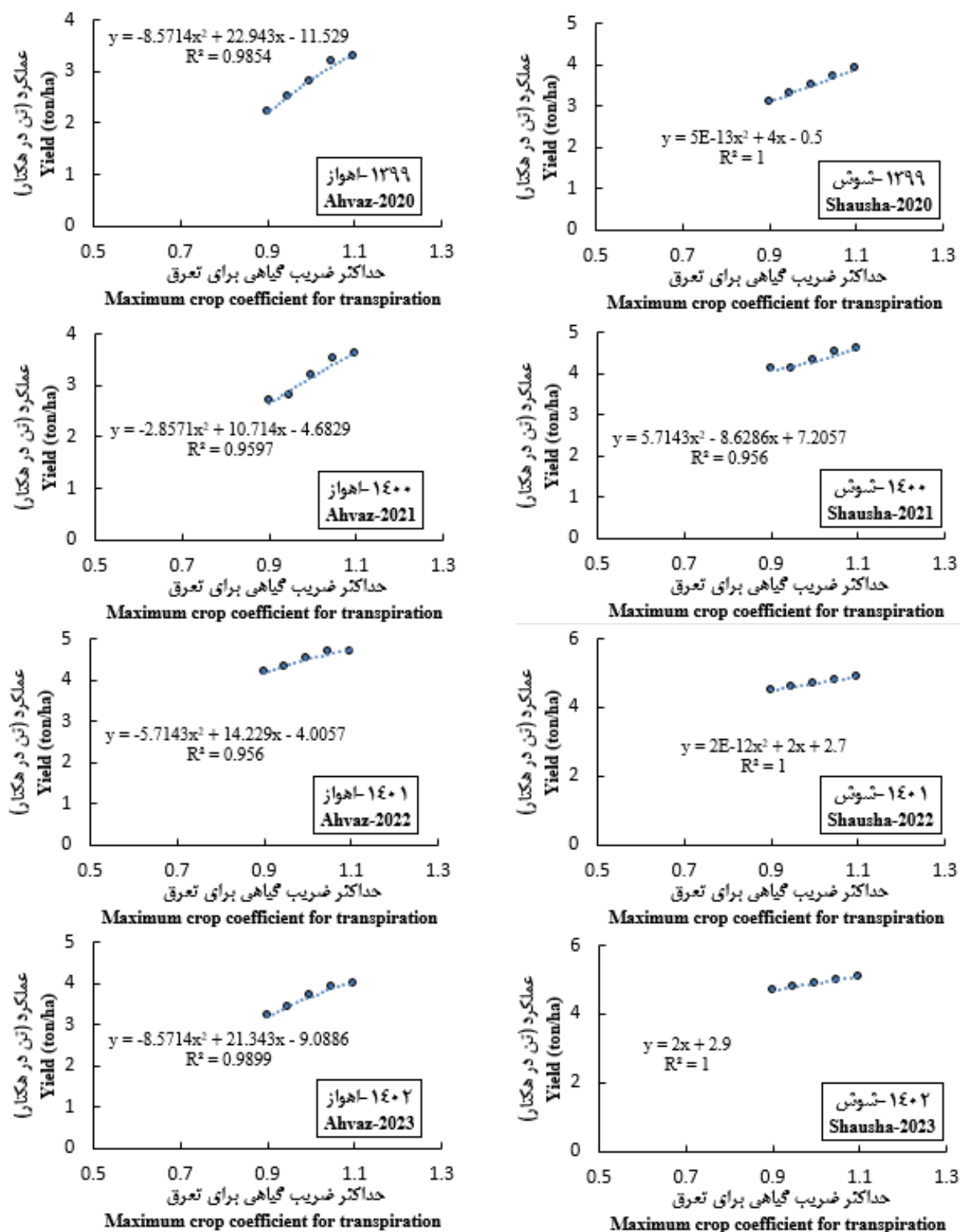


شکل ۴. مقادیر عملکرد گندم در طی چهار سال تحت مطالعه براساس تغییرات شاخص برداشت.

Fig 4. Wheat yield values during the four years under study are based on changes in harvest index.

به تغییرات کلیه پارامترهای ورودی در هر دو شهرستان در شکل (۸) نشان داده شده است. بیشترین حساسیت نسبت به تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده و شاخص برداشت وجود داشت به‌طوری که حتی در سال

۲/۳ و ۸/۳ درصد بود. در نتیجه، این تغییرات شدت کمتری نسبت به تغییرات کلیه پارامترهای ورودی مدل AquaCrop به‌جز ضریب رشد پوشش گیاهی اولیه داشت. میزان حساسیت مدل AquaCrop نسبت

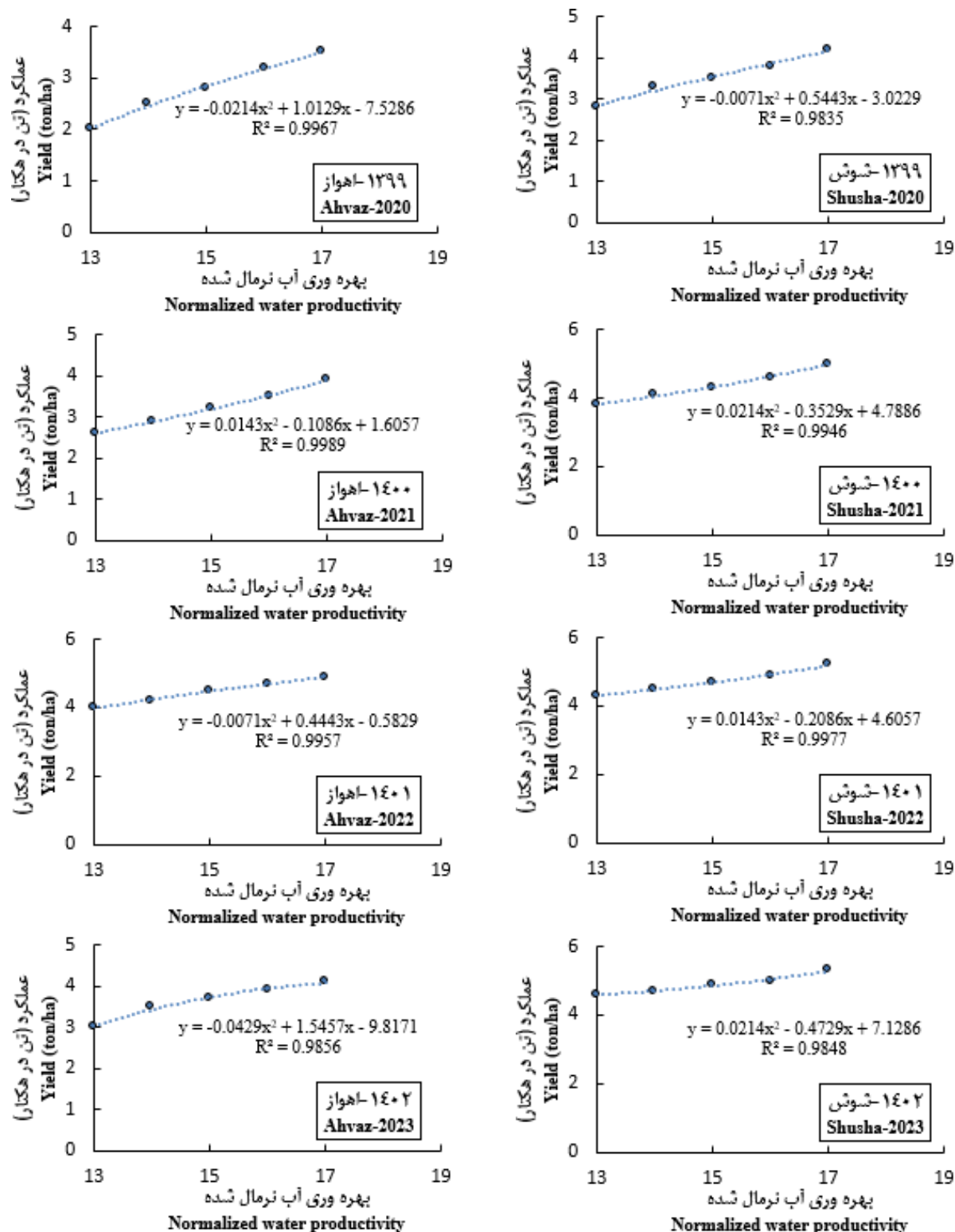


شکل ۵. مقادیر عملکرد گندم در طی چهار سال تحت مطالعه براساس تغییرات حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق.

Fig 5. Wheat yield values during the four years under study are based on changes in maximum crop coefficient for transpiration.

تغییرات ضریب پوشش گیاهی اولیه و ضریب زوال پوشش گیاهی بود. این شرایط در هر دو شهرستان تحت مطالعه یکسان بود و به همین دلیل می‌توان

۱۴۰۲، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این دو پارامتر بیشتر از سایر پارامترهای ورودی بود. کمترین حساسیت مدل AquaCrop نیز نسبت به

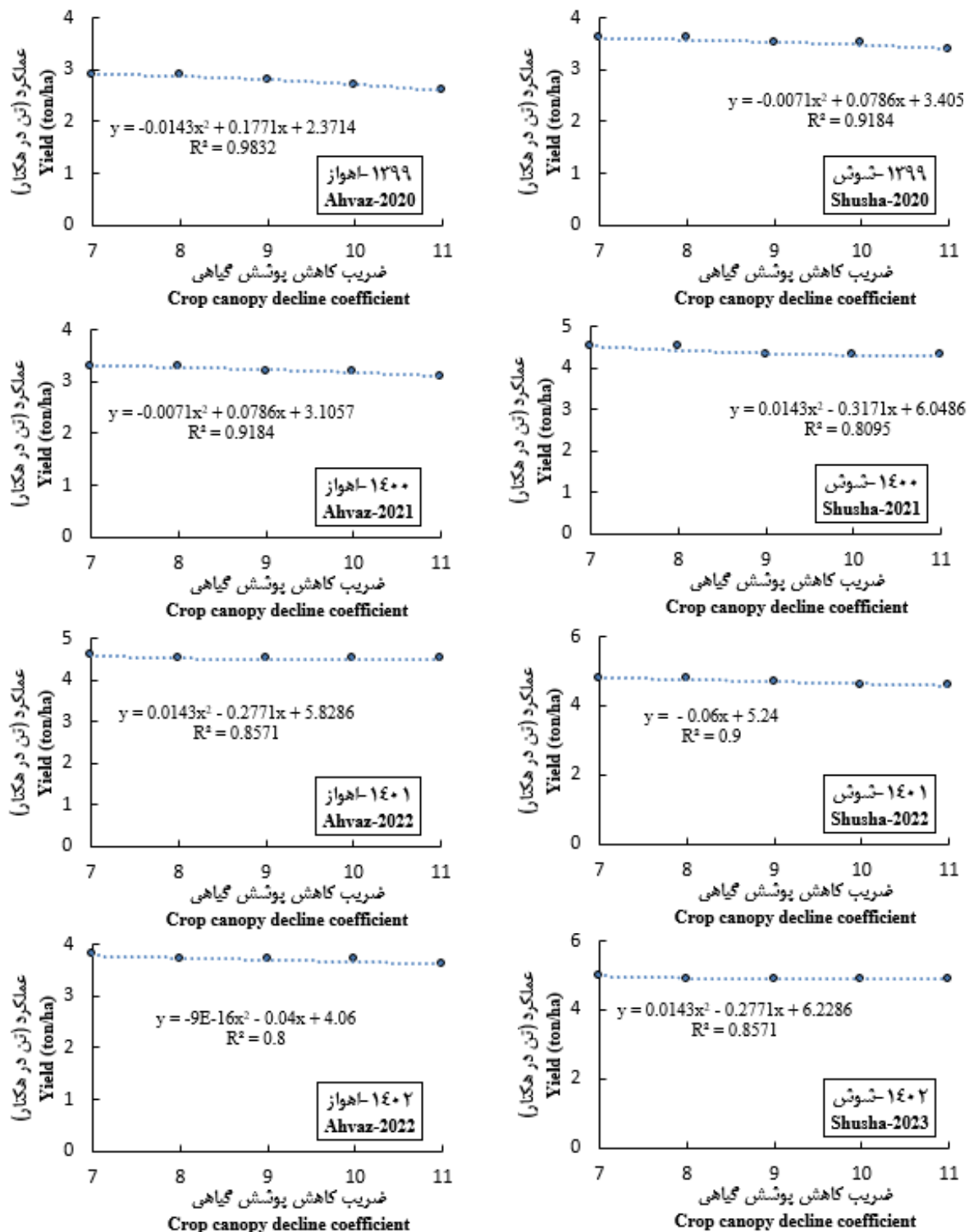


شکل ۶. مقادیر عملکرد گندم در طی چهار سال تحت مطالعه براساس تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده.

Fig 6. Wheat yield values during the four years under study are based on changes in normalized water productivity.

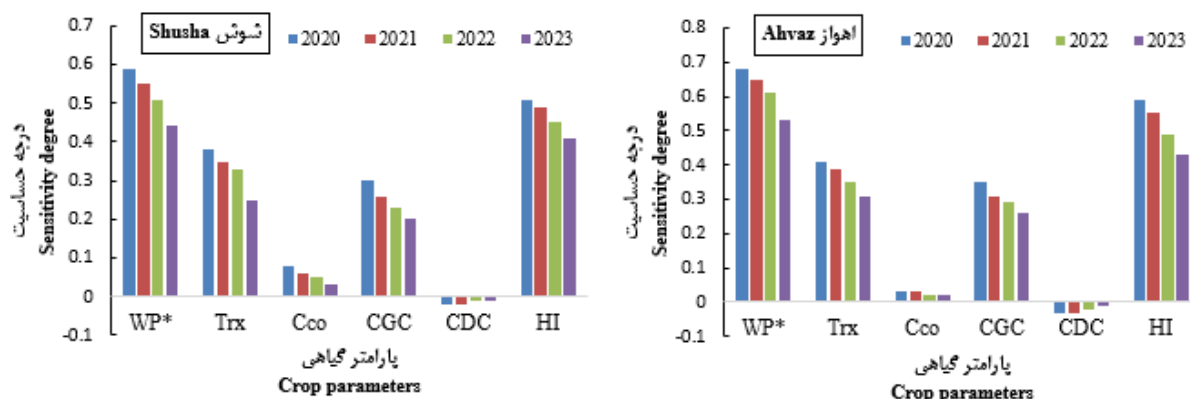
مزرعه، بر کاهش حساسیت مدل AquaCrop نسبت به کلیه پارامترهای ورودی مشاهده گردید.

اثر مکان را بر حساسیت مدل AquaCrop در شرایط مزرعه‌ای یکسان نادیده گرفت. در حالی که گذشت زمان، با توجه به بهبود فعالیت‌های مدیریتی در



شکل ۷- مقادیر عملکرد گندم در طی چهار سال تحت مطالعه براساس تغییرات ضریب کاهش پوشش گیاهی

Fig 7. Wheat yield values during the four years under study are based on changes in the canopy cover decline coefficient.



شکل ۸. میزان حساسیت مدل AquaCrop نسبت به پارامترهای ورودی در شهرستان‌های شوش و اهواز.

Fig 8. Sensitivity of the AquaCrop model to input parameters in the cities of Shusha and Ahvaz.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییر شش پارامتر ورودی شامل بهره‌وری آب نرمال شده، حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق، ضریب رشد پوشش گیاهی، ضریب زوال پوشش گیاهی، ضریب پوشش گیاهی اولیه و شاخص برداشت در دو شهرستان شوش و اهواز طی چهار سال متوالی بررسی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش عملکرد گندم، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات همه‌ی پارامترها کاهش یافت. در نتیجه، زمانی که مزارع گندم‌بنیان در ابتدای تأسیس هستند؛ به دلیل پایین بودن عملکرد آن‌ها، حساسیت شبیه‌سازی بالاتر از مزارع قدیمی می‌باشند. از طرفی، تغییر مزرعه از شوش به اهواز تغییری در حساسیت مدل AquaCrop ایجاد نکرد. بنابراین، می‌توان نتایج تحلیل حساسیت یک مزرعه را به سایر مزارع مشابه تعمیم داد. در بین پارامترهای ورودی مدل AquaCrop، بیشترین حساسیت نسبت به بهره‌وری آب نرمال شده، شاخص برداشت و حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق تعلق داشت. از این رو، پیشنهاد می‌شود در برآورد این پارامترها در مزارع گندم‌بنیان توجه بیشتری نسبت به سایر پارامترها معطوف شود.

منابع

- capacitance-based soil moisture sensor on AquaCrop model performance. *J Environ Manage.* 27(353), 120248. DOI: [10.1016/j.jenvman.2024.120248](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120248).
- Aghajanloo, Z., & Nikbakht, J. (2023). Simulation and assessment of the AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in zanzan region. *Water and Soil Science*, 33(2), 23-34. [in Persian] DOI: [10.22034/ws.2021.43612.2413](https://doi.org/10.22034/ws.2021.43612.2413).
- Guo, D., Zhao, R., Xing, X., & Ma, X. (2019). Global sensitivity and uncertainty analysis of the AquaCrop model for maize under different irrigation and fertilizer management conditions. *Arch. Agron. Soil Sci.* 1-19. DOI: [10.1080/03650340.2019.1657845](https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1657845).
- Jalil, A., Akhtar, F., & Awan, U. Kh. (2020). Evaluation of the AquaCrop model for winter wheat under different irrigation optimization strategies at the downstream Kabul River Basin of Afghanistan, *Agric. Water Manag.* 240, 106321. DOI: [10.1016/j.agwat.2020.106321](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106321).
- Jin, X., Li, Z., Nie, C., Xu, X., Feng, H., Guo, W., Adla, S., Bruckmaier, F., Arias-Rodriguez, LF., Tripathi, S., Pande, S., & Disse, M. (2024) Impact of calibrating a low-cost

- [DOI:10.1061/JIDEDH.IRENG-10099](https://doi.org/10.1061/JIDEDH.IRENG-10099).
- Raes, D., Steduto P., Hsiao, T. C., & Freres, E. (2012). Reference manual AquaCrop, FAO, *Land and Water Division*, Rome, Italy.
- Rahimikhoob, H. , Sohrabi, T., & Delshad, M. (2020). Sensitivity analysis of basil crop growth parameters in the Aquacrop model under different nitrogen fertilizer stresses. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(6), 1341-1351. [in Persian] [DOI: 10.22059/ijswr.2020.298460.668516](https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.298460.668516).
- Salemi, H., Mohd Soom, M. A., Lee, T. S., Mousavi, S. F., Ganji, A., & Kamil Yusoff, M. (2011). Application of the AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in an arid region. *Afr. J. Agric. Res.* 610, 2204-2215. [DOI: 10.5897/AJAR10.1009](https://doi.org/10.5897/AJAR10.1009).
- Sarkohaki, A. , Egdernezhad, A., & Minaei, S. (2022). Sensitivity analysis of AquaCrop model to changes in growth parameters of corn under salinity stress in different irrigation methods. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(4), 727-738. [in Persian] [DOI: 20.1001.1.20087942.1401.16.4.3.6](https://doi.org/20.1001.1.20087942.1401.16.4.3.6).
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop: The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.* 101(3), 426-437. [DOI: 10.2134/agronj2008.0139s](https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s).
- & Wang, J. (2018). Parameter sensitivity analysis of the AquaCrop model based on extended fourier amplitude sensitivity under different agro-meteorological conditions and application. *Field Crops Res.* 226, 1-15. [DOI: 10.1016/j.fcr.2018.07.002](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.07.002).
- Jorenush, M. H. , Egdernezhad, A. , Shahrokh Nia, M. A., & Ebrahimipak, N. (2024). Evaluation of the AquaCrop model for simulation of Wheat plant (Triticum) yield under different scenarios of agricultural management in Qazvin. *Water Soil Manage Model.* 4(2), 1-16. [in Persian] [DOI: 10.22098/mmws.2023.12533.1248](https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12533.1248).
- Kim, D., & Kaluarachchi, J. (2015). Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional crop information. *Agric. Water Manag.* 149:143-155. [DOI:10.1016/j.agwat.2014.10.013](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.013).
- Kumar, P., Sarangi, A., Singh, D. K., & Parihar S. S. (2014). Evaluation of the AquaCrop model in predicting wheat yield and productivity under irrigated saline regimes. *J. Irrig. Drain.* 63, 474-487. [DOI: 10.1002/ird.1841](https://doi.org/10.1002/ird.1841).
- Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N., & Frede, H. (2002). Comparison of two different approaches to sensitivity analysis. *Phys. Chem. Earth. Parts A/B/C*, 27(9-10), 645-654. [DOI: 10.1016/S1474-7065\(02\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00049-9).
- Nasrolahi, Al. H., Ahmadee, M., & Rustum, R. (2024). Sensitivity analysis of AquaCrop model for winter wheat in different water supply conditions, , *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 150 (2),

