Research Paper

# Determining the Appropriate Amount of Potato Irrigation Water in Chaharmahal-and-Bakhtiari Province Based on the Virtual Water

**Naji Boozar**[1] **Aslan Egdernezhad**[2*] , **Saeed Boroomand Nasab**[3]

[1] M.Sc. Student of Irrigation and drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. Email: najiboazar@gmail.com. Tel: 09166097813
[2] Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. 09163111269. a_eigder@ymail.com (Corresponding author)
[3] Professor of Irrigation and Drainage, Shahid Chamran University of Ahvaz. Email: boroomandsaeed@yahoo.com. Tel: 09161183014

10.22125/IWE.2022.344740.1637

Received:
**July 9, 2022**
Accepted:
**September 24, 2022**
Available online:
**August 23, 2023**

Keywords:
**Virtual water, Irrigation Scenarios, Water Consumption Intensity, AquaCrop.**

## Abstract

Chaharmahal-and-Bakhtiari province has about 10% of the Iran's surface water resources, and for this reason, irrigated crops such as potatoes are cultivated there. Potato is sent to other provinces and this causes the loss of part of the water resources of this province in the form of virtual water. For this reason, it is necessary to consider the appropriate amount of irrigation water for potato cultivation in order to reduce the pressure on the water resources of this province in addition to producing the crop. Therefore, in the present study, the appropriate depth of irrigation water was determined according to the concept of virtual water. First, the yield and water consumption for potato production under the current conditions of this province were determined. Then, an experiment was conducted in a research station to study the effect of three irrigation methods (S: drip, Su: subsurface drip and F: furrow) and three amounts of irrigation water (I100: 100% water supply, I80: 80% water supply, and I65: 65% of water supply). Next, the calibrated AquaCrop was used to simulate three water supply scenarios (I90: 90% water supply, I55: 55% water supply, and I45: 45% water supply) in all three irrigation methods. The results showed that the amount of irrigation water for potato production in the current situation is 6770 cubic meters per hectare, which had about 52% more virtual water compared to I100. Applying deficit irrigation scenarios reduced virtual water by about 12-54 percent and reduced the intensity of water consumption by about 32-71 percent. Considering all the results, SI80 with a reduction of virtual water by 55% and the intensity of water consumption by 43% is suggested as the most appropriate irrigation scenario. In this scenario, potato yield was reduced by only 7% compared to I100.

## 1. Introduction

Chaharmahal-and-Bakhtiari province has about 10% of the Iran's surface water resources, and for this reason, irrigated crops such as potatoes are cultivated there. Potato is sent to other provinces and this causes the loss of part of the water resources of this province in the form of virtual water. For this reason, it is necessary to consider the appropriate amount of irrigation water for potato cultivation in order to reduce the pressure on the water resources of this province in addition to producing the crop.

* **Corresponding Author:** Aslan Egdernezhad
**Address:** Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
**Email:** a_eigder@ymail.com
**Tel:** 09163111269

## 2. Materials and Methods

Therefore, in the present study, the appropriate depth of irrigation water was determined according to the concept of virtual water. First, the yield and water consumption for potato production under the current conditions of this province were determined. Then, an experiment were conducted in a research station to study the effect of three irrigation methods (S: drip, Su: subsurface drip and F: furrow) and three amounts of irrigation water (I100: 100% water supply, I80: 80% water supply, and I65: 65% of water supply). Next, the calibrated Aqua Crop was used to simulate three water supply scenarios (I90: 90% water supply, I55: 55% water supply, and I45: 45% water supply) in all three irrigation methods.

## 3. Results

Water productivity and virtual water values obtained in scenario I90 were very close to I80. The effects of deficit irrigation on potato virtual water changed significantly from scenario I65. The average water procutivity in scenario I55 for the three methods of drip irrigation, subsurface drip and furrow irrigation was 0.5, 4.5 and 6.6 kg.m-3, respectively. Comparison of these results for I65 showed that the average water productivity for the mentioned irrigation methods decreased by 27, 24 and 16%, respectively. While the difference in water productivity between the two scenarios I55 and I45 was 10, 20 and 8%, respectively. Therefore, furrow irrigation method was less effective than other irrigation methods in changing water productivity. The highest effectiveness was observed in the subsurface drip irrigation method. Therefore, in addition to knowing the amount of irrigation water, in applying deficit irrigation, it is necessary to pay attention to the irrigation method. Based on the results, there was no significant difference in the amount of virtual water between the irrigation methods in scenario I90. The subsurface drip irrigation method had the highest amount of virtual water in scenarios I55 and I45. The lowest amount of virtual water was related to furrow irrigation. The reason was higher water productivity due to higher yield in furrow irrigation method. In all three irrigation methods, the amount of virtual water used and the intensity of water consumption in I90 scenario were very close to I80. However, by reducing the amount of water consumed to 55% of the potato water requirement, the virtual water consumption decreased by an average of 38% compared to I90. While the difference between the virtual water consumed between the two treatments I55 and I45 was on average 18%. The difference in water consumption intensity between the two scenarios I90 and I55 was on average 38.8% and between the two scenarios I55 and I45 was equal to 18.1%. The difference in water consumption intensity in two scenarios I65 and I55 was equal to 26.2%.

## 4. Discussion and Conclusion

The amount of irrigation water for potato production in the current situation is 6770 cubic meters per hectare, which had about 52% more virtual water compared to I100. Applying deficit irrigation scenarios reduced virtual water by about 12-54 percent and reduced the intensity of water consumption by about 32-71 percent. Considering all the results, SI80 with a reduction of virtual water by 55% and the intensity of water consumption by 43% is suggested as the most appropriate irrigation scenario. In this scenario, potato yield was reduced by only 7% compared to I100.

## 5. Six important references

1) Ahmadee, M., Ghanbarpouri, M., Egdernezhad, A. 2021. Applied Irrigation Water of Wheat using Sensitivity Analysis and Evaluation of Aqua Crop. Water Management in Agriculture. 8(1): 15-30.
2) Egdernezhad, A., Ebrahimipak, N., Tafteh, A., Ahmadee, M. 2019. Canola Irrigation Scheduling using AquaCrop Model in Qazvin Plain, Water Management in Agriculture, 5(2): 53-64.
3) Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y. 2004. Water footprints of nations, Unesco-IHE Institute for Water Education.
4) Chen, G. Q. & Li, J. S. 2015. Virtual water assessment for Macao, China: highlighting the role of external trade.
5) Ebrahimipak, N., Ahmadee, M., Egdernezhad, A., Khashei Siuki, A. 2018. Evaluation of AquaCrop to simulate saffron (crocus sativus L.) yield under different water management scenarios and zeolite amount, Journal of Water and Soil Resources Conservation, 8(1): 117-132.

6) Ebrahimipak, N., Egdernezhad, A., Tafteh, A., and Ahmadee, M. 2019. Evaluation of AquaCrop, WOFOST, and CropSyst to Simulate Rapeseed Yield. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 13(3-75): 715-726.

## Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال سیزدهم. ویژه نامه تابستان ۱۴۰۲

# تعیین مقادیر مناسب آب آبیاری سیب‌زمینی در استان چهارمحال و بختیاری براساس مفهوم آب مجازی

ناجی بوعذار[۱]، اصلان اگدرنژاد[۲]، سعید برومندنسب[۳]

تاریخ ارسال:۱۴۰۱/۰۴/۱۸
تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۰۷/۰۲

مقاله پژوهشی

## چکیده

استان چهارمحال و بختیاری حدود ۱۰ درصد منابع آب سطحی کشور را در اختیار دارد و به همین دلیل کشت محصولات پرآب مانند سیب‌زمینی در این استان انجام می‌شود. محصولات تولید شده به سایر استان‌ها ارسال می‌گردد و این موضوع سبب از دست رفتن بخشی از منابع آب این استان به صورت آب مجازی می‌گردد. به همین دلیل لازم است مقادیر مناسب آب آبیاری برای کشت سیب‌زمینی در نظر گرفته شود تا علاوه بر تولید محصول، از فشار بر منابع آب این استان نیز کاسته شود. از این رو، در تحقیق حاضر به تعیین عمق مناسب آب آبیاری با توجه به مفهوم آب مجازی پرداخته شد. ابتدا عملکرد و میزان آب مصرفی برای تولید سیب‌زمینی تحت شرایط فعلی این استان تعیین گردید. سپس، آزمایش‌هایی در در ایستگاه تحقیقاتی چهار تخته برای مطالعه اثر سه روش آبیاری (S: قطره‌ای، Su: قطره‌ای زیرسطحی و F: جویچه‌ای) و سه مقدار آب آبیاری (I100: تأمین صد درصد نیاز آبی، I80: تأمین ۸۰ درصد نیاز آبی و I65: تأمین ۶۵ درصد نیاز آبی) انجام شد. در ادامه، از مدل واسنجی شده‌ی AquaCrop برای شبیه‌سازی سه سناریوی تأمین آب (I90: تأمین ۹۰ درصد نیاز آبی، I55: تأمین ۵۵ درصد نیاز آبی و I45: تأمین ۴۵ درصد نیاز آبی) در هر سه روش آبیاری استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان آب آبیاری برای تولید سیب‌زمینی در شرایط فعلی ۶۷۷۰ مترمکعب بر هکتار است که نسبت به تیمار I100 حدود ۵۲ درصد آب مجازی بیشتری داشت. اعمال سناریوهای کم‌آبیاری سبب کاهش آب مجازی در حدود ۵۴-۱۲ درصد و کاهش شدت مصرف آب در حدود ۳۲-۷۱ درصد شد. با در نظر گرفتن کلیه نتایج، سناریوی SI80 با کاهش آب مجازی به میزان ۵۵ درصد و شدت مصرف آب به میزان ۴۳ درصد به‌عنوان مناسب‌ترین مقدار آب آبیاری پیشنهاد می‌شود. در این سناریو، عملکرد سیب‌زمینی فقط ۷ درصد نسبت به سناریوی I100 کاهش داشت.

**واژه‌های کلیدی: آب مجازی، سناریوهای آبیاری، شدت مصرف آب، مدل AquaCrop.**

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. تلفن تماس: ۰۹۱۶۶۰۹۷۸۱۳، پست الکترونیک: najiboazar@gmail.com

[۲] استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. تلفن تماس: ۰۹۱۶۳۱۱۱۲۶۹، پست الکترونیک: a_eigder@ymail.com (مسئول مکاتبات)

[۳] استاد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز. تلفن تماس: ۰۹۱۶۱۱۸۳۰۱۴. پست الکترونیک: boroomandsaeed@yahoo.com

## مقدمه

آب یکی از عوامل محدودکننده در بخش کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران است. با توجه به مصرف حدود ۹۰ درصد منابع آب کشور ایران در بخش کشاورزی و تأمین بیش از ۹۰ درصد کل محصولات کشاورزی ایران از اراضی فاریاب این موضوع اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. وابستگی ۲۷ درصد تولید ناخالص ملی و ۲۲ درصد نیروی کار کشور به بخش کشاورزی، نیاز به افزایش تأمین غذای جمعیت در حال رشد کشور و کاهش سرانه آب در کشور سبب شده است تا برنامه‌های متعددی برای بهینه‌سازی و مدیریت بهتر مصرف آب در بخش کشاورزی در نظر گرفته شود (احمدی و همکاران، ۱۴۰۰).

در نظر گرفتن آب مجازی برای تولید محصولات کشاورزی از جمله مفاهیم و برنامه‌های نوین است که در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به آن شده است. گرچه این مفهوم در دهه ۹۰ میلادی ارائه شد (Chapagain and Hoekstra, 2009)؛ لیکن مجدداً در سیاست‌گذاری‌های ملی و بین‌المللی مورد توجه قرار گرفته است (علیزاده و خلیلی، ۱۳۸۸). آب مجازی در واقع میزان آب مصرف شده برای تولید هر کیلوگرم محصول کشاورزی است. بنابراین با تولید و فروش محصولات کشاورزی، منابع آب مصرف شده نیز مورد تجارت قرار می‌گیرند. به عنوان مثال طی سال‌های ۱۹۹۹-۱۹۹۵ گندم به تنهایی ۳۰ درصد حجم تجارت آب مجازی بین کشورها را به خود اختصاص داد و پس از آن، سویا و برنج با تراز ۱۷ و ۱۵ درصد در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند (موسوی و همکاران، ۱۳۸۸). در طی همین سال، ایران با واردات ۲۹/۱ میلیارد مترمکعب آب مجازی به عنوان یکی از کشورهای مطرح در واردات آب مجازی به شمار می‌رفت (Chapagain and Hoekstra, 2009) در حالی که با صادرات ۵ میلیارد متر مکعب آب مجازی رتبه ۵۵ جهان را به خود اختصاص داد (احسانی و همکاران، ۱۳۸۷). کشور مصر در این سال با وارد کردن ۷/۵ میلیون تن انواع غله توانست حدود ۹/۹ میلیارد مترمکعب در مصرف منابع آب خود صرفه‌جویی کند (Fraiture et al., 2004). برخی محققان با بررسی تولید و صادرات گندم در کانادا به این نتیجه رسیدند که در طی ده سال، پنج میلیارد مترمکعب از منابع آب این کشور به سایر کشورها صادر شده است (Masud et al., 2019). در حالی که کشور آلمان با توجه به این موضوع، سیاست صادرات کالاهای کم‌آب‌بر را اتخاذ کرد و توانست حدود ۶۹ میلیون مترمکعب از منابع آب خود را ذخیره کند (Jiang et al., 2015).

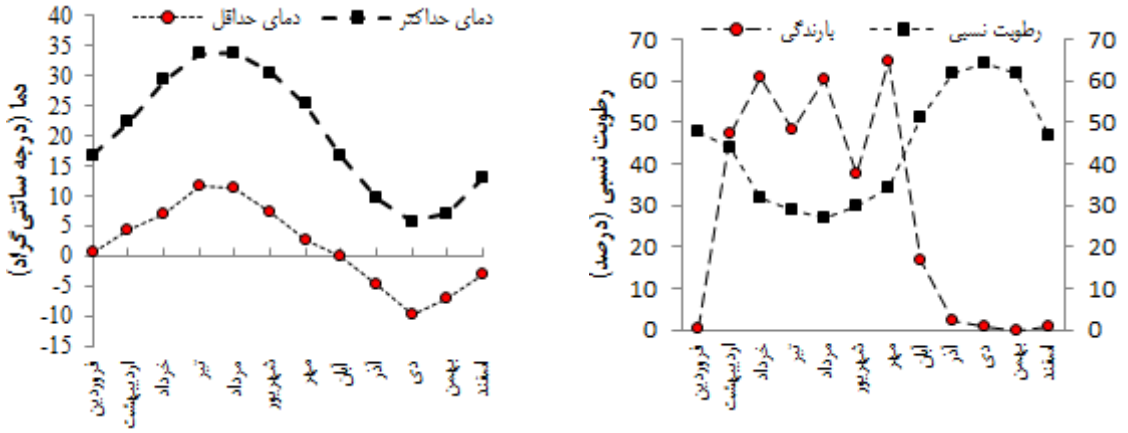
سیب‌زمینی (Solanum tuberosom) گیاهی یکساله است و بعد از گندم، برنج و ذرت مهم‌ترین محصول زراعی در جهان به شمار می‌رود. براساس آمار منتشر شده، ایران سیزدهمین تولید کننده سیب‌زمینی در جهان است و از حدود ۱۵۹ هزار هکتار زمین تحت کشت این گیاه زراعی، حدود پنج میلیون تن محصول برداشت می‌شود (FAO, 2018). این گیاه زراعی در مناطق معتدل رشد خوبی دارد و شرایط محیطی و خاک اثر قابل توجهی بر عملکرد آن دارد (انصاری و همکاران، ۱۳۹۸). این گیاه زراعی دارای سیستم ریشه‌ای کم عمق است و به همین دلیل به تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی حساس است (حاجی‌برات و همکاران، ۱۳۹۹). به همین دلیل شرایط نامناسب و کم‌آبیاری سبب کاهش غده و عملکرد آن می‌گردد (Tourneux et al., 2003). از طرف دیگر، در نظر گرفتن مقدار مناسب آب آبیاری برای بهبود وضعیت آب مجازی مورد استفاده در محصولات کشاورزی مانند سیب‌زمینی در هر منطقه ضروری است. این موضوع به خصوص در کشورهای با اقلیم خشک و نیمه‌خشک اهمیت بیشتری می‌یابد. برای دستیابی به این هدف، روش کم‌آبیاری مورد نظر قرار می‌گیرد (علیزاده و خلیلی، ۱۳۸۸). کم‌آبیاری باید با در نظر گرفتن بیشترین منافع در بلند مدت از نظر امنیت غذایی و مصرف منابع آب باشد. به همین دلیل لازم است تحقیقات متعددی در مزارع تحقیقاتی روی کم‌آبیاری و تولید محصولات کشاورزی انجام شود. انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای در مناطق مختلف برای تعمیم نتایج مقادیر مختلف کم‌آبیاری، مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار زیاد است. بنابراین محققان معمولاً در

مزرعه از چند عمق آبیاری برای تعیین نتایج استفاده می‌کنند. سپس با استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاهی مانند AquaCrop واکنش گیاهان به سایر مقادیر آب مصرفی را شبیه‌سازی می‌کنند (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۷؛ اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷). این مدل گیاهی به دلیل قابل اعتماد بودن نتایج و سهولت دسترسی به داده‌های مورد نیاز (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸؛ احمدی و همکاران، ۱۴۰۰) کمک شایانی به ارزیابی سناریوهای مختلف آبیاری در تجارت آب مجازی می‌کند.

استان چهارمحال و بختیاری یکی از استان‌های با پتانسیل قابل قبول برای تولید محصولات کشاورزی در کشور است. این استان حدود ۱۰ درصد از منابع آب سطحی کشور را به خود اختصاص می‌دهد (بی‌نام، ۱۳۹۹). همین امر سبب توسعه کشت محصولات آب‌بر مانند سیب‌زمینی در این استان شده است. از طرفی، در دهه‌های اخیر مشکلات به وجود آمده در خصوص کمبود منابع آب در این استان سبب شده است تا برنامه‌ریزان سیاست‌های کم‌آبیاری و توجه به آب مجازی در تولید محصولات کشاورزی را در دستور کار قرار دهند. از این رو، تحقیق حاضر با هدف تعیین مقدار آب آبیاری مناسب برای تولید سیب‌زمینی در این استان براساس مفهوم آب مجازی انجام شد. برای دستیابی به این مهم، سه روش آبیاری تحت سه عمق مختلف آب آبیاری در دو مزرعه آزمایشی بررسی شد. سپس از مدل گیاهی AquaCrop برای شبیه‌سازی اثر سناریوهای مختلف تأمین آب آبیاری بر مقدار آب مجازی سیب‌زمینی استفاده گردید.

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش از اطلاعات منتشر شده توسط سند بهره‌وری آب استان چهارمحال و بختیاری (بی‌نام، ۱۳۹۹) برای تعیین میزان آب مجازی در تولید سیب‌زمینی در استان چهارمحال و بختیاری استفاده شد. این اطلاعات بیانگر وضعیت فعلی این استان است. بنابراین برای تعیین اثر مقادیر مختلف آب آبیاری بر مقادیر آب مجازی سیب‌زمینی، آزمایش مزرعه‌ای طی دو سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۷به صورت دو آزمایش مجزا در ایستگاه تحقیقاتی چهار تخته شهرکرد واقع در استان چهار محال و بختیاری با مختصات جغرافیایی ۳۲ درجه و ۱۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی با ارتفاع ۲۰۹۰ متر از سطح دریا انجام شد. این منطقه اقلیم نیمه مرطوب با تابستان معتدل و زمستان بسیار سرد دارد. برخی مشخصات هواشناسی منطقه مورد نظر در شکل (۱) نشان داده شده است. سپس برای بسط نتایج، از مدل شبیه‌ساز گیاهی AquaCrop نیز استفاده شد.




شکل (۱): مشخصات هواشناسی منطقه مورد مطالعه

**آزمایش مزرعه‌ای**

در این دو آزمایش گیاه سیب‌زمینی رقم بورن تحت سه روش آبیاری (S: قطره‌ای، Su: قطره‌ای زیرسطحی و F: جویچه‌ای) و سه مقدار آبیاری (I100: تأمین صد درصد نیاز آبی، I80: تأمین ۸۰ درصد نیاز آبی و I65: تأمین ۶۵ درصد نیاز آبی) با در نظر گرفتن سه تکرار برای هر تیمار کاشته شد. بذرها قبل از کاشت ضدعفونی سپس استفاده شدند. قبل از عملیات کاشت، نمونه‌برداری برای تعیین خصوصیات خاک انجام شد (جدول ۱). سپس کاشت در تاریخ ۲۵ خرداد و به‌صورت مکانیزه توسط دستگاه انجام شد. میزان بذر مصرفی ۴/۸ تن در هکتار بود. ابعاد کرت‌ها برابر با ۱۰×۴ متر مربع در نظر گرفته شد. در داخل هر کرت چهار ردیف کاشت که فاصله بین ردیف‌ها ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بین بذرها ۲۰ سانتی‌متر بود در نظر گرفته شد. کرت‌های فرعی با فاصله ۱ متر، کرت‌های اصلی با فاصله ۱ متر و تکرارها با فاصله ۳ متر از هم‌دیگر جدا شدند (حقیقتی‌بروجنی و همکاران، ۱۳۹۴؛ خیری‌شلمزاری و همکاران، ۱۳۹۹).

**جدول (۱): خصوصیات فیزیکی وشیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه**

| عمق cm | EC (µ mohs/cm) | PWP %w.w$^{-1}$ | FC %w.w$^{-1}$ | pH | جرم مخصوص ظاهری g.cm$^{-3}$ | N % | O.C % | نوع بافت |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۳۰-۰ | ۱/۳ | ۹ | ۲۳/۸ | ۷/۷ | ۱/۳ | ۰/۰ | ۰/۶ | لوم |
| ۳۰-۶۰ | ۰/۹ | ۸/۳ | ۲۵/۲ | ۷/۷ | ۱/۴ | ۰/۰ | ۰/۴ | لوم‌سیلتی |

برای تعیین عمق خالص آبیاری در تیمار FI، در هر نوبت آبیاری با هدف جایگزین نمودن رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه تا حد ظرفیت زراعی از رابطه زیر استفاده شد:

$$dn = \left(\theta_{fc} - \theta_i\right) \times \rho_b \times Z_r \qquad (۱)$$

در این رابطه $dn$: عمق خالص آبیاری (mm)، $\theta_i$: رطوبت وزنی قبل از آبیاری، $\theta_{fc}$: رطوبت وزنی خاک در ظرفیت زراعی، $\rho_b$: وزن مخصوص ظاهری خاک ($g/cm^3$) و $Z_r$: عمق ریشه (mm) است. زمان‌بندی آبیاری بر اساس محاسبات کاهش رطوبت در منطقه ریشه در حد رطوبت سهل‌الوصول انجام شد. مرز پایین رطوبت سهل‌الوصول (تخلیه مجاز) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\theta_m = \left[\theta_{fc} - MAD\left(\theta_{fc} - \theta_{pwp}\right)\right] \qquad (۲)$$

که در آن $\theta_m$: مرز پایین رطوبت سهل‌الوصول، $\theta_{fc}$ و $\theta_{pwp}$: به‌ترتیب رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم و $MAD$: ضریب حداکثر تخلیه مجاز است.

در روش آبیاری قطره‌ای، از نوار تیپ‌های به طول ۱۰ متر با قطر ۱۶ میلی‌متر، فاصله مجاری خروج آب ۲۰ سانتی‌متر و میانگین دبی ۱/۷۵ لیتر بر ساعت، برای هر ردیف کشت استفاده شد. در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، از لوله‌های قطره‌چکان‌دار به طول ۱۰ متر با قطر ۱۶ میلی‌متر، فاصله مجاری خروج آب ۲۰ سانتی‌متر و میانگین دبی ۱/۸۵ لیتر در ساعت، در عمق ۲۰ سانتی‌متری زیر خاک برای هر ردیف کشت استفاده شد. اندازه‌گیری و کنترل مقدار آب آبیاری در هر تیمار توسط شیرهای قطع و وصل جریان و کنتور حجمی که روی لوله‌های پلی‌اتیلن انتقال آب تعبیه شده بود، انجام شد.

در مهرماه، نمونه‌گیری از بوته گیاه انجام شد. به صورتی که از هر کرت آزمایشی چهار بوته انتخاب و ریشه و غده‌ها از خاک بیرون آورده شد. سپس نمونه‌ها در کیسه پلاستیکی قرار گرفتند. تعیین عملکرد سیب‌زمینی در آزمایشگاه مرکز تحقیقات و با استفاده از ترازو انجام شد.

**مدل AquaCrop**

در این مدل عملکرد با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. همچنین تبخیر و تعرق به دو جز تبخیر (E) و تعرق (Tr) تفکیک می‌شود تا مصرف غیر تولیدی آب از معادلات حذف شود (رابطه ۴).

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y\left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (۳)$$

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (۴)$$

در این روابط، Yx و Ya به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ETx و ETa به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه، و Ky ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-تعرق، که در آن، Ks و Kc به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی و CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد) که توسط رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۱۴ و ۱۵].

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \quad (۵)$$

در این رابطه، CC0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) می‌باشد. با تعیین تعرق و تبخیر-تعرق، بیوماس خشک نیز طبق رابطه (۶) برآورد می‌گردد [۱۴ و ۱۵].

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}}\right] \quad (۶)$$

در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب، ETo تبخیر-تعرق گیاه مرجع و B عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد (Y) نیز با استفاده از ماده خشک تولید شده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه (۷) محاسبه می‌شود [۱۴ و ۱۵].

$$Y = B \times HI$$

در این رابطه، Y عملکرد، HI شاخص برداشت و B بیوماس خشک است.

برای واسنجی مدل AquaCrop، از داده‌های برداشت شده از دو طرح تحقیقاتی اجرا شده در ایستگاه تحقیقاتی چهار تخته شهرکرد استفاده شد. بدین منظور، پارامترهای ورودی مدل AquaCrop آنقدر تغییر داده شدند تا نتایج مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به هم نزدیک شود. معیار نزدیکی، مقادیر آماره‌های آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، کارایی مدل (EF) و ضریب تبیین ($R^2$) بود. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۸) تا (۱۱) نشان داده شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۸)$$

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

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۰)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum(P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right)^2}{\sum(P_i - \overline{P})^2 \sum(O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۱)$$

در روابط فوق $P_i$ مقدار برآورد شده ، $O_i$ مقدار اندازه‌گیری شده، $\bar{P}$ میانگین مقادیر برآورد شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و $n$ تعداد داده‌ها می‌باشد. پارامترهای ورودی مدل AquaCrop پس از واسنجی در جدول (۲) نشان داده شده است. سپس، از مدل واسنجی‌شده AquaCrop برای شبیه‌سازی سه سناریوی تأمین آب (I90: تأمین ۹۰ درصد نیاز آبی، I55: تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی و I45: تأمین ۴۵ درصد نیاز آبی) تحت سه روش آبیاری (S: قطره‌ای، Su: قطره‌ای زیرسطحی و F: جویچه‌ای) استفاده شد.

جدول (۲): مقادیر عوامل گیاهی مورد استفاده در مدل AquaCrop

| توضیح عامل | مقدار | واحد | توضیح |
|---|---|---|---|
| دمای پایه | ۲ | درجه‌سانتی‌گراد | پیش‌فرض |
| دمای بالا | ۲۶ | درجه سانتی‌گراد | پیش‌فرض |
| تراکم کشت | ۴۰۰۰۰ | گیاه در هکتار | اندازه‌گیری |
| ضریب رشد کانوپی | ۱۸/۹ | درصد روز | پیش‌فرض |
| پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی | ۱۵ | سانتی‌متر مربع | پیش‌فرض |
| مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی | ۱۵ | روز | واسنجی |
| مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی | ۴۶ | روز | واسنجی |
| مدت زمان کاشت تا دوره پیری | ۷۶ | روز | واسنجی |
| مدت زمان کاشت تا برداشت محصول | ۹۵ | روز | واسنجی |
| عمق مؤثر ریشه | ۱/۰ | متر | واسنجی |
| بهره‌وری آب نرمال شده | ۱۸ | گرم بر متر مربع | واسنجی |
| پوشش گیاهی اولیه | ۰/۵ | درصد | واسنجی |
| بیشینه رشد کانوپی | ۹۰ | درصد | واسنجی |
| حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه | ۰/۵۵ | - | واسنجی |
| حدپایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه | ۰/۲۵ | - | واسنجی |
| ضریب کاهش پوشش | ۱/۵ | درصد روز | واسنجی |
| حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق | ۱/۱ | درصد بر روز | پیش‌فرض |
| ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها | ۰/۵۵ | - | واسنجی |
| ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری | ۰/۶۵ | - | واسنجی |

## شاخص‌های آب مجازی

برای ارزیابی تجارت آب مجازی، شاخص‌های آب مجازی (رابطه ۱۲)، بهره‌وری آب (رابطه ۱۳)، آب مجازی وارد یا صادر شده (رابطه ۱۴) و شاخص شدت مصرف آب (رابطه ۱۵) مورد استفاده قرار گرفتند. این شاخص‌ها برای مقدار متعارف مصرف آب در استان چهارمحال و بختیاری برای تولید سیب‌زمینی، تیمارهای آزمایشی (۱۰۰، ۸۰ و ۶۵ درصد تأمین نیاز آبی) و تیمارهای شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop (۹۰، ۵۵ و ۴۵ درصد تأمین نیاز آبی) محاسبه شدند.

مقدار آب مجازی برای هر تیمار براساس رابطه (۱۲) محاسبه شد.

$$VWCc = \frac{CWRc}{Tpc} \qquad (۱۲)$$

در این رابطه، VWCc میزان آب مجازی محصول کشاورزی (مترمکعب بر کیلوگرم)، CWRc میزان نیاز آبی گیاه زراعی مورد مطالعه (مترمکعب) و TPc متوسط عملکرد گیاه زراعی (کیلوگرم در سال) است. بهره‌وری آب برای هر تیمار (WPc) با میزان آب مجازی رابطه معکوس دارد و براساس رابطه (۱۳) محاسبه شد.

$$WPc = \frac{1}{VWCc} \qquad (۱۳)$$

میزان آب مجازی مصرف شده برای محصول سیب‌زمینی، از حاصل ضرب مقدار کمی سیب‌زمینی تولید شده در میزان آب مجازی آن به صورت زیر محاسبه شد.

$$NVWI = M \times VWCc \qquad (۱۴)$$

که در این رابطه، NVWI میزان آب مجازی مصرف شده (مترمکعب)، M مقدار محصول تولید شده در استان

چهارمحال و بختیاری (کیلوگرم) و VWCc مقدار آب مجازی محصول کشاورزی مورد نظر (مترمکعب بر کیلوگرم) است. شاخص شدت مصرف آب در بخش کشاورزی استان چهارمحال و بختیاری برای تولید سیب‌زمینی به صورت رابطه (۱۵) محاسبه شد.

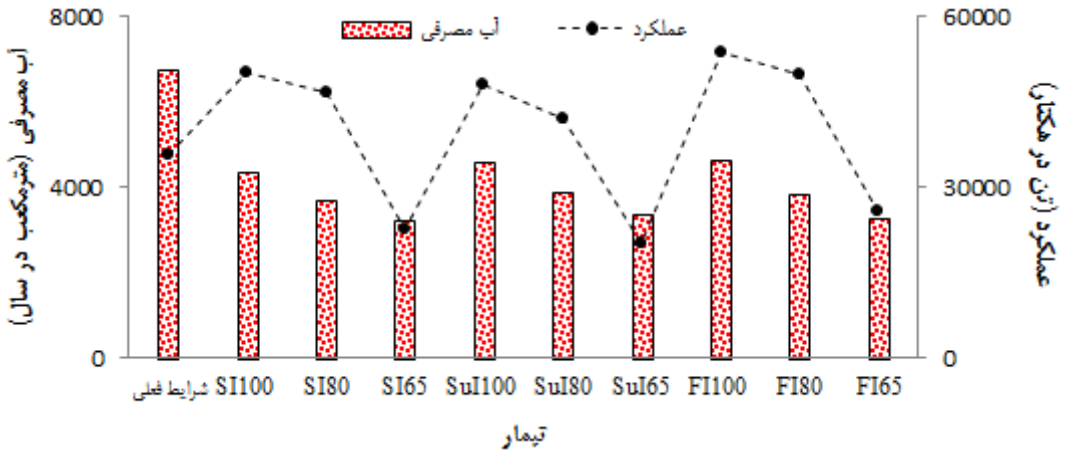
$$WI = \frac{AWU}{TWU} \qquad (۱۵)$$

در این رابطه، WI شاخص شدت مصرف آب (-)، AWU مصرف آب در برای تولید سیب‌زمینی (مترمکعب) و TWU کل منابع آب موجود در استان چهارمحال و بختیاری (مترمکعب) است.

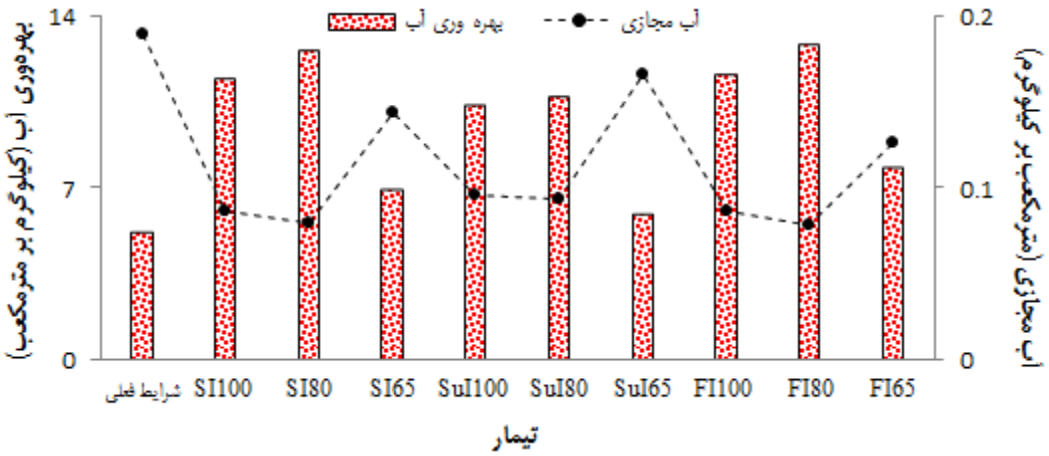
## نتایج و بحث

میزان آب مصرفی برای زراعت سیب‌زمینی در شرایط فعلی استان چهارمحال و بختیاری حدود ۶۷۷۰ مترمکعب در سال برای هر هکتار است (بی‌نام، ۱۳۹۹). در آزمایش‌های مزرعه‌ای که در پژوهش حاضر انجام شد، میزان آب کمتری برای تولید سیب‌زمینی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲). این کاهش به طور متوسط در روش‌های قطره‌ای، قطره‌ای زیرسطحی و جویچه‌ای به ترتیب ۴۴، ۴۱ و ۴۲ درصد بود. البته اعمال استراتژی کم‌آبیاری در هر سه روش آبیاری سبب کاهش بیشتر مصرف آب شد به طوری که حدود ۵۱ درصد کاهش مصرف آب در اعمال سناریوی I65 مشاهده گردید. با وجود بالا بودن مصرف آب در وضعیت فعلی استان چهارمحال و بختیاری، عملکرد سیب‌زمینی حدود ۳۵ تن در هکتار بود (بی‌نام، ۱۳۹۹). عملکرد سیب‌زمینی در مزارع آزمایشی برای سناریوی I100 حدود ۵۰ تن تعیین شد. مقایسه روش‌های آبیاری نشان داد که بیشترین عملکرد در روش آبیاری جویچه‌ای (۵۳ تن در هکتار) و کمترین عملکرد در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (۴۸/۱ تن در هکتار) به دست آمد. با اعمال تیمارهای کم‌آبیاری I80 و I65، متوسط عملکرد برای هر سه روش آبیاری به ترتیب برابر با ۴۶ و ۲۲/۸ تن در هکتار تعیین شد.

براساس سند بهره‌وری آب استان چهارمحال و بختیاری (بی‌نام، ۱۳۹۹)، بهره‌وری آب سیب‌زمینی در شرایط فعلی استان برابر با ۵/۲ کیلوگرم بر مترمکعب است (شکل ۳). در واقع، در شرایط فعلی، برای تولید هر کیلو سیب‌زمینی حدود ۰/۱۹ مترمکعب آب مصرف می‌شود. بهره‌وری آب برای روش‌های آبیاری قطره‌ای، قطره‌ای زیرسطحی و جویچه‌ای در مزارع آزمایشی در سناریوی I100 به ترتیب ۱۱۸، ۹۷ و ۱۲۰ درصد بیشتر از شرایط فعلی بود. از این رو، مقادیر آب مجازی برای این شرایط به ترتیب ۵۴، ۴۹ و ۵۴ درصد کمتر از شرایط فعلی محاسبه شد. اعمال سناریوی I80 سبب کاهش آب مجازی در تیمارهای مذکور به میزان ۵۸، ۵۰ و ۵۸ درصد نسبت به وضعیت فعلی گردید. آب مجازی برای سناریوی I65 به ترتیب برابر با ۲۴، ۱۲ و ۳۳ درصد کمتر از وضعیت فعلی بود.

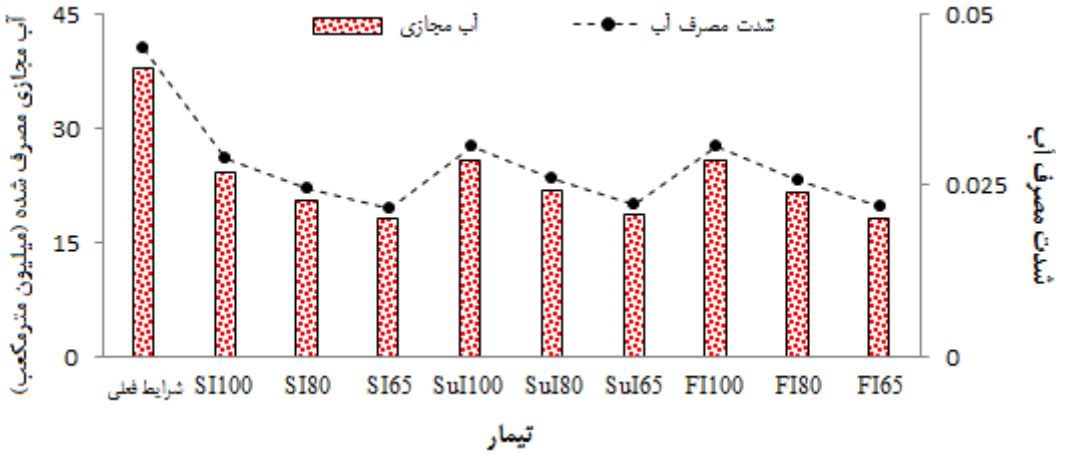


شکل (۲): میزان آب مصرفی و عملکرد برای شرایط فعلی و تیمارهای آبیاری مورد مطالعه




شکل (۳): میزان بهره‌وری آب و آب مجازی برای شرایط فعلی و تیمارهای آبیاری مورد مطالعه

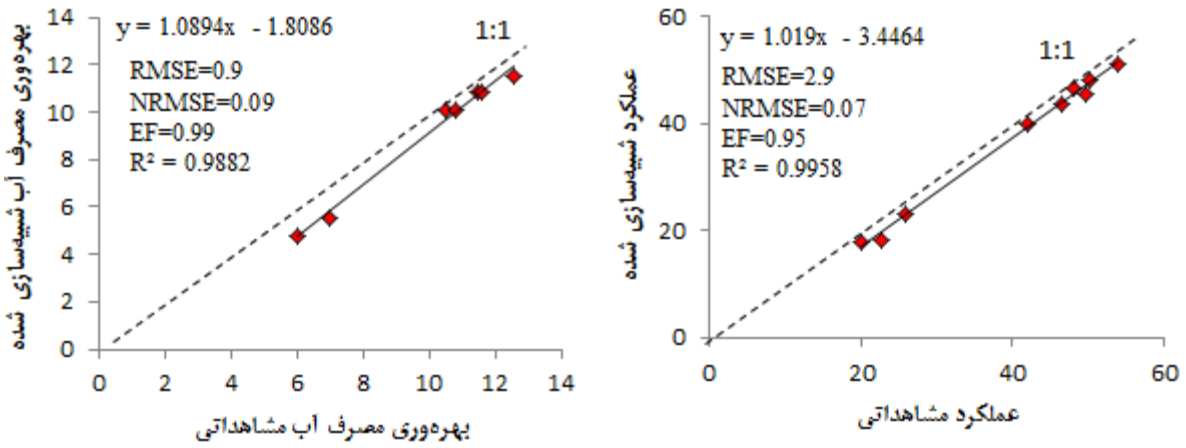
آب مجازی مصرف شده برای شرایط فعلی در استان چهارمحال و بختیاری حدود ۳۸/۱ میلیون مترمکعب است (شکل ۴). مقدار این شاخص در سناریوی I100 به طور متوسط برابر با ۲۵/۴ میلیون مترمکعب به دست آمد. این نتایج بیانگر این است که تلفات آبیاری و بیش‌آبیاری در مزارع سیب‌زمینی در این استان وجود دارد. علت آن سنتی بودن آبیاری در بسیاری از مزارع، عدم توجه به شرایط منطقه برای طراحی و اجرای سیستم‌های آبیاری و شتابزده عمل کردن در گسترش سیستم‌های آبیاری نوین در این استان بوده است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۵). همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، در همه سیستم‌های آبیاری مورد مطالعه، با اعمال کم‌آبیاری میزان آب مجازی مصرف شده کاهش یافت. لیکن روند کاهش آب مجازی مصرف شده در سیستم آبیاری قطره‌ای کمتر از دو روش آبیاری دیگر بود. شدت مصرف آب برای وضعیت فعلی حدود ۰/۰۴۵ بود. این مقدار برای آبیاری قطره‌ای، قطره‌ای زیرسطحی و جویچه‌ای در سناریوی I100 به ترتیب ۳۶، ۳۲ و ۳۲ درصد نسبت به وضعیت فعلی کاهش یافت. در سناریوهای I80 و I65، شدت مصرف آب، به طور متوسط برای همه سیستم‌های آبیاری به ترتیب ۴۴ و ۵۱ درصد کمتر از وضعیت فعلی بود. گرچه در تیمار I65 شدت مصرف آب کاهش یافت لیکن به دلیل کاهش شدید عملکرد سیب‌زمینی در این تیمار، بهره‌وری آب نیز کمتر از دو سناریوی I100 و I80 بود. علت آن ریشه‌های کم‌عمق این گیاه است که سبب می‌شود نسبت به تنش آبی بسیار حساس باشد (حاجی‌برات و همکاران، ۱۳۹۹). از این رو، تعیین بهترین سناریوی آبیاری براساس آب مجازی باید با در نظر گرفتن تغییرات نسبت عملکرد به تغییرات آب مصرفی باشد (Tourneux et al., 2003). بنابراین میزان آب مجازی سناریوی I65 در تولید سیب‌زمینی نسبت به دو سناریوی I100 و I80 بیشتر بود. همین عامل سبب شد تا تغییرات آب مجازی مصرف شده در سناریوی I65 رشد قابل قبولی نسبت به I80 نداشت. در واقع نسبت تغییرات آب مجازی مصرف شده در سناریوی I80 نسبت به I100 حدود ۱۰ درصد کاهش داشت در حالی که این تغییرات برای سناریوی I65، با وجود ۳۵ درصد کاهش میزان آب مصرفی نسبت به I100، برابر با ۱۸ درصد بود.




**شکل (۴): میزان آب مجازی مصرف شده و شدت مصرف آب برای شرایط فعلی و تیمارهای آبیاری مورد مطالعه**

نتایج واسنجی مدل AquaCrop در شکل (۵) نشان داده شده است. براساس واسنجی مدل AquaCrop، خطای این مدل ۲/۹ تن در هکتار به دست آمد که نسبت به متوسط عملکرد سیب‌زمینی قابل قبول بود. براساس آماره NRMSE، دقت مدل AquaCrop در دسته عالی قرار داشت. در تحقیقات سایر محققان مقدار این آماره تا ۰/۱۲ نیز گزارش شده است (جوزی و همکاران، ۱۳۹۹). کارایی این مدل گیاهی نیز قابل قبول بود. آماره $R^2$ نشان داد که همبستگی خوبی بین مقادیر عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود داشت. بنابراین مدل AquaCrop توانایی مناسبی برای تبیین تغییرات عملکرد در شرایط مختلف آبیاری را داشت. این نتایج با مشاهدات اکثر محققان در خصوص ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی سیب‌زمینی تحت شرایط مختلف مدیریت زراعی و آبیاری مطابقت داشت (انصاری و همکاران، ۱۳۹۸؛ ایزدی و همکاران، ۱۳۹۸؛ جوزی و همکاران، ۱۳۹۹). این محققان نیز گزارش کردند که آماره $R^2$ بین ۰/۴۹ تا ۰/۸۷ متغیر بود. مقایسه نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر نشان داد که همبستگی نتایج در شرایط آزمایش در حد قابل قبول بود.

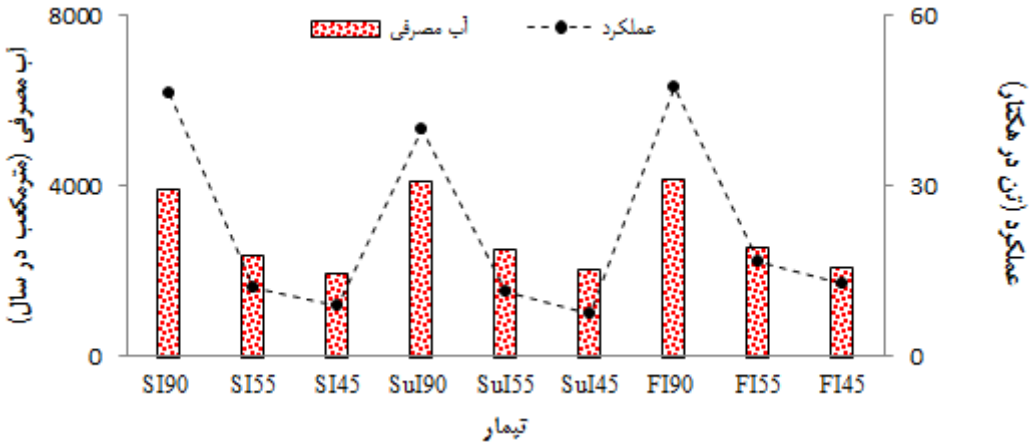
این نتایج برای پارامتر بهره‌وری آب نیز قابل قبول بود. براساس آماره NRMSE این مدل برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب دارای دقت عالی (<۰/۱) بود. مقدار RSME نیز نشان داد که خطای این مدل برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب ۰/۹ کیلوگرم بر مترمکعب بود که با توجه به دامنه تغییرات این پارامتر در شکل (۳)، مقداری قابل قبول بود. مقدار آماره EF نیز مشابه عملکرد بود.




**شکل (۵): مقایسه عملکرد (تن بر هکتار) و بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی**

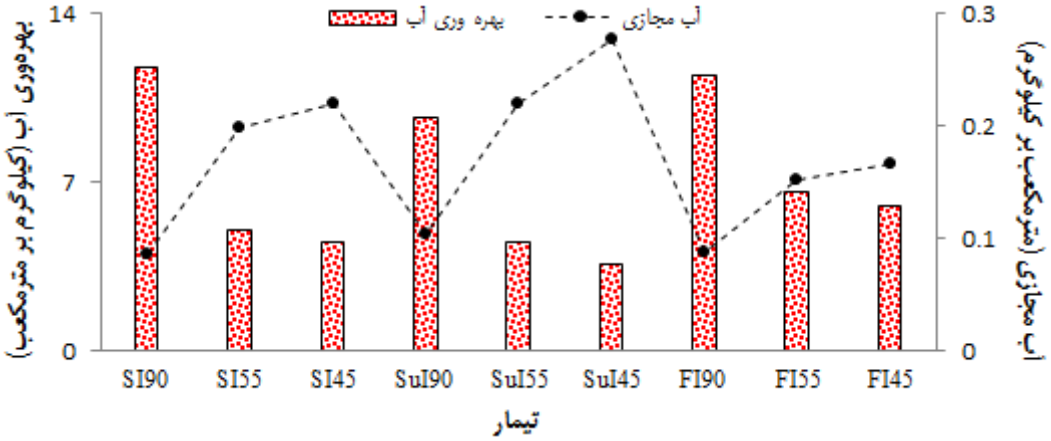
سناریوهای آبیاری شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop نشان داد عملکرد به دست آمده برای دو سناریوی I90 و I55 تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشت (شکل ۶). تفاوت عملکرد بین دو سناریوی I90 و I80 در سه روش آبیاری قطره‌ای، قطره‌ای زیرسطحی و جویچه‌ای به ترتیب ۰/۴، ۴/۷ و ۴/۶ درصد بود. در حالی که اختلاف مقدار آب بین این دو سناریو به ترتیب ۵/۹، ۵/۷ و ۷/۲ درصد بود. مقایسه دو سناریوی I65 و I55 نیز نشان داد که کاهش عملکرد در روش‌های آبیاری قطره‌ای، قطره‌ای زیرسطحی و جویچه‌ای به ترتیب ۴۶، ۴۲ و ۳۵ درصد بود.

میزان عمکرد سیب‌زمینی در سناریوی I45 در هر سه روش آبیاری کمتر از ۱۳ تن در هکتار بود که نسبت به عملکرد سیب‌زمینی در سناریوی I100 مقدار بسیار پایینی است. اختلاف عملکرد بین دو سناریوی I45 و I90 در روش‌های آبیاری قطره‌ای، قطره‌ای زیرسطحی و جویچه‌ای به ترتیب ۸۰، ۸۱ و ۷۳ بود. از این رو، در صورت اعمال کم‌آبیاری با سناریوی عدم محدودیت زمین زراعی، کاهش مقدار آب آبیاری در سناریوی I45 نمی‌تواند کاهش عملکرد را جبران کند.



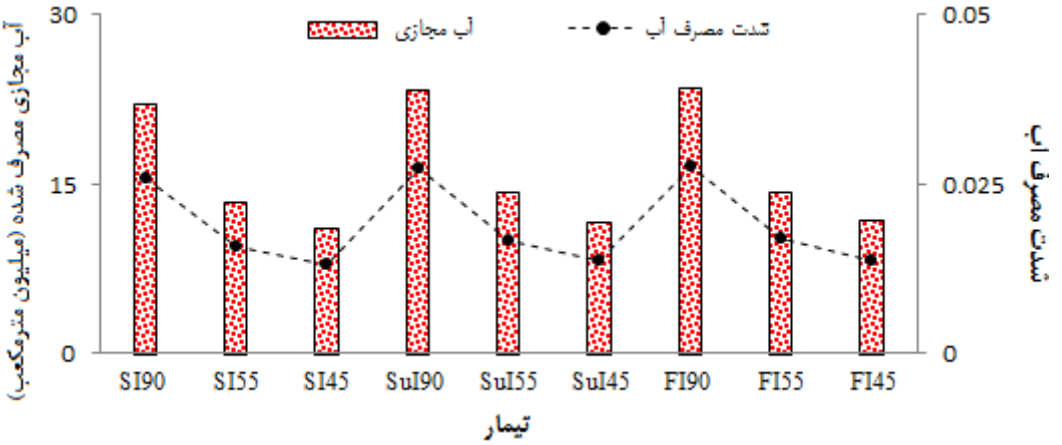

**شکل (۶): میزان آب مصرفی و عملکرد برای سناریوهای شبیه‌سازی با مدل AquaCrop**

مقادیر بهره‌وری و آب مجازی برای سناریوهای I90، I55 و I45 در شکل (۷) نشان داده شده است. مقایسه این نتایج با شکل (۳) نشان داد که مقادیر به دست آمد در سناریوی I90 به I80 بسیار نزدیک بود (شکل ۷). اثرات کم‌آبیاری بر آب مجازی سیب‌زمینی از سناریوی I65 به صورت محسوس تغییر کرد. متوسط بهره‌وری آب در سناریوی I55 برای سه روش آبیاری قطره‌ای، قطره‌ای زیرسطحی و جویچه‌ای به ترتیب ۵/۰، ۴/۵ و ۶/۶ کیلوگرم بر مترمکعب بود. مقایسه این نتایج با تیمار I65 نشان داد که متوسط بهره‌وری آب برای روش‌های آبیاری ذکر شده به ترتیب ۲۷، ۲۴ و ۱۶ درصد کاهش یافت. در حالی که اختلاف بهره‌وری آب بین دو سناریوی I55 و I45 به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۸ درصد بود. بنابراین روش آبیاری جویچه‌ای اثرپذیری کمتری نسبت به سایر روش‌های آبیاری در تغییرات بهره‌وری آب داشت. بیشترین اثرپذیری در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مشاهده شد. از این رو، علاوه بر اطلاع از میزان آب آبیاری، در اعمال کم‌آبیاری لازم است به روش آبیاری نیز توجه شود. این مهم توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (خیری‌شلمزاری و همکاران، ۱۳۹۹؛ بناکار و همکاران، ۱۳۹۹). براساس نتایج به دست آمده، اختلاف چندانی در مقدار آب مجازی بین روش‌های آبیاری در سناریوی I90 مشاهده نشد. روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بیشترین میزان آب مجازی را در سناریوهای I55 و I45 داشت. کمترین میزان آب مجازی نیز به آبیاری جویچه‌ای مربوط بود. علت آن بهره‌وری آب بیشتر به دلیل عملکرد بالاتر در روش آبیاری جویچه‌ای بود.



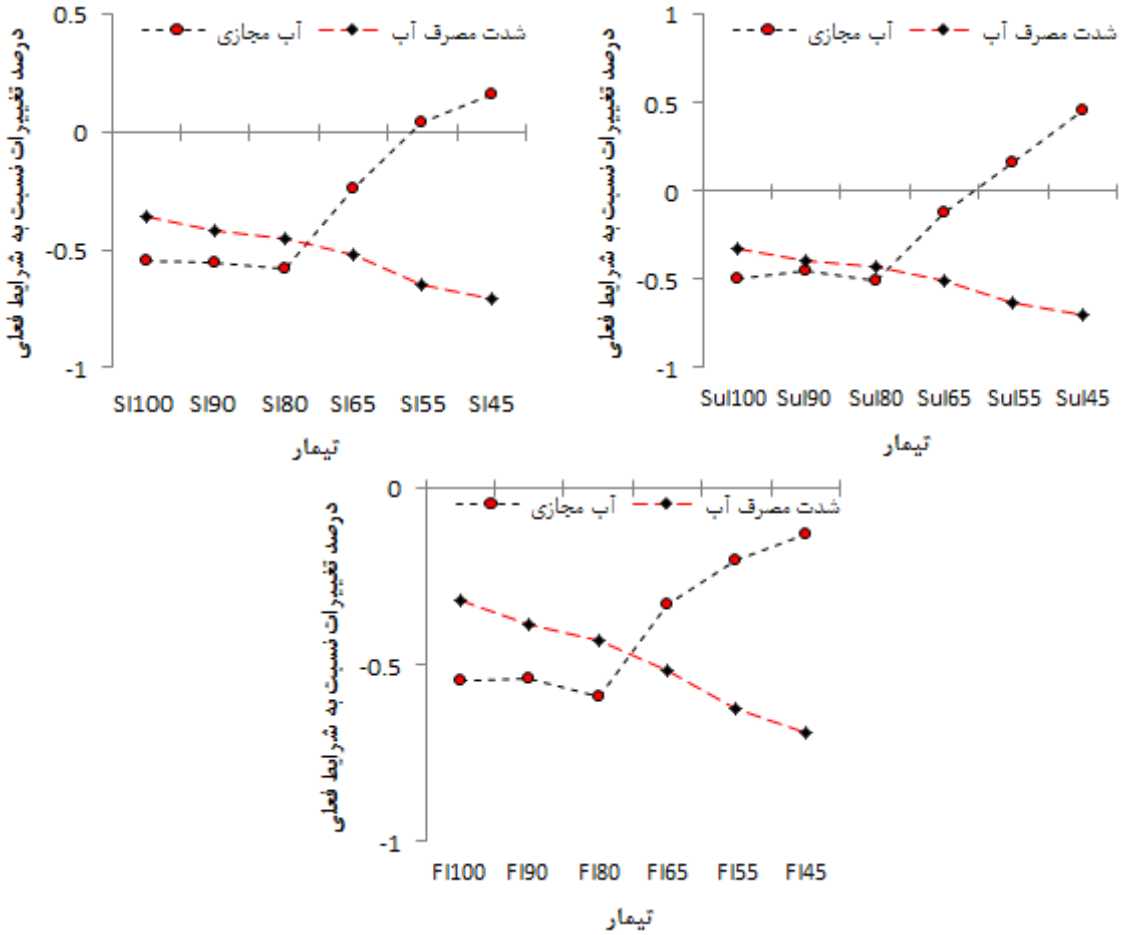

**شکل (۷): میزان بهره‌وری آب و آب مجازی برای سناریوهای شبیه‌سازی با مدل AquaCrop**

در هر سه روش آبیاری، میزان آب مجازی مصرف شده و شدت مصرف آب در سناریوی I90 به تیمار I80 بسیار نزدیک بود (شکل ۸). لیکن با کاهش مقدار آب مصرفی به ۵۵ درصد نیاز آبی سیب‌زمینی، آب مجازی مصرف شده به طور متوسط ۳۸ درصد نسبت به I90 کاهش داشت. در حالی که تفاوت آب مجازی مصرف شده بین دو تیمار I55 و I45 به طور متوسط ۱۸ درصد بود. اختلاف شدت مصرف آب بین دو سناریوی I90 و I55 به طور متوسط ۳۸/۸ درصد و بین دو سناریوی I55 و I45 برابر با ۱۸/۱ درصد بود. اختلاف شدت مصرف آب در دو سناریوی I65 و I55 برابر با ۲۶/۲ درصد به دست آمد.




**شکل (۸): میزان آب مجازی مصرف شده و شدت مصرف آب برای سناریوهای شبیه‌سازی با مدل AquaCrop**

در روش آبیاری قطره‌ای، تا اعمال سناریوی I80 میزان آب مجازی نسبت به وضعیت فعلی کاهش یافت (شکل ۹). با اعمال سناریوی I65 میزان آب مجازی روند صعودی داشت ولی نسبت به وضعیت فعلی کمتر بود. میزان آب مجازی در دو سناریوی I55 و I45 نسبت به وضعیت فعلی افزایش یافت. علت آن کاهش شدید عملکرد در این دو سناریو بود. با این وجود شدت مصرف آب با کاهش آب آبیاری روند نزولی داشت. این شرایط در روش‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و جویچه‌ای نیز مشاهده شد. با این تفاوت که مقدار آب مجازی در کم‌آبیاری‌های کمتر از ۵۵ درصد در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای تغییرات بیشتری نسبت به وضعیت فعلی داشت.




**شکل (۹): تغییرات آب مجازی و شدت مصرف آب برای مقادیر مختلف آب آبیاری نسبت به شرایط فعلی**

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق شرایط فعلی آبیاری در مزارع سیب‌زمینی در استان چهارمحال و بختیاری با سناریوهای مختلف تأمین آب آبیاری مقایسه شد. نتایج نشان داد که در شرایط فعلی میزان آب بیشتری نسبت به نیاز آبی سیب‌زمینی مصرف می‌شود و عملکرد کمتری حاصل می‌گردد. میزان آب آبیاری در مزارع سیب‌زمینی شهرکرد حدود ۶۷۷۰ مترمکعب در سال برای هر هکتار است. مقایسه آب مجازی در سناریوی I100 با وضعیت فعلی نشان داد که به طور متوسط ۵۲ درصد آب مجازی بیشتری برای تولید سیب‌زمینی در مزارع این استان مصرف می‌شود. شدت مصرف آب برای تولید سیب‌زمینی در این استان در شرایط فعلی ۰/۰۴۴ درصد است که با اعمال سناریوهای کم‌آبیاری I90 الی I45 شدت مصرف آب بین ۳۲ الی ۷۱ درصد کاهش داشت. گرچه اعمال این سناریوهای کم‌آبیاری سبب تغییرات مقدار آب مجازی بین ۵۴ تا ۱۶ درصد در روش آبیاری قطره‌ای، ۴۹ تا ۴۵ درصد در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و ۵۴ تا ۱۲ درصد در روش آبیاری جویچه‌ای شد. در واقع کم‌آبیاری میزان مصرف آب را کمتر کرد لیکن عملکرد نیز تحت تأثیر آن قرار گرفت. بنابراین با در نظر گرفتن کلیه نتایج، سناریوی I80 به عنوان تیمار مناسب پیشنهاد می‌شود. در این سناریو، آب مجازی و شدت مصرف آب به طور متوسط ۵۵ و ۴۳ درصد نسبت به شرایط فعلی کاهش داشتند. همچنین عملکرد در این تیمار فقط ۷ درصد نسبت به تیمار I100 کاهش داشت.

## منابع

ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، احمدی، م.، اگدرنژاد، ا. و خاشعی‌سیوکی، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و مصرف زئولیت. مجله حفاظت منابع آب و خاک. ۸(۱): ۱۳۱-۱۱۷.

ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، اگدرنژاد، ا.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های WOFOST، AquaCrop و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۳): ۷۲۶-۷۱۵.

احسانی، م.، خالدی، ه.، برقی، ی. ۱۳۸۷. مقدمه‌ای بر آب مجازی. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. تهران.

احمدی، م.، قنبرپوری، م. ع. و اگدرنژاد، ا. ۱۴۰۰. مقدار آب کاربردی گندم با استفاده از تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل AquaCrop. مجله مدیریت آب در کشاورزی. ۸(۱): ۳۰-۱۵.

اگدرنژاد، ا.، ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۷. برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین. مجله مدیریت آب در کشاورزی. ۵(۲): ۶۴-۵۳.

انصاری، م، ع.، اگدرنژاد، ا. و ابراهیمی پاک، ن، ع. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی (Solanum tuberosum L.) تحت شرایط آبیاری با استفاده از دو مدل AquaCrop و Cropsyst. نشریه اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی، ۱۳(۲): ۲۸۷-۳۰۴.

ایزدی، ز.، نصرالهی، ع. ح.، حقیقتی بروجنی، ب. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد محصول سیب‌زمینی با استفاده از مدل رشد گیاهی AquaCrop. مهندسی آبیاری و آب ایران. ۹(۳۵): ۱۵۸-۱۴۳.

ایزدی، ز.، نصرالهی، ع. ح.، حقیقی، ب. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد سیب‌زمینی تحت تنش آبی. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۹(۱): ۱۸۰-۱۷۱.

بناکار، م. ح.، چراغی، س. ا. م.، کریمی، م.، رحیمیان، م. ح. ۱۳۹۹. مقایسه تولید علوفه پنج گونه گیاه شورپسند با استفاده از آب شور در سه روش مختلف آبیاری. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۴(۱): ۴۹-۲۹.

بی‌نام، ۱۳۹۹. برنامه ارتقاء بهره‌وری آب کشاورزی استان چهارمحال و بختیاری. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری. ۲۵ صفحه.

جوزی، م.، قربانی، ز.، قدمی‌فیروزآبادی، ع.، سپهری، ن.، زارع ابیانه، ح. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل AquaCrop تحت مدیریت کم آبیاری کلون های جدید سیب زمینی در همدان. آبیاری و زهکشی. ۱۴(۱): ۲۴۰-۲۳۰.

حاجی‌برات، ز.، سعیدی، ع.، موسی‌پور گرجی، ا.، غفاری، م. و زین‌العابدینی، م. ۱۳۹۹. ارزیابی شاخص‌های تحمل به خشکی گیاه سیب‌زمینی در پاسخ به استرس کم‌آبیاری. فصلنامه پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی. ۱۲(۳۵): ۱۱۲-۱۰۲.

حقیقتی بروجنی، ب.، برومند نسب، س. و ناصری، ع. ع. ۱۳۹۴. تأثیر مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری در روش آبیاری جویچه‌ای و قطره‌ای نواری بر عملکرد سیب‌زمینی و بهره‌وری آب. پژوهش آب در کشاورزی. ۲۹(۲): ۱۹۳-۱۸۱.

خیری شلمزاری، ک.، برومندنسب، س.، سلطانی محمدی، ا. و حقیقتی بروجنی، ب. ۱۳۹۹. اثر مدیریت‌های آبیاری در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی بر عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴(۱): ۳۲۰-۳۱۰.

عباسی، ف.، ناصری، ع.، سهراب، ف.، باغانی، ن.، عباسی، ن.، اکبری، م. ۱۳۹۵. ارتقا بهره‌وری مصرف آب. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. ۶۸ صفحه.

علیزاده، ا.، خلیلی، ن. ۱۳۸۸. بررسی بهره‌وری آب-انرژی در زراعت چغندرقند (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی)، آبیاری و زهکشی. ۳(۲): ۱۳۶-۱۲۳.

موسوی، س. ن.، اکبری، س. م.، سلطانی، غ.، زارع مهرجردی، م. ۱۳۸۸. آب مجازی؛ راهکاری نوین در جهت مقابله با بحران آب. همایش ملی مدیریت بحران آب. دانشگاه آزاد اسلامی.

Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y. 2004. Water footprints of nations, Unesco-IHE Institute for Water Education.

Chen, G. Q. & Li, J. S. 2015. Virtual water assessment for Macao, China: highlighting the role of external trade. Journal of Cleaner Production. 93: 308-317.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2018. FAOSTAT statistical database. FAO, Rome. Available from internet: http://www.fao.org.

Fraiture, C. de, Cai, X., Amarasinghe, U., Rosegrant, M., Molden, D. 2004. Does International Cereal rade Save Water? The Impact of Virtual Water Trade on Global Water Use. Comprehensive Assessment Research Report 4, Colombo, Sri Lanka, Comprehensive Assessment Secretariat.

Jiang, W. & Marggraf, R. 2015. Bilateral virtual water trade in agricultural products: a case study of Germany and China. Water International. 40 (3): 483-498.

Masud, M. B., Wada, Y., Goss, G. & Faramarzi, M. 2019. Global implications of regional grain production through virtual water trade. Science of the Total Environment. 659: 807-820.

Tourneux, C., Devaux, A., Camacho, M., Mamani, P. and Ledent, J. F. 2003. Effects of water shortage on six potato genotypes in the highlands of Bolivia (I): Morphological Parameters, Growth and Yield. 23(2): 169-179.