تحقیقات مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی /دوره ۲۵/شماره ۹۶ /پاییز ۱۴۰۳/صفحه ۲۶ - ۱

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی اثربخشی راهکارهای مدیریتی کاهش مصرف آب کشاورزی با استفاده از مدل AquaCrop (مطالعهٔ موردی: دشت هشتگرد)

امید رجا[1*]، سجاد ویسی[2]، علی برزگر[3]

[1*] محقق، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

[2و3] کارشناس منابع آب، شرکت آب منطقه‌ای البرز،کرج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/ ۲۲ تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۸/۱۵

چکیده

استفادهٔ مناسب از منابع آب در بخش کشاورزی نیازمند آگاهی از راهکارهای مدیریتی بهینه و کارآمد آب است. مدیریت وضعیت کنونی دشت هشتگرد در استان البرز حاصل عملکرد مجموعه‌ای از عوامل انسانی و طبیعی طی دهه‌های گذشته است و احیا و تعادل‌بخشی آب زیرزمینی دشت در اولویت قرار دارد. بر اساس آمار درازمدت سطح آب زیرزمینی (۹۹-۱۳۷۰) میزان کسری مخزن در هر سال به طور متوسط برابر با ۱۶/۸۲ میلیون مترمکعب (۶/۲ درصد) است. در این مطالعه از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات غالب زراعی و مقدار آب مصرفی در منطقهٔ هشتگرد استفاده شد. راهکارهای عملی و کم‌هزینه نیز برای صرفه‌جویی در مصرف آب با حداقل هزینه مانندبهبود راندمان آبیاری براساس وضع موجود، تغییر تاریخ کاشت و الگوهای مختلف کم‌آبیاری بررسی شد. واسنجی مدل AquaCrop برای شرایط منطقه‌ای و بر اساس عملکرد محصولات زراعی نشان داد این مدل به‌خوبی توانسته است عملکرد محصولات زراعی موردمطالعه را با کم‌ترین خطای نسبی (RE) برای گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه برای دشت هشتگرد در مرحلهٔ واسنجی مدل شبیه‌سازی کند. بررسی‌ها نشان داد با توجه به سطوح ارتقای راندمان در مناطق مختلف و برای کشت‌های مختلف به ترتیب منجر به صرفه‌جویی به میزان ۱۷/۷ میلیون مترمکعب (۵/۹ درصد) در مصرف آب تخصیصی خواهد شد که می‌تواند در شرائط کم‌آبی در تامین آب مورد نیاز راسطح بیشتری از اراضی بدون کاهش عملکرد فراهم کند. نتایج تحقیق نشان داد با انتخاب تاریخ کاشت بهینه (باتوجه به دامنهٔ تاریخ کشت متداول در منطقه) برای محصولات غالب محدوده دشت هشتگرد نیاز ناخالص آبیاری به میزان ۲/٤ میلیون مترمکعب در مصرف آب (۰/۸ درصد) کاهش می‌یابد. گزینهٔ دیگر مدیریتی، کم‌آبیاری تحت الگوهای مدیریتی مختلف برای محصولات غالب زراعی، نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری و نیز با افزایش دورهای آبیاری، صرفه‌جویی قابل توجهی در میزان آب مورد نیاز قابل دستیابی است. با کم‌آبیاری می‌توان به میزان ۱۹/۳ میلیون مترمکعب (۶/۰ درصد) در دشت هشتگرد در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد در بسیاری از مواقع می‌توان بدون رفتن زیر بار هزینه‌های کلان برای تامین امکانات و تجهیزات مدرن، در شرایط مدیریتی برتر موجود در منطقه با اعمال سناریوهای مختلف از جمله بهبود راندمان، تغییر تاریخ کاشت و کم‌آبیاری در مصرف آب آبیاری مورد نیاز صرفه‌جویی قابل توجهی کرد. طبیعتاً سهم هر کشت در میزان صرفه‌جویی متناسب با متوسط آب مصرفی در هکتار و سطح اراضی تحت هر کشت است.

واژه‌های کلیدی: استان البرز، تاریخ کاشت بهینه، صرفه‌جویی آب، راندمان آبیاری، کم‌آبیاری

نگارنده مسئول: **Email:** omid.raja@ut.ac.ir https://doi.org/10.22092/idser.2024.367320.1595

© 2023,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مقدمه

بررسی روندهای موثر در بخش آب، خاک، کشاورزی و نتایج پیش‌بینی‌های مربوط به هر یک از روندهای کلان جهانی ارائه شده، به ویژه تغییرات اقلیمی و رقابت بر سر منابع تولید، به روشنی نشان می‌دهد دشواری‌های پیش‌روی تولید در بخش کشاورزی و تامین امنیت غذایی جوامع در بسیار نقاط دنیا در حال ظهور و در ایران کاملا محسوس و قابل تامل است. به گواه گزارش‌های علمی و پیش‌بینی‌ها، انتظار می‌رود این تغییرات تا سال ۲۰۵۰ برجسته‌تر و چالش‌برانگیزتر شوند (Esmaili Falak &Abbasi, 2024). براساس گزارش موسسهٔ بین‌المللی مدیریت آب (IWMI[1])، ایران برای حفظ وضع فعلی خود تا سال ۲۰۲۵ باید بتواند ۱۱۲ درصد به منابع آب قابل استحصال خود بیفزاید (UNESCO, 2010). از طرفی، جوامع بشری بیشتر به دلیل ناتوانی در دسترسی و حفاظت از منابع آب سالم و مطمئن در تأمین غذای خود دچار مشکل‌اند و از این رو با این شرایط نیاز به اعمال راهکارهایی مؤثر برای مدیریت بهینه و کارآمد آب به ویژه در بخش کشاورزی وجود دارد (Droogers *et al.*, 2010).

برآورد و ارزیابی دقیق نیاز آبی و آبیاری ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب است. عوامل آب و هوایی، ویژگی‌های گیاه، شرایط محیطی، مراحل فنولوژی گونه‌های گیاهی و دیگر عوامل مدیریتی در برآورد میزان نیاز آبی و آبیاری موثرند (Allen *et al.*, 1998; Parsinejad et *al.*, 2022; Li *et al.*, 2024). مدل AquaCrop آب مصرفی گیاه را بر اساس پایش رطوبت خاک در منطقهٔ ریشهٔ برآورد می‌کند و تحت سناریوهای مختلف می‌تواند عملکرد محصول، نیاز آبی گیاه و کارایی مصرف آب گیاه را در شرایط مختلف از جمله کم‌آبیاری و تغییر تاریخ کاشت شبیه‌سازی کند (Salemi *et al.*, 2011; Raja & Parsinejad, 2023). به طور کلی، نتایج مطالعات محققان نیز نشان می‌دهد مدل AquaCrop در برآورد عملکرد دانه و زیست‌توده محصولات زراعی و بررسی تأثیرات کمی آب بر عملکرد پذیرفته‌شده و ابزاری ارزشمند برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه تحت گزاره‌های مختلف شناخته‌شده است (Khorsand *et al.*, 2024; Xie *et al.*, 2023; Lu *et al.*, 2022; Eskandaripour *et al.*, 2020; Amiri *et al.*, 2018; Ramezani *et al.*, 2018; Tavakoli *et al.*, 2015; Ghorbanian Kurdabadi *et al.*, 2013). نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد در مدل شبیه‌سازی AquaCrop امکان تعریف و تأثیر شرایط مختلف کم‌آبیاری بر عملکرد محصولات مانند گندم، جو، برنج، ذرت علوفه‌ای، ذرت دانه‌ای، و چغندرقند وجود دارد و این مدل می‌تواند ابزاری کارآمد برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه و افزایش بهره‌وری آب به‌کار رود (Farahani *et al.*, 2009; Heng *et al.*, 2009; Andarzian *et al.*, 2011; Garcia-Vila *et al.*, 2009; Tavakoli *et al.*, 2015; Eskandaripour; *et al.*, 2020).

توکلی و همکاران (Tavakoli *et al.*, 2015) از داده‌های دو سالهٔ جو دیم (۱۳۸۴-۱۳۸۶) در بالادست حوضهٔ رودخانهٔ کرخه در استان لرستان برای ارزیابی دقت مدل AquaCrop در برآورد عملکرد، رطوبت خاک و درصد پوشش تاج پوشش سبز استفاده کردند و نشان دادند این مدل ابزاری مناسب برای شبیه سازی عملکرد جو در شرایط دیم و کم‌آبیاری در منطقهٔ مورد مطالعه است. نتایج مطالعات امیری و همکاران (Amiri *et al.*, 2016) برای ارزیابی توانایی مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست‌تودهٔ گندم زمستانه تحت تنش آبی، تحقیقی را در ایستگاه تحقیقات کشاورزی فارس (زرقان) در سال‌های زراعی ۸۶ - ۱۳۸۵ و ۸۷ - ۱۳۸۶ حاکی از دقت قابل قبول مدل AquaCrop در برآورد عملکرد دانه و زیست‌توده محصول است. رمضانی اعتدالی و همکاران (Ramezani Etedali *et al.*, 2016) در تحقیقی توانایی دو نسخه ۳.۱ و۵ مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری برای غلات مهم (گندم، جو و ذرت دانه‌ای) را در حوضهٔ رودخانه

[1] International Water Management Institute

شور بررسی کردند. نسخهٔ ۳.۱ تنش شوری را در AquaCrop نظر نمی‌گیرد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد نسخهٔ ۵ مدل به دلیل در نظر گرفتن تنش شوری، دقت بیشتری دارد. بنابراین پیشنهاد شده است هنگامی که منابع آب و خاک شوری بالایی دارند یا گیاه حساسیت بالاتری به شوری دارد از نسخهٔ ۵ مدل AquaCrop استفاده شود. رمضانی و همکاران (Ramezani *et al.*, 2019) توانایی مدل AquaCrop را در برآورد عملکرد در سطوح مختلف آبیاری ارزیابی کردند و نتایج آزمون‌های آماری نشان دادند که مدل AquaCrop دقت بالایی دارد. خورسند و همکاران (Khorsand *et al.*, 2024) نیز نشان دادند مدل AquaCrop به‌خوبی توانسته است میزان عملکرد و زیست تودهٔ کلزا را در شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری شبیه‌سازی کند. این پژوهشگران این مدل را ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست تودهٔ محصولات زراعی تحت سناریوهای مختلف مدیریتی معرفی کرده‌اند.

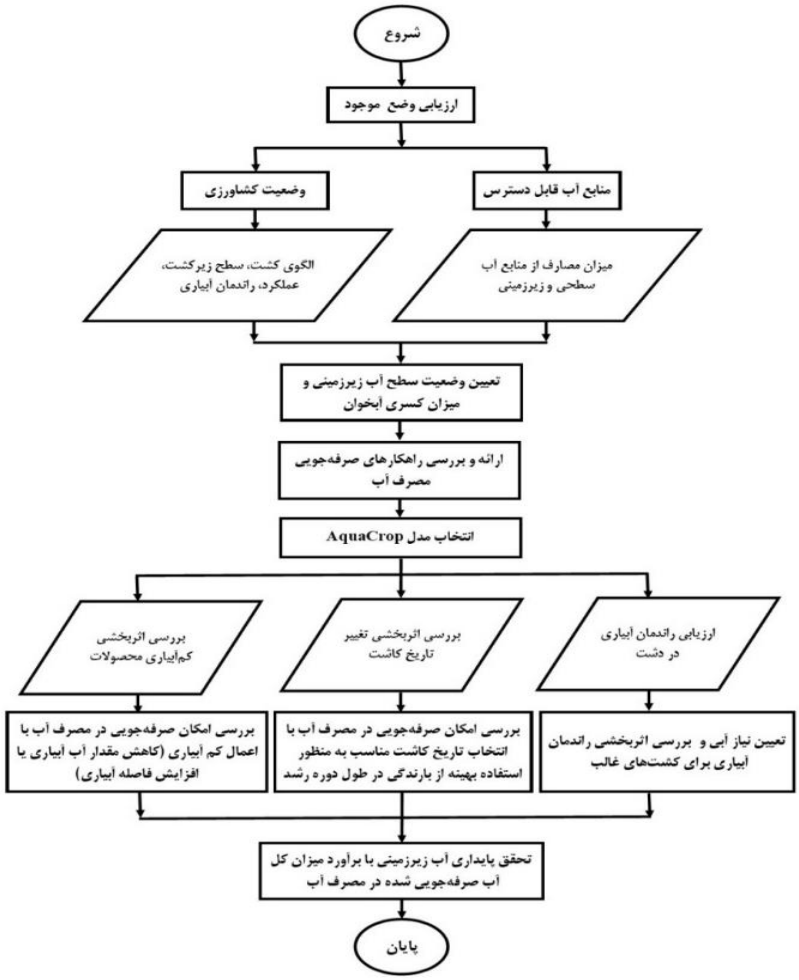
افزایش سطح زیر کشت، کاهش بارندگی‌ها، تغییر اقلیم و تداوم خشک‌سالی‌ها، برداشت بی‌رویه کشاورزان از منابع آب‌های سطحی و سفره‌های آب زیرزمینی از طریق حفرچاه‌های مجاز و غیرمجاز ازجمله مواردی است که بخش آب در استان البرز، به طور مشخص دشت هشتگرد را با چالش جدی مواجه کرده است. به‌دلیل دسترسی آسان و سادگی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در منطقه، میزان برداشت از این منابع برای استفاده‌های مختلف ازجمله کشاورزی افزایش فراوانی یافته و متأسفانه در سال‌های اخیر حتی در بعضی مناطق بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی بیشتر از تغذیه بوده است که ادامه این روند خطر نابودی منابع آب زیرزمینی را در پی خواهد داشت (Niamnsi & Mbue, 2009; Raja *et al.*, 2019).

هدف از این مطالعه، ارائهٔ راهکارهای عملی و کم‌هزینه برای صرفه‌جویی در مصرف آب در دشت هشتگرد است، راهکارهای مختلف با حداقل هزینه مانند بهبود راندمان آبیاری، تغییر تاریخ کاشت و الگوهای مختلف کم‌آبیاری. رویکرد این مطالعه، ارائهٔ راهکارهایی نیست که مستلزم تغییر سیستم آبیاری و حتی تغییر الگوی کشت باشد یا به کاهش سطح زیر کشت در منطقه بینجامد. هرچند محققان نشان داده‌اندکه یکی از دلایل پایین بودن بهره‌وری آب، کشت محصول در برخی از زمین‌ها با کلاس تناسب اراضی پایین است. این اراضی به‌دلیل داشتن محدودیت‌های زیاد (مثل بافت سبک، ناهمواری و شوری و غیره)، آب بیشتری برای آبیاری نیاز دارند. بنابراین، حذف این اراضی یکی از راه‌های موثر در جلوگیری از اتلاف آب در بخش کشاورزی است (Jafari & Abbasi, 2024). راهکارهای اتخاذ شده به گونه‌ای است که با حداقل هزینه امکان عملی کردن آن‌ها وجود دارد، بر معیشت کشاورزان تأثیر سوء ندارند و قابل اجرا هستند. سطوح الگوهای مدیریتی در اعمال و تعیین اثربخشی هر یک از راهکارهای فوق بر اساس شرایط واقعی موجود در منطقه بنا نهاده شد. به عبارت دیگر تابع هدف مطالعه صرفه‌جویی در مصرف آب یا هدف پیشگیری از برداشت مازاد از منابع آب زیرزمینی (پایداری آبخوان دشت هشتگرد) قرار داده شد. بررسی اثربخشی راهکارهای مدیریتی کاهش مصرف آب کشاورزی در نظر گرفته شده در راستای بالابردن بهره‌وری و پایداری منابع آب براساس سناریوهای مختلف بهبود راندمان آبیاری با توجه به شرایط برتر موجود در منطقه و امکان‌سنجی صرفه‌جویی در مصرف آب از طریق راهکارهای تغییر تاریخ کاشت و کم‌آبیاری با استفاده از مدل AquaCrop 6.0 است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق درابتدا وضع موجود منطقهٔ هشتگرد شامل منابع آب در دسترس (منابع آب سطحی و زیرزمینی) و وضعیت کشاورزی (شامل الگوی کشت، سطح زیر کشت، عملکرد محصولات و راندمان آبیاری) بررسی شده است. بر اساس وضعیت تراز آب زیرزمینی، میزان کسری مخزن

برآورد شد. برای بررسی و درک بهتر تأثیر سناریوهای موردنظر از مدل واسنجی شدهٔ AquaCrop استفاده شد. با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف شامل: تأثیر بهبود راندمان آبیاری بر کاهش تخصیص، تغییر تاریخ کاشت و نیز اعمال کم‌آبیاری برای محصولات غالب دشت هشتگرد با استفاده مدل AquaCrop، امکان‌سنجی صرفه‌جویی در مصرف آب با مقایسه بهره‌وری آب آبیاری بر اساس اطلاعات منطقه‌ای بررسی گردید. درنهایت، متناسب با انتخاب بهترین سناریوها، میزان آب قابل صرفه‌جویی برآورد شد تا متضمن پایداری آب زیرزمینی در درازمدت باشد. فلوچارت مراحل اجرای این مطالعه در شکل (۱) نشان داده‌شده است که در زیر به هر یک از مراحل پرداخته شده است.



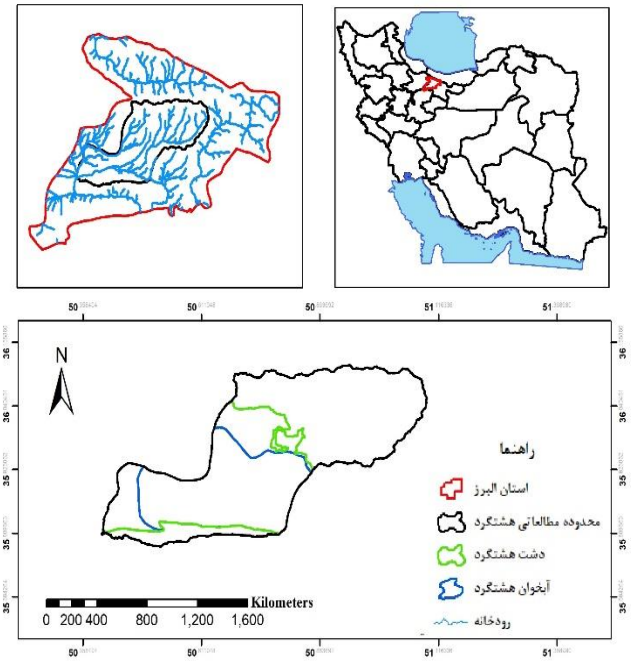
شکل ۱- فلوچارت اجرای تحقیق

Figure 1- Flowchart of the study

موقعیت محدوده مطالعه

محدودهٔ مطالعاتی هشتگرد در نیمهٔ شمالی حوضهٔ آبریز دریاچهٔ نمک و در فاصلهٔ حدود ۶۵ کیلومتری غرب تهران واقع‌شده است. موقعیت دشت هشتگرد در شکل (۲) نشان داده شده است. مساحت محدودهٔ مطالعاتی، دشت و آبخوان هشتگرد به ترتیب برابر با ۱۱۶۹/۶، ۵۹۲ و ۴۱۰/۷ کیلومترمربع است. مساحت ارتفاعات و دشت در این محدوده به ترتیب ۵۷۹ و ۵۹۲ کیلومترمربع و حداکثر و حداقل ارتفاع

به ترتیب ۴۰۵۸ و ۱۱۳۳ متر بالاتر از است (Rasaei *et al.*, 2020). وضعیت اقلیمی منطقه بر اساس روش تجربی آمبرژه (Q) و دومارتن (I) با استفاده از آمار ایستگاه هواشناسی هشتگرد نشان می‌دهد که دشت هشتگرد در اقلیم نیمه‌خشک سرد قرار می‌گیرد. علاوه بر نیمه‌خشک بودن، منطقه دارای زمستان‌های سرد طولانی و تابستان‌های نسبتاً گرم و خشک است که یکی از ویژگی‌های اقلیم خشک و سرد است. با توجه به میزان بارندگی‌ها، رطوبت نسبی در زمستان به حداکثر و در تابستان به حداقل مقدار خود می‌رسد. مطالعات محققان نیز نشان داده است اقلیم این منطقه بر اساس داده‌های هواشناسی در دورهٔ ۹۰-۱۳۶۰ در طبقه‌بندی آمبرژه خشک و سرد و در طبقه‌بندی دومارتن خشک است (Shirazi & Nateghi, 2020).



شکل ۲- موقعیت دشت هشتگرد

Figure 2- Location of Hashtgerd plain

داده‌های مورد استفاده

منابع آب سطحی و زیرزمینی

میزان مصرف آب از منابع آب سطحی در سطح دشت و آبخوان هشتگرد بر اساس آماربرداری دور سوم از آبدهی نهرها، آب‌بندان‌ها، ایستگاه‌های پمپاژ به‌دست آمد (جدول ۱). برآوردها نشان داد میزان کل مصرف آب از نهرها در محدودهٔ مطالعاتی هشتگرد (ارتفاعات و دشت) ۴۹/۹۳ میلیون مترمکعب است. از این میزان، مصرف آب در بخش ارتفاعات محدوده مطالعاتی هشتگرد به میزان ۲۱/۰۸ میلیون مترمکعب در سال آبی ۹۹-۱۳۹۸ بوده است. بر اساس انهار آغشت ۱، آغشت ۲، کردان، جلنگدار به‌طور متوسط ۲۸/۸۵ میلیون مترمکعب در سال مذکور در سطح دشت یا آبخوان در بخش کشاورزی آب مصرف‌شده است. در سطح دشت و آبخوان هیچ‌گونه مصرفی از ایستگاه‌های پمپاژ و موتورپمپ گزارش نشده است. از طریق آب‌بندان‌ها به میزان ۰/۶۲ میلیون مترمکعب در سال در بخش کشاورزی مصرف‌شده است. به‌طورکلی، میزان مصرف از آب سطحی برای کشاورزی در سطح دشت یا آبخوان هشتگرد ۲۹/۴۷ میلیون مترمکعب در سال است.

جدول ۱- مصارف آب سطحی (MCM) (Alborz Regional Water Organization, 2020)
Table 1- Surface water consumption (MCM) (Alborz Regional Water Organization, 2020)

منطقه Region		انهار Streams			آبندان Dike			ایستگاه پمپاژ و موتور پمپ Pumping station and pump motor			جمع مصارف Total
		صنعت Industry	شرب Drinking	کشاورزی Agriculture	صنعت Industry	شرب Drinking	کشاورزی Agriculture	صنعت Industry	شرب Drinking	کشاورزی Agriculture	
هشتگرد Hashtgerd	دشت Plain	۰	۰	۲۸/۸۵	۰	۰	۰/۶۲	۰	۰	۰	۲۹/۴۷
	آبخوان Aquifer	۰	۰	۲۸/۸۵	۰	۰	۰/۶۲	۰	۰	۰	۲۹/۴۷

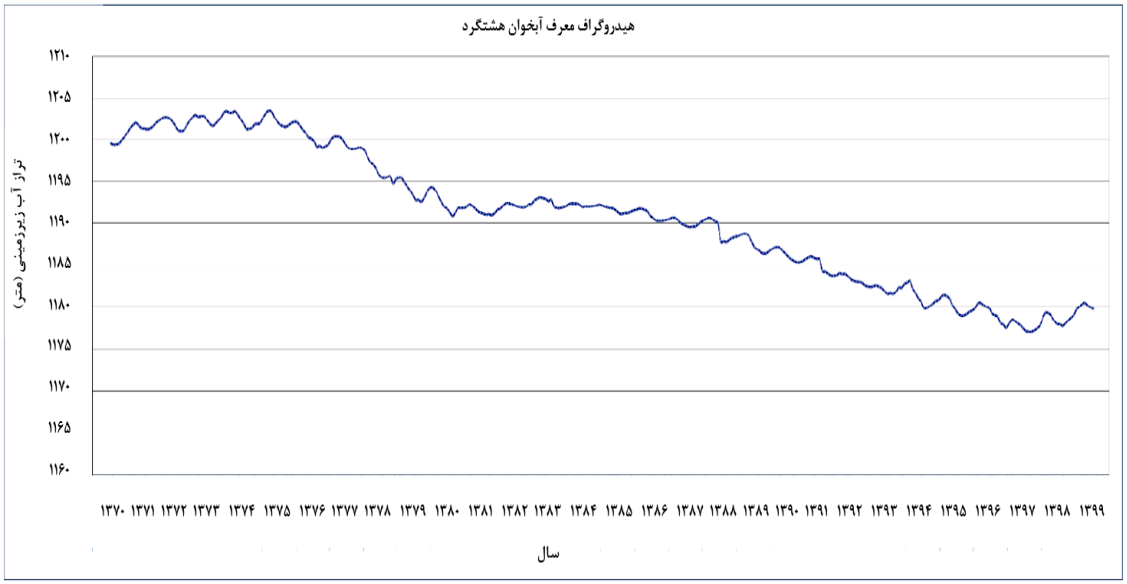
منابع آب زیرزمینی دشت هشتگرد شامل قنات، چشمه، چاه‌های عمیق و نیمه عمیق است. میزان برداشت از چاه‌های عمیق و نیمه عمیق، با توجه به تعداد، متوسط آبدهی و متوسط ساعات کارکرد آن‌ها بر اساس آماربرداری دور سوم (سال ۱۳۹۸) به تفکیک مصارف کشاورزی، شرب و صنعت محاسبه شد. میزان برداشت از چشمه‌ها، قنات‌های موجود با توجه به تعداد (دهنه)، متوسط آبدهی در سال مذکور تعیین گردید که نتایج محاسبات در جدول (۲) ارائه‌شده است. براساس میزان تخلیهٔ سالانه و مصارف مختلف، به‌طور متوسط سالانه ۲۵۳/۱۳ و۲۷۱/۶۰ میلیون مترمکعب آب به‌ترتیب برای آبخوان و دشت به منظور کشاورزی، شرب و صنعت مصرف‌شده است. براساس آماربرداری دور سوم، هفت چشمه در سطح دشت وجود دارد اما هیچ چشمه‌ای در سطح آبخوان هشتگرد گزارش نشده است. به‌طور متوسط سالانه به میزان ۰/۰۴۰، ۰/۲۴۰ و ۰/۰۹۵ میلیون مترمکعب به ترتیب در بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت از آب چشمه‌ها مصرف‌شده است. در سطح دشت و آبخوان به ترتیب ۲۲ و ۲ دهنه قنات گزارش شده است که درمجموع ۱/۰۷ و ۰/۶۵ میلیون مترمکعب در سال در بخش‌های کشاورزی و شرب در سطح دشت مصرف‌شده است. به‌طورکلی، میزان مصارف از آب زیرزمینی در دشت هشتگرد برای کشاورزی، شرب و صنعت به ترتیب برابر با ۲۱۵/۴۷، ۴۵/۸۱ و ۱۰/۳۲ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است (جدول ۲).

بر اساس رفتار سنجی و شبکهٔ تیسن ۱۷ چاه پیزومتری در محدودهٔ آبخوان دشت هشتگرد، ارقام هیدروگراف واحد آبخوان آبرفتی مربوط به دورهٔ آماری ۲۹ سال (سال‌های آبی ۱۳۷۰-۷۱ تا ۹۹-۱۳۹۸) در شکل (۳) نشان داده شده است. تغییرات ذخیره در آبخوان آبرفتی عبارت است از مجموع ورودی منهای مجموع خروجی که می‌تواند مثبت یا منفی باشد. براساس بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی دشت هشتگرد مجموع عوامل ورودی به آبخوان آبرفتی دشت سالانه ۲۶۰/۲۸ میلیون مترمکعب و مجموع عوامل خروجی آن سالانه ۲۷۷/۱۰ میلیون مترمکعب است. بررسی‌ها نشان داده است که طی دورهٔ مذکور سطح آب ۱۹/۸۰ متر افت کرده که متوسط سالانهٔ آن برابر با ۶۸ سانتی‌متر است (Taheri Tizro *et al*., 2016; Consulting engineers for water and sustainable development, 2009). مجموع کل کسری مخزن ۴۸۷/۸۵ میلیون مترمکعب و میزان سالیانهٔ متوسط کسری مخزن برابر با ۱۶/۸۲ میلیون مترمکعب است. بر اساس هیدروگراف واحد آبخوان آبرفتی هیدروگراف طی سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۵ دارای سیر صعودی و در سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۰ به‌شدت سیر نزولی داشته و سطح آب زیرزمینی افت کرده است. از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۶ هیدروگراف متعادل بوده‌است و مجدداً از سال ۱۳۸۶ شروع به افت می‌کند. یادآوری می‌شود در سال‌های آبی ۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸ تراز سطح ایستابی به میزان ۰/۷۵ و ۱/۸۶ متر افزایش‌یافته است.

جدول ۲- مصارف آب زیرزمینی (MCM) (Alborz Regional Water Organization, 2020)

Table 2- Ground water consumption (MCM) (Alborz Regional Water Organization, 2020)

منطقه Region		چاه Well			چشمه Spring			قنات Aqueduct			جمع Total
		صنعت Industry	شرب Drinking	کشاورزی Agriculture	صنعت Industry	شرب Drinking	کشاورزی Agriculture	صنعت Industry	شرب Drinking	کشاورزی Agriculture	
هشتگرد Hashtgerd	دشت Plain	۱۰/۲۲	۴۴/۹۲	۲۱۴/۳۶	۰/۰۹۵	۰/۲۴۰	۰/۰۴	۰	۰/۶۵	۱/۰۷	۲۷۱/۶۰
	آبخوان Aquifer	۹/۲۷	۳۷/۲۰	۲۰۶/۶۶	۰	۰	۰/۶۲	۰	۰	۰	۲۵۳/۱۳



شکل ۳- هیدروگراف واحد آبرفتی هشتگرد در دورهٔ آماری ۷۱-۱۳۷۰ تا ۹۹-۱۳۹۸ (Alborz Regional Water Organization, 2020)

Figure 3- Hydrograph of the Hashtgerd alluvial aquifer during the statistical period of 1990-1991 to 2019-2020 (Alborz Regional Water Organization, 2020)

الگو و سطح زیر کشت محصولات غالب منطقه

زمین‌های کشاورزی آبی در محدودهٔ دشت هشتگرد ۲۳۱۹۵ هکتار وسعت دارد. از این میزان ۱۰۰۱۳ هکتار به‌صورت زراعی آبی و ۱۳۱۸۲ هکتار به‌صورت باغ و مابقی به‌صورت دیم است؛ بنابراین، در کل حوضه قسمت اعظم اراضی نیاز به آبیاری دارد و سطح زیر کشت دیم اندک است. مناطق و زمین‌های نزدیک به رودخانهٔ کردان ظرفیت مطلوبی برای تولیدات باغی دارند، هرچه زمین‌ها از این رودخانه فاصله پیدا می‌کنند، باغ کمتر می‌شود. خلاصهٔ وضعیت سطح زیر کشت، عملکرد، تاریخ کاشت و برداشت، تعداد و مقدار آبیاری محصولات زراعی و باغی غالب در دشت هشتگرد در جدول‌های (۳) و (۴) ارائه‌شده است.

جدول ۳- اطلاعات مربوط به محصولات غالب زراعی در سطح دشت هشتگرد (Agricultural Jihad, 2021)
Table 3- Data about the major crops in the Hashtgard Plain (Agricultural Jihad, 2021)

محصول Crop	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)	عملکرد (تن در هکتار) Yield (tons.ha^{-1})	تاریخ کاشت Planting date	تاریخ برداشت Harvesting date	تعداد دفعات آبیاری The number of times of Irrigation	میزان آب مصرفی متوسط (مترمکعب در هکتار) Average water consumption (m^3.ha^{-1})	طول دوره رشد (روز) Length of growth period (days)
گندم Wheat	۲۶۹۱	۵	۱۰ آبان	۱۰ تیر	۴-۵	۶۰۰۰	۱۹۳
جو Barley	۱۰۰۰	۴/۲	۱۰ آبان	۲۰ خرداد	۳-۴	۵۰۰۰	۱۷۳
ذرت علوفه‌ای Forage maize	۲۰۶۵	۶۰	۱۰ تیر	۱۰ مهر	۸-۱۲	۱۰۰۰۰	۹۳
یونجه Alfalfa	۱۸۴۰	۱۶	۱۰ شهریور	۱۰ اردیبهشت	۱۲-۱۶	۱۶۰۰۰	۱۹۳ (چین اول)
سایر Etc.	۲۴۱۷	–	–	–	-		–
جمع Total	**۱۰۰۱۳**	–	–	–			–

جدول ٤- اطلاعات مربوط به محصولات غالب باغی در سطح دشت هشتگرد (Agricultural Jihad, 2021)
Table 4- Data about the major horticulture crops in the Hashtgard Plain (Agricultural Jihad, 2021)

محصول Crop	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)	عملکرد (تن در هکتار) Yield (tons. ha^{-1})	تاریخ برداشت Harvesting date	تعداد دفعات آبیاری The number of times of Irrigation	میزان آب مصرفی متوسط (مترمکعب در هکتار) Average water consumption (m^3.ha^{-1})	طول دوره رشد (روز) Length of growth period (days)
هلو Peach	۲۸۵۰	۳۵/۵	۱۰ مرداد	۸-۱۰	۹۰۰۰	۱۲۴
شلیل Nectar	۲۱۵۶	۲۳/۵	۲۰ مرداد	۸-۱۰	۹۰۰۰	۱۳۴
سیب Apple	۱۴۶۶	۲۴	۱۰ مهر	۸-۱۲	۱۲۰۰۰	۱۱۹
آلو شابلون Plum stencil	۱۳۷۶	۲۲/۵	۱۵ شهریور	۸-۱۰	۱۰۰۰۰	۱۶۰
سایر Etc.	۵۳۳۴	–	–			–
جمع Total	**۱۳۱۸۲**	–	–			–

الگوی کشت منطقه شامل گندم زمستانه، جو زمستانه، ذرت علوفه‌ای و یونجه و همچنین عمده محصولات باغی در این منطقه هلو، آلوچه، شلیل و سیب است. تراکم اراضی کشاورزی در جنوب هشتگرد است. مقدار آب مصرفی براساس گزارش‌های موجود و مصاحبه با کشاورزان و کارشناسان مطلع محلی برآورد شده است. ارقام ذکرشده حدود مقادیر متوسط آبیاری در سطح منطقه را نشان می‌دهند. مقدار و دفعات آبیاری انواع محصولات براساس نوع

خاک، میزان قابل استحصال و غیره تا حدودی متغیر است. این مقادیر ممکن است از یک سال آبی به سال دیگر نیز تفاوت داشته باشد. با این حال، تعداد و فاصله‌های آبیاری، به‌ویژه برای زراعت‌های اصلی منطقه، تغییرات زیادی ندارند و تقریباً مقادیر ذکرشده آب مصرفی محصولات قابل‌قبول است.

مدل AquaCrop

مدل AquaCrop با حفظ قابلیت‌های نشریهٔ ۳۳ (Doorenbos & Kassam, 1979) توازنی منطقی بین سادگی، دقت، توانمندی و سهولت استفاده برقرار می‌کند تا به شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی بپردازد استخوان‌بندی فکری و اساس کار شبیه‌سازی فرآیندها توسط استدوتو و همکاران (Steduto *et al.*, 2009) و الگویتم مورداستفاده نرم‌افزار مدل و توصیف عملیات توسط رائس و همکاران (Raes *et al.*, 2009) ارائه‌شده است. در نشریهٔ فائو ۳۳ به بررسی مقادیر تبخیروتعرق نسبی و ضریب کاهش عملکرد در گام زمانی بلندمدت پرداخته می‌شد، اما AquaCrop از طریق سهم مولد تولید، یعنی تعرق، از تبخیروتعرق و میزان زیست‌توده تولیدی و به‌واسطه شاخص برداشت، مقادیر شاخص بهره‌وری آب (تعرق) و عملکرد محصول در یک گام زمانی روزانه برآورد می‌کند. از دیگر ویژگی‌های مدل AquaCrop این است که به‌جای شاخص سطح برگ از پوشش سبز روی زمین استفاده می‌کند. در آن درجه روز رشد[1] (GDD) اهمیت ویژه‌ای دارد و به‌جای ضریب کاهش نسبی عملکرد به بررسی شاخص بهره‌وری می‌پردازد (Ramezani Etedali *et al.*, 2016). از ویژگی‌های بارز مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد محصولات تحت تنش‌های کم‌آبی، شوری و حاصلخیزی در شرایط متفاوت بافت خاک، سناریوهای مدیریتی مزرعه و شرایط آب و هوایی مختلف می‌توان اشاره کرد (Abedinpour *et al.*, 2012 ؛ Raes *et al.*, 2012). ورودی‌های مدل شامل چهار دسته داده‌های اقلیمی، داده‌ها و پارامترهای گیاهی، اطلاعات خاک و مدیریت (مزرعه‌ای و آبیاری) است. خروجی‌های مدل شامل تغییرات رطوبت خاک طی زمان و در لایه‌های مختلف پروفیل خاک، تقویم زراعی، تغییرات زمانی تبخیروتعرق به‌صورت مستقل، روند توسعهٔ عمق ریشه، پارامترهای بیلان آب‌وخاک، درصد پوشش گیاهان طی زمان و عملکرد دانه، زیست‌توده و شاخص برداشت و نیز بهره‌وری تعرق در تولید دانه و زیست‌توده است (Ramezani Etedali *et al.*, 2016).

واسنجی مدل AquaCrop

هر مدل شبیه‌سازی برای اینکه بتواند نتایج مفید و واقعی‌تری بدهد باید با استفاده از اطلاعات و شرایط منطقه‌ای واسنجی شود (Andarzian *et al.*, 2011). مدل AquaCrop بر اساس شرایط منطقه‌ای و عملکرد محصولات زراعی برحسب وزن خشک (DY_p) برای محصولات زراعی غالب منطقه هشتگرد واسنجی شد. لازم است گفته شود که مدل AquaCrop عملکرد خشک محصولات را به‌عنوان خروجی در نظر می‌گیرد (Raes *et al.*, 2016)، ولی با توجه به اینکه ذرت علوفه‌ای و یونجه بر اساس وزن‌تر و قابل‌فروش گزارش می‌شوند از این رو برای تبدیل وزن تر ذرت علوفه‌ای و یونجه به وزن خشک از نتایج تحقیقات متعددی استفاده شد که روی اجزای عملکرد و ویژگی‌های این محصولات اجرا شده است؛ به‌طور میانگین ۳۳ درصد از وزن‌تر زیست‌توده بالای سطح زمین ذرت علوفه‌ای (Djaman, 2011) را وزن خشک و به‌طور میانگین ۲۵ درصد از وزن‌تر یونجه را وزن خشک تشکیل می‌دهد. بدین ترتیب برای واسنجی مدل، وزن خشک کل زیست‌تودهٔ بالای سطح زمین برای ذرت علوفه‌ای ۱۹/۸ تن در هکتار و وزن خشک کل زیست‌توده بالای سطح زمین برای محصول یونجه ۴/۰ تن در هکتار در نظر گرفته شد (پتانسیل عملکرد کل زیست‌توده بالای سطح زمین ذرت علوفه‌ای و یونجه به‌ترتیب، ۶۰ و ۱۶ تن در هکتار

[1] Growing Degree Day

محاسبه گردید). مقادیر Y_p مربوط به گندم و جو، با توجه به اینکه برحسب وزن دانه گزارش می‌شوند، به‌عنوان DY_p در واسنجی مدل استفاده شدند. از اطلاعات سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ برای واسنجی و از سال آبی ۹۹-۱۳۹۸ برای اعتبارسنجی مدل درنظرگرفته شد.

از تاریخ کاشت و برداشت متداول محصولات در بازهٔ زمانی کاشت و برداشت مرسوم در منطقه برای واسنجی مدل استفاده شد. بر اساس مشاهدات میدانی، اطلاعات مربوط به تاریخ کاشت، تاریخ برداشت، متوسط عملکرد، میزان آبیاری در منطقهٔ هشتگرد برای محصولات غالب زراعی در جدول (۵) ارائه‌شده است. در این جدول مقادیر Y_P، برای گندم و جو برحسب عملکرد دانهٔ خشک، برای گیاه ذرت علوفه‌ای و یونجه برحسب وزن خشک زیست‌توده بالای سطح زمین است. لازم است اضافه شود مدل به‌منظور در نظر گرفتن افزایش دمای هوا و تأثیری که دمای هوا می‌تواند روی طول دورهٔ رشد بگذارد و برای شبیه‌سازی بهتر و متناسب با تغییرات هوا در حالت درجه-روز-رشد[1](GDD) مطابق با آنچه در مقاله استدوتو و همکاران (Steduto *et al.*, 2012) اشاره‌شده است، اجرا شد. طول دورهٔ رشد[2] (LCM) هر یک از گیاهان توسط مدل (بر اساس GDD) محاسبه و در جدول (۵) ارائه‌شده است.

پس از محاسبهٔ مقادیر نیاز آبیاری برای هر یک از گیاهان، مقدار (I) به‌عنوان آبیاری کامل و فایل ورودی آبیاری در مدل AquaCrop به‌منظور واسنجی اولیه مدل استفاده شد. به‌طور خلاصه، پارامترهای گیاهی اشاره‌شده در بالا به‌منظور دستیابی به عملکرد خشک (DY_p) هر محصول با حداقل خطای نسبی (RE) واسنجی شدند.

$$RE = \left(\frac{DY_S - DY_P}{DY_P}\right) \times 100 \qquad (۱)$$

در این رابطه، DY_S (ton.ha^{-1}) مقدار شبیه‌سازی‌شده عملکرد گیاهان توسط مدل است.

پارامترهای واسنجی شدهٔ مدل برای دستیابی به عملکرد خشک محصولات زراعی (DY_p) عبارت‌اند از: پارامترهای گیاهی مانند توسعهٔ گیاه (پوشش تاج اولیه، ضریب کاهش تاج گیاه)، اجزای تولید محصول (شاخص برداشت مرجع و ضریب بهره‌وری نرمال شده برای CO_2 و ET_O)، عوامل مؤثر بر تنش آبی (عامل شکل منحنی برای ضریب تنش آبی و رشد برگ، آستانهٔ بالایی تخلیهٔ رطوبت خاک، آستانهٔ پایینی تخلیه رطوبت خاک برای رشد رویشی)، دمای پایه و دمای قطع رشد.

جدول ۵- اطلاعات مورداستفاده برای محصولات زراعی غالب در دشت هشتگرد در واسنجی مدل AquaCrop

Table 5- The data used for the major crops in Hashtgerd Plain in the calibration of the AquaCrop model

محصول Crop	Dry DY_P (ton.ha^{-1})	متوسط تاریخ کاشت Planting date	متوسط تاریخ برداشت Harvesting date	LCM (روز)	I (mm)
گندم زمستانه Winter wheat	۵	۱۳۹۷/۰۸/۱۰	۱۳۹۸/۰۴/۱۰	۱۹۳	۶۰۰
جو زمستانه Winter barley	۴/۲	۱۳۹۷/۰۸/۱۰	۱۳۹۸/۰۳/۲۰	۱۷۴	۵۰۰
ذرت علوفه‌ای Forage maize	۱۹/۸	۱۳۹۸/۰۴/۱۰	۱۳۹۸/۰۷/۱۰	۹۵	۱۰۰۰
یونجه Alfalfa	۴	۱۳۹۷/۰۶/۱۰	۱۳۹۸/۰۲/۱۰	۱۹۳	۱۶۰۰

DY_P: عملکرد خشک گیاه، **LCM**: طول گندم زمستانه گیاه و **I**: عمق آبیاری کامل گیاه

[1] Growing Degree Day

[2] Length of Crop Maturity

سناریوهای مدیریتی ارزیابی شده توسط مدل

سناریوی بهبود راندمان آبیاری

برای ارزیابی شرایط مدیریتی موجود در محدودهٔ مورد مطالعه، از اطلاعات میدانی کیفیت آب آبیاری (شوری)، نوع محصول، تاریخ کاشت و برداشت، مقدار عملکرد، زمان‌بندی و تعداد آبیاری، روش آبیاری و دبی جریان استفاده شد. با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده، میزان آب آبیاری برای محصولات غالب محدوده مورد مطالعه محاسبه شد. با استفاده از نرم افزار، نیاز خالص آبی گیاهان مختلف و نیاز خالص آبیاری با توجه به مقدار باران مؤثر در طول دوره رشد برآورد شد. بر این اساس، راندمان کاربرد موجود در نقاط مختلف مورد مطالعه از حاصل تقسیم نیاز خالص آبیاری به مقدار واقعی آب آبیاری محاسبه می‌شود. این محاسبات در محدوده دشت برای گندم، جو، ذرت و یونجه به عنوان محصولات زراعی و هلو، شلیل، سیب و آلو شابلون به عنوان محصولات باغی غالب منطقه دنبال شد. نتایج بدست آمده از راندمان کاربرد برای محصولات مختلف در مناطق مختلف مورد مطالعه در برگیرنده مقادیر متفاوتی است که بیانگر شرایط مدیریتی موجود کشاورزان مختلف است. در این مطالعه، برای واقعی‌تر کردن هر چه دقیق‌تر سناریوی مورد نظر از مقادیر برتر راندمان کاربرد در شرایط موجود در منطقه استفاده شد بدون تغییر سیستم آبیاری و بدون نیاز به تجهیزات مازاد به‌عنوان مبنای سطح بهبود راندمان برای کشت‌های مختلف. میزان نیاز آبیاری در شرایط راندمان بهبود یافته برآورد می‌شود. با تفاضل میزان نیاز آبیاری واقعی کشاورزان محدوده و آب آبیاری در شرایط راندمان ارتقا یافته، میزان کاهش تخصیص برآورد می‌شود. بر این اساس میزان صرفه‌جویی در مقدار آب تخصیصی با توجه به سطح ارتقای راندمان آبیاری برای کشت‌ها و موقعیت‌های مختلف به‌طور مجزا محاسبه و تعیین می‌گردد. با استفاده از فرمول زیر راندمان کاربرد آب محاسبه شد (Liaghat *et al.*, 2015):

$$E_a = \frac{ET_c - P_e}{I} \qquad (۲)$$

که در آن: ET_c نیاز آبی گیاهان، P_e باران موثر، و I مقدار آب آبیاری است.

سناریوی تاریخ کاشت بهینه

با استفاده از نرم افزار AquaCrop 6.0 آب آبیاری مورد نیاز محصولات در تاریخ‌های کاشت مختلف، البته در بازه کاشت غالب منطقه، محاسبه شد. با توجه به اینکه به تعویق انداختن تاریخ‌های کاشت، متناسب با نیاز دمایی و GDD مربوط به هر گیاه، می‌تواند منجر به تغییر طول دورهٔ کشت (LCM) برای گیاهان پاییزه و بهاره شود، درنتیجه مقدار نیاز آبیاری در طول فصل رشد متناسب با تغییر تاریخ کاشت تغییر خواهد کرد (Alizadeh, 2017). برای برآورد میزان صرفه‌جویی در میزان آب مصرفی ابتدا نیاز آبیاری محصولات غالب منطقه ($ET_c - P_e$) برای تاریخ‌های مختلف کاشت برآورد و پس از آن، تاریخ کاشت برتر برای هر محصول متناسب با حداقل نیاز آبیاری به‌عنوان گزینهٔ برتر انتخاب شد. میزان صرفه‌جویی در مصرف آب برای هر محصول از مقایسهٔ آب آبیاری مورد نیاز در شرایط موجود و تاریخ کاشت برتر به‌دست آمد. برای هر محصول، متناسب با سطح زیر کشت و انتخاب تاریخ کشت برتر آن، میزان کل آب صرفه‌جویی شده برآورد شد.

سناریوی کم‌آبیاری

با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده، الگوهای مختلف مدیریت آبیاری (کم‌آبیاری) برای افزایش بهره‌وری آب و صرفه‌جویی در میزان آب تخصیصی در منطقه بررسی شد. بر این اساس، برای کشت‌های غالب در دشت هشتگرد سناریوهای مختلف کم‌آبیاری مانند کاهش عمق آب آبیاری و نیز افزایش دور آبیاری در سطوح مختلف با استفاده از مدل AquaCrop ارزیابی گردید. از آن جا که یکی از هدف‌های اصلی مطالعه کاهش برداشت از منابع آب برای به حداقل رساندن برداشت مازاد در راستای پایداری منابع آب قرار داده شد، میزان آب صرفه جویی شده متناسب با هر سناریو برآورد و گزینهٔ برتر به‌عنوان گزینهٔ ممکن و قابل اجرا انتخاب شد.

بر این اساس، از شاخص بهره‌وری آب (میزان عملکرد بر میزان نیاز خالص آب آبیاری) هر دو شاخص مقدار آب مصرفی و عملکرد متناظر تحت هر سناریو برای انتخاب گزینهٔ برتر مبنا قرار داده شد. برای کشت‌های گندم، جو، ذرت و یونجه، ابتدا میزان نیاز خالص آب آبیاری تحت شرائط متعارف (IRR100%) برآورد شد. در عین حال با در نظر گرفتن عمق خالص آب آبیاری در IRR100% به عنوان مبنا، کاهش عمق آب آبیاری (IRR80%، IRR60% و IRR40%) و تاثیر هر سناریو بر میزان آب مصرفی در دورهٔ متناسب با میزان عملکرد محصولات و درنهایت میزان بهره‌وری مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. با توجه به اینکه قابلیت تعریف الگوهای مختلف برنامه‌ریزی آبیاری در مدل AquaCrop فراهم است، میزان آب مصرفی برای کشت‌های گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه با دورهای آبیاری مختلف نیز برآورد می‌گردد. دور آبیاری متوسط مطابق با اطلاعات جمع‌آوری شده در منطقه به عنوان دور آبیاری شاهد در نظر گرفته شد و تأثیر تغییر دور آبیاری در بازه‌های مختلف بر میزان آب صرفه جویی شده و عملکرد محصول ارزیابی گردید.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج اولیه حاصل از واسنجی مدل AquaCrop آورده شده است. پس از آن، نتایج اعمال سناریوها و میزان آب قابل صرفه‌جویی احتمالی ارائه می‌شود.

نتایج واسنجی مدل AquaCrop

پارامترهای گیاهی که پس از واسنجی مدل، در شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه برای محدوده هشتگرد از آن‌ها استفاده شد در جدول‌های (۶) و (۷) نشان داده‌شده است. ویژگی‌های فنولوژیکی مراحل مختلف رشد گیاهان که با درجه–روز–رشد (GDD) مدل AquaCrop محاسبه شدند، در جدول (۶) نشان داده‌شده است. مطابق با آنچه در مقاله استدوتو و همکاران (Steduto *et al.*, 2012) اشاره شده است، حالت درجه-روز-رشد (GDD)[1] به‌منظور در نظر گرفتن دمای هوا بر روی طول دوره رشد و شبیه‌سازی بهتر مدل AquaCrop اجرا شد.

جدول ٦- ویژگی‌های فنولوژیکی مراحل رشد گیاهان دشت هشتگرد که توسط حالت GDD مدل AquaCrop در مرحلهٔ واسنجی مدل محاسبه شد.

Table 6- Crop phonological development stages calculated by the GDD mode of the AquaCrop model (All units are in GDD)

پارامتر Parameter	گندم Wheat	جو Barley	ذرت علوفه‌ای Forage maize	یونجه Alfalfa
فاصله کاشت تا جوانه‌زنی (روز) Sowing to emergence (day)	۱۵	۱۵	۷	۵
فاصله کاشت تا حداکثر تاج (روز) Sowing to emergence (day)	۱۸۶	۱۷۲	۵۷	۱۸
فاصله کاشت تا شروع پیری (روز) Sowing to senescence (day)	۱۹۶	۱۸۳	۸۷	۴۶
فاصله کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیکی (روز) Sowing to maturity (day)	۲۰۴	۱۹۲	۹۸	۵۸
طول دوره گلدهی (روز) Flowering period length (days)	۱۵	۱۳	۱۲	۱۰
حداکثر عمق ریشه (سانتی‌متر) Maximum root depth (cm)	۱۰۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۴۰
پوشش گیاهی اولیه (درصد) Primary vegetation cover (%)	۲/۹۶	۲/۶۳	۰/۶۲	۹/۵
حداکثر پوشش گیاهی (درصد) Maximum vegetation cover (%)	۸۳	۷۸	۹۰	۸۶

[1] Growing Degree Day

پارامترهای مهم گیاهی به‌دست‌آمده در مرحلهٔ شبیه‌سازی و واسنجی مدل AquaCrop در مطالعهٔ حاضر در جدول (۷) ارائه‌شده است. مدل AquaCrop برای شرایط منطقه‌ای و بر اساس عملکرد محصولات زراعی برحسب وزن خشک[1] (DY_p) در منطقه هشتگرد واسنجی گردید. پارامترهای واسنجی شده مدل برای دستیابی به عملکرد خشک محصولات زراعی (DY_p)، عبارت‌اند از: توسعهٔ گیاه (پوشش تاج اولیه، میزان ضریب کاهش تاج گیاه)، اجزای تولید محصول (شاخص برداشت مرجع و ضریب بهره‌وری نرمال شده برای CO_2 و ET_O)، عوامل مؤثر بر تنش آبی (عامل شکل منحنی برای ضریب تنش آبی و رشد برگ، آستانهٔ بالایی تخلیه رطوبت خاک، آستانهٔ پایینی تخلیهٔ رطوبت خاک برای رشد رویشی)، دمای پایه و دمای قطع رشد. پارامترهای گیاهی پس از واسنجی مدل، در شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه برای محدودهٔ هشتگرد به‌کار گرفته شد. ویژگی‌های فنولوژیکی مراحل مختلف رشد گیاهان که با حالت درجه – روز – رشد (GDD) AquaCrop محاسبه شدند که کلیهٔ پارامترهای واسنجی با نتایج تحقیقات پیشین (Ghorbanian Kurdabadi *et al.*, 2013; Tavakoli *et al.*, 2015; Ramezani Etedali *et al.*, 2016; Amiri *et al.*, 2016; Karimi Organi *et al.*, 2016) مطابقت دارد.

مدل AquaCrop توانست عملکرد محصولات زراعی مورد مطالعه را با کم‌ترین میزان خطای نسبی (RE) ۱/۱۸، ۱/۵۸، ۰/۷۵- و ۱/۵۵- درصد به ترتیب برای گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه برای دشت هشتگرد در مرحلهٔ واسنجی (سال آبی ۹۸-۱۳۹۷) مدل شبیه‌سازی کند. میزان RE برای دورهٔ اعتبارسنجی (سال آبی ۹۹-۱۳۹۸) به ترتیب ۱/۴۳، ۱/۲۸-، ۰/۴۵ و ۱/۱۲ درصد به ترتیب برای گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه به دست آمد. مطالعات دیگر محققان (Khorsand *et al.*, 2024; Lu *et al.*, 2022; Xie *et al.*, 2023; Eskandaripour *et al.*, 2020; Amiri *et al.*, 2018; Ramezani *et al.*, 2018; Tavakoli *et al.*, 2015; Ghorbanian Kurdabadi et al., 2013) نیز نشان می‌دهد مدل AquaCrop در برآورد عملکرد دانه و زیست‌تودهٔ محصولات زراعی و بررسی تأثیرات کمی آب بر عملکرد پذیرفته‌شده است و به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه تحت گزاره‌های مختلف شناخته می‌شود. برای‌مثال، علیزاده و همکاران (Alizadeh *et al.*, 2011) با ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم در منطقه کرج نشان دادند برای دوره‌های آبیاری هفت روزه، مدل در برآورد مقدار عملکرد دانه، تبخیروتعرق گیاهی و کارایی مصرف آب قابلیت خوبی داشته است. این محققان می‌گویند مدل AquaCrop نیاز به اطلاعات ورودی کمی دارد و از دقت کافی برخوردار است و از این رو آن به‌عنوان مدلی مفید در تخمین عملکرد گیاه در شرایط کشت دیم، آبیاری تکمیلی، کم‌آبیاری و استراتژی‌های مدیریتی بهسازی کارایی مصرف آب در کشاورزی شناخته می‌شود. رجا و همکاران (Raja *et al.*, 2019) اثربخشی راهکارهای مدیریتی کاهش مصرف آب کشاورزی را در مرودشت – خرامه واقع در استان فارس با استفاده از مدل AquaCrop بررسی کردند و نشان دادند مدل AquaCrop می‌تواند عملکرد محصولات زراعی مورد مطالعه را با کم‌ترین میزان خطای نسبی (RE) ۱/۱۲، ۰/۴۶، ۰/۰۴، ۱/۱۴-، ۰/۹۶- و ۰/۵۵ درصد به ترتیب برای گندم، جو، برنج، ذرت علوفه‌ای، ذرت دانه‌ای و چغندرقند برای شبکهٔ مدرن درودزن و ۰/۷۶، ۱/۳۶ و ۰/۸۲- درصد به ترتیب برای گندم، جو و ذرت علوفه‌ای برای شبکهٔ کربال در مرحلهٔ واسنجی مدل شبیه‌سازی کند.

در ادامهٔ مطالعه، راهکارهای عملی و کم‌هزینه برای صرفه‌جویی مصرف آب با حداقل هزینه و آثار منفی بر معیشت کشاورز (کمترین کاهش عملکرد) مانند بهبود راندمان آبیاری، تغییر تاریخ کاشت، الگوهای مختلف کم‌آبیاری بررسی شد. تابع هدف مطالعه صرفه‌جویی در مصرف آب یا هدف پیشگیری از برداشت مازاد از منابع آب زیرزمینی (پایداری آبخوان) قرار داده‌شده است.

[1] Dry Yield

جدول ۷- پارامترهای مهم گیاهی به‌کاررفته در مدل AquaCrop

Table 7- The crop parameters used in the AquaCrop model

پارامتر Parameter	واحد	گندم Wheat	جو Barley	ذرت علوفه‌ای Forage maize	یونجه Alfalfa	توضیحات Remarks
پوشش تاج اولیه (CC_0) Initial canopy cover (CC_0)	%	۲/۹۶	۲/۶۳	۰/۶۲	۹/۵۰	واسنجی Calibrated
ضریب کاهش پوشش گیاهی در پیری (CDC) Canopy decline (CDC)	%.GDD^{-1}	۱/۳۲	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۸۹	واسنجی Calibrated
ضریب افزایش پوشش گیاهی (CGC) Canopy increase (CGC)	%.GDD^{-1}	۰/۴۷	۰/۹۱	۱/۰۸	۱/۳۸	واسنجی Calibrated
ضریب تعرق گیاه KcTrx Kc Tr (crop transpiration)		۱/۰۵	۱/۱۲	۱/۰۶	۱/۰۸	واسنجی Calibrated
ضریب بهره‌وری نرمال شده برای (CO_2 و ET_O) Normalized water productivity	g/m^2	۱۵	۳۳	۳۱	۲۸	پیش‌فرض Default
ضریب عملکرد تحت شرایط افزایش غلظت CO_2 Performance under elevated [CO_2] (Sink strength)	%	۵۰	۶۰	۵۰	۵۰	پیش‌فرض Default
آستانه‌بالا برای توسعهٔ تاج گیاه Upper threshold for canopy expansion	-	۰/۳۰	۰/۲۰	۰/۱۴	۰/۱۸	پیش‌فرض Default
آستانهٔ پایین برای توسعهٔ تاج گیاه Lower threshold for canopy expansion	-	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۷۲	۰/۶۸	پیش‌فرض Default
آستانهٔ بالای بسته شدن روزنه‌ها Upper threshold for stomatal closure	-	۰/۵	۰/۶	۰/۶۹	۰/۶۶	پیش‌فرض Default
عامل شکل برای توسعهٔ تاج گیاه Shape factor of canopy expansion	-	۵	۳	۲/۹	۳/۵	پیش‌فرض Default
ضریب منحنی شکل برای تنش روزنه‌ها Stomatal stress coefficient curve shape	-	۲	۳	۶	۵	پیش‌فرض Default
ضریب منحنی شکل برای پیری تاج گیاه Canopy senescence stress coefficient (upper)	-	۰/۷	۰/۵۵	۰/۶۴	۰/۶۹	پیش‌فرض Default
ضریب منحنی شکل تنش پیری Coefficient curve shape	-	۲	۳	۲/۵	۲/۱	پیش‌فرض Default
شاخص برداشت (HI_O) Reference Harvest Index (HI_0)	%	۵۳	۴۱	۱۹	۲۳	واسنجی Calibrated
دمای پایه Base temperature	سلسیوس	۰	۰	۸	۰	واسنجی Calibrated
دمای بالا Upper temperature	سلسیوس	۲۶	۱۶	۳۰	۳۰	واسنجی Calibrated
حداکثر عمق توسعهٔ ریشه Maximum effective rooting depth	m	۱/۰	۱/۰	۱/۱	۱/۴۰	واسنجی Calibrated

نتایج سناریوها

سناریوی بهبود راندمان آبیاری

بیش از ۷۵ درصد از زمین‌های زراعی آبی محدودهٔ هشتگرد زیر کشت گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه قرار دارد. محاسبات نشان داد راندمان آبیاری برای گندم از ۴۳ تا ۶۰ درصد، جو از ۴۶ تا ۶۰ درصد، ذرت علوفه‌ای از ۴۷ تا ۷۰ درصد و یونجه از ۳۹ تا ۶۵ درصد متغیر است. محاسبات متوسط راندمان به صورت وزنی برای هر یک از محصولات برآورد شد. سطح راندمان ارتقا یافته به گونه‌ای انتخاب شد که چنین راندمانی با حداقل هزینه، حفظ شرایط ساختاری موجود، بدون تغییر سیستم‌های آبیاری و هزینهٔ مضاعف توسط کشاورزان محدوده اغلب صورت می‌پذیرد. میزان کاهش تخصیص یا به عبارتی صرفه‌جویی در مصرف آب برای هر یک از محصولات غالب زراعی هشتگرد در جدول (۸) ارائه شده است. محاسبات نشان می‌دهد با ارتقای راندمان آبیاری از ۵۱ درصد موجود به ۶۰ درصد برای گندم بعنوان سطح برتر مدیریت در منطقه با توجه به شرائط موجود آبیاری و بدون تغییر سیستم، میزان آب صرفه‌جویی شده در آب آبیاری، با توجه به سطح اراضی زیر کشت، ۱/۴۵ میلیون مترمکعب خواهد بود. همین محاسبات برای محصول جو از ۵۳ به ۶۰ درصد، صرفه‌جویی به میزان ۰/۳۵ میلیون مترمکعب آب، در ذرت علوفه‌ای از ۵۷ به ۷۰ درصد به میزان ۲/۶۸ میلیون مترمکعب آب و در محصول یونجه با ارتقای راندمان از ۵۲ به ۶۵ به میزان ۳/۸۲ میلیون مترمکعب آب تخصیصی کاهش پیدا خواهد کرد. درمجموع، برای محصولات غالب در این محدوده که در برگیرنده ۷۶ درصد از زمین‌های زراعی زیر کشت است، با ارتقای راندمان به راندمان برتر، می‌توان در مجموع ۸/۳۰ میلیون مترمکعب در میزان آب آبیاری، در مقایسه با شرایط موجود در منطقه، صرفه‌جویی کرد (جدول ۸). سهم هر کشت در میزان صرفه‌جویی طبیعتاً متناسب با متوسط آب مصرفی در هکتار و سطح زمین‌های زیر هر کشت آن محصول است. در این میان، آب مصرفی برای ذرت علوفه‌ای و یونجه بیش از دیگر محصولات است.

جدول ۸- نتایج حاصل از بهبود راندمان برای محصولات زراعی غالب در کاهش میزان آب تخصیصی در محدوده دشت هشتگرد

Table 8- Estimated water savings from removing irrigation efficiency gaps for major crops within the Hashtgerd region

محصول Crop	متوسط آب مصرفی در هر هکتار (مترمکعب) Average water consumption per hectare (m^3)	سطح زیر کشت Cultivated area		کل آب تخصیص یافته (میلیون مترمکعب) Total allocated water (MCM)	میزان کاهش تخصیص (میلیون مترمکعب) Allocation reduction amount (MCM)	متوسط راندمان (درصد) Average E_a (%)	متوسط راندمان بهبود یافته (درصد) Target E_a (%)
		هکتار ha	درصد %				
گندم Wheat	۶۰۰۰	۲۶۹۱	۲۶/۸	۱۶/۱۴	۱/۴۵	۵۱	۶۰
جو Barley	۵۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰/۰	۵/۰۰	۰/۳۵	۵۳	۶۰
ذرت علوفه‌ای Forage maize	۱۰۰۰۰	۲۰۶۵	۲۰/۶	۲۰/۶۵	۲/۶۸	۵۷	۷۰
یونجه Alfalfa	۱۶۰۰۰	۱۸۴۰	۱۸/۴	۲۹/۴۴	۳/۸۲	۵۲	۶۵
مجموع Total		**۷۵۹۶**	**۷۵/۸**	**۷۱/۲۳**	**۸/۳۰**	-	-

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد حدود ۶۰ درصد از زمین‌های آبی محدودهٔ دشت هشتگرد به هلو، شلیل، سیب و آلو شابلون اختصاص دارد. محاسبات نیز نشان می‌دهد میزان راندمان آبیاری هلو از ۳۶ تا ۶۰ درصد، شلیل از ۳۴ تا ۶۰ درصد، سیب از ۳۰ تا ۵۵ درصد و آلو شابلون از ۳۳ تا ۵۵ درصد متغیر است. به طور مشابه متوسط آب مصرفی در هر هکتار برای هر یک از محصولات غالب باغی در مناطق مختلف محدوده متفاوت است و از این رو متوسط راندمان به طور وزنی محاسبه شد. میزان کاهش تخصیص یا به عبارتی صرفه‌جویی در مصرف آب برای هر یک از محصولات باغی غالب منطقه هشتگرد در جدول (۹) ارائه شده است.

محاسبات نشان می‌دهد با ارتقای راندمان آبیاری از ۴۸ درصد موجود به ۶۰ درصد برای هلو به‌عنوان سطح برتر مدیریت در منطقه با توجه به شرایط موجود آبیاری و بدون تغییر سیستم برای هلو، میزان آب صرفه‌جویی شده آب آبیاری با توجه به سطح زیر کشت به میزان ۳/۰۸ میلیون مترمکعب خواهد بود. همین محاسبات برای شلیل از ۴۷ به ۶۰ درصد به میزان ۲/۵۲ میلیون مترمکعب آب تخصیصی کاهش خواهد یافت. با ارتقای راندمان ۴۲ به ۵۵ درصد برای سیب و نیز ۴۴ به ۵۵ درصد برای آلو شابلون به ترتیب به میزان ۲/۲۸ و ۱/۵۱ میلیون مترمکعب در آب تخصیصی صرفه‌جویی خواهد شد. درمجموع، برای محصولات غالب باغی در این محدوده که در بر گیرندهٔ ۶۰ درصد از باغ‌های منطقه است با ارتقای راندمان به راندمان برتر، حدود ۹/۴ میلیون مترمکعب میزان تخصیص آب آبیاری، در مقایسه با شرایط موجود، کاهش پیدا خواهد کرد (جدول ۹). نتایج تحقیقات نیکبخت و نجیب (Nikbakht & Najib, 2015) درخصوص افزایش راندمان آبیاری بر نوسان‌های سطح ایستابی نشان داده است که با بهبود راندمان، سطح آب زیرزمینی در کل سطح دشت عجب‌شیر افزایش خواهد یافت. بنابراین، کاهش تخصیص لازم در اثر بهبود راندمان آبیاری در شرایط کمبود آب قابل دسترس (قابل تخصیص) در سال‌های کم‌آب اهمیت دارد زیرا در شرایط محدودیت آب، امکان بهره‌برداری از حداکثر زمین‌های زیر کشت و با حفظ عملکرد موجود امکان‌پذیر است. نگرشی نوین در خصوص مدیریت و راندمان آبیاری بیانگر این واقعیت است که مقدار صرفه‌جویی در میزان آب آبیاری در اثر بهبود راندمان آبیاری لزوماً مترادف با افزایش منابع آب قابل تامین برای مصارف دیگر نخواهد بود. بررسی‌های مختلف نشان می‌دهد که سهم عمده از تلفات آبیاری (چه در قالب رواناب یا نفوذ عمقی) قابل بازیافت است و می‌توان از آن بار دیگر استفاده کرد (Liaghat *et al.*, 2015). اهمیت این بررسی تعیین راهکارهای ممکن در تامین میزان آب آبیاری در شرائط محدودیت آب فراهم می‌کند.

جدول ۹- نتایج حاصل از بهبود راندمان برای محصولات باغی غالب در کاهش میزان آب تخصیصی در محدوده دشت هشتگرد

Table 9- Estimated water savings from removing irrigation efficiency gaps for major horticultural crops within the Hashtgerd plain

محصول Crop	متوسط آب مصرفی در هر هکتار (مترمکعب) Average water consumption per hectare (m^3)	سطح زیر کشت Cultivated area		کل آب تخصیص یافته (میلیون مترمکعب) Total allocated water (MCM)	میزان کاهش تخصیص (میلیون مترمکعب) Allocation reduction amount (MCM)	متوسط راندمان (درصد) Average E_a (٪)	متوسط راندمان بهبود یافته (درصد) Target E_a (٪)
		هکتار ha	درصد ٪				
هلو Peach	۹۰۰۰	۲۸۵۰	۲۱/۶	۲۵/۶۵	۳/۰۸	۴۸	۶۰
شلیل Nectar	۹۰۰۰	۲۱۵۶	۱۶/۴	۱۹/۴۰	۲/۵۲	۴۷	۶۰
سیب Apple	۱۲۰۰۰	۱۴۶۶	۱۱/۱	۱۷/۶۰	۲/۲۸	۴۲	۵۵
آلو شابلون Plum stencil	۱۰۰۰۰	۱۳۷۶	۱۰/۴	۱۳/۷۶	۱/۵۱	۴۴	۵۵
مجموع Total		**۷۸۴۸**	**۵۹/۵**	**۷۶/۴۰**	**۹/۴۰**	-	-

سناریوی تغییر تاریخ کاشت

یکی از راهکارهای ممکن در کاهش آب آبیاری مورد نیاز، تغییر تاریخ کاشت محصولات مختلف است. تغییر تاریخ کاشت می‌تواند منجر به کوتاه‌تر شدن دورهٔ رشد، افزایش سهم باران مؤثر و درنتیجه کاهش نیاز آب آبیاری در دورهٔ رشد گیاه شود. تاریخ کاشت برتر متناسب با شرایط آب و هوایی و بارندگی منطقه و سال مورد نظر طبیعتاً می‌تواند متفاوت باشد. نتایج حاصل از این بررسی برای دشت هشتگرد در جدول (۱۰) ارائه شده است. اطلاعات جمع‌آوری شده در خصوص تاریخ کاشت محصولات مختلف مبنای دامنهٔ تاریخ ممکن برای تعیین تاریخ کاشت برتر قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد با انتخاب تاریخ کاشت برتر برای گندم در دههٔ اول آبان، برای گندم و جو به ترتیب به میزان ۵/۸ درصد و ۷/۴ درصد، دههٔ دوم تیر برای ذرت علوفه‌ای به میزان ناچیز ۰/۹ درصد و دههٔ دوم شهریور برای یونجه به میزان ۳/۱ درصد و درمجموع حدود ۲/۴ میلیون مترمکعب (۳/۳۷ درصد) در مصرف آب صرفه‌جویی خواهد شد (جدول ۱۰). علاوه‌بر بررسی نتایج سناریو تغییر تاریخ کاشت بر نیاز آبی و آبیاری محصولات، اثربخشی نتایج آن بر میزان عملکرد نیز مهم است. بررسی نتایج مدل در سناریو تغییر تاریخ کاشت نشان می‌دهد هیچ اثر منفی قابل توجهی در میزان عملکرد محصولات ندارد. بازه تعیین شده برای تغییر تاریخ کاشت در بازه عرف منطقه است و اثربخشی آن بر استفادهٔ بهینه از سهم باران موثر و درنتیجه کاهش نیاز آبیاری محصولات خواهد بود.

نتایج تحقیق والیا و همکاران (Walia *et al.*, 2014) نشان داده است که زمان مناسب کاشت برای یک محصول در مناطق مختلف متغیر است و تاریخ کاشت عاملی مهم و تعیین کننده در تولید محصول و صرفه‌جویی در مصرف آب است. این بررسی نشان می‌دهد میزان صرفه‌جویی در میزان آب آبیاری مورد نیاز به‌طور مشخص برای کاشت گندم و جو قابل توجه است که دلیل آن وسعت بالای زمین‌های زیر کشت این دو محصول و استفاده از باران موثر در فصل زمستان و بهار در منطقه است. لازم است گفته شود، انتخاب تغییرات کاشت هر یک از محصولات به گونه‌ای انتخاب شد که اولاً با بازه تاریخ کاشت محصول منطقه تناسب داشته باشد، ثانیاً تاریخ کاشت محصولات در تناوب زراعی محصولات پاییزه و بهاره تداخل وجود نداشته باشد. شاید بتوان با کاشت زود هنگام گندم و جو، با بهره‌گیری از بارش‌های پاییز و نیز با به‌تعویق انداختن کاشت ذرت علوفه‌ای در میزان مصرف آب آبیاری صرفه‌جویی بیشتری کرد، اما چون این امر منجر به تداخل کاشت و برداشت این محصولات با هم خواهد شد. به همین دلیل سعی شده بررسی تغییرات میزان آب مصرفی و آبیاری محصولات در اثر تغییر تاریخ کاشت در بازه معقول و امکان‌پذیر در منطقه بررسی شود. نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد با به‌تعویق انداختن تاریخ‌های کاشت، به دلیل نیاز دمایی و شرایط GDD مربوط به هر گیاه، LCM برای گیاهان پاییزه و بهاره به ترتیب کوتاه‌تر و طولانی‌تر می‌شود. دلیل تفاوت LCM نسبتا زیاد گندم و جو ممکن است تفاوت در فیلوکرون[1] (GDD مورد نیاز برای تشکیل برگ گیاه) این دو گیاه باشد که GDD مورد نیاز فیلوکرون برای گندم اغلب ۱۱۵-۱۰۰ درجه – روز (Frank and Baver, 1995) و برای جو اغلب ۶۵-۶۸ درجه – روز (McMaster, 1994) است.

[1] Phyllochron

جدول ۱۰- میزان آب صرفه‌جویی شده در دورهٔ رشد گیاهان برای تاریخ‌های کاشت مختلف در دشت هشتگرد

Table 10- Water saving for different planting dates in the Hashtgerd plain

محصول Crop	تاریخ‌های کاشت Planting dates	تاریخ بهینه‌کاشت Optimal planting date	سطح زیر کشت Cultivated area		آب صرفه جویی شده (میلیون مترمکعب) Water savings (MCM)	متوسط راندمان (درصد) Target E_a (%)
			هکتار ha	درصد %		
گندم Wheat	دههٔ اول آبان – دههٔ دوم آذر	دههٔ اول آبان	۲۶۹۱	۲۶/۸	۰/۹۴	۶۰
جو Barley	دههٔ اول آبان – دههٔ دوم آذر	دههٔ اول آبان	۱۰۰۰	۱۰/۰	۰/۳۷	۶۰
ذرت علوفه‌ای Forage maize	دههٔ اول – دههٔ سوم تیر	دههٔ دوم تیر	۲۰۶۵	۲۰/۶	۰/۱۸۵	۷۰
یونجه Alfalfa	دههٔ اول شهریور – دههٔ سوم شهریور	دههٔ دوم شهریور	۱۸۴۰	۱۸/۴	۰/۹۲	۶۵
مجموع Total	–	–	**۷۵۹۶**	**۷۵/۸**	**۲/۴۰**	-

سناریوی کم‌آبیاری

در تبیین بهتر نتایج حاصل از بررسی الگوهای مختلف صرفه‌جویی آب در اثر سناریوی کم‌آبیاری علاوه بر میزان صرفه‌جویی در آب مصرفی، عملکرد متناظر و درنتیجه بهره‌وری آب نیز بررسی شد. نتایج بررسی‌ها دربارهٔ گندم، جو، ذرت و یونجه در زیر ارائه شده است.

بررسی سناریوی کم‌آبیاری برای گندم در دشت هشتگرد با در نظر گرفتن مقدار عمق آب آبیاری در شرایط IRR100% به عنوان مبنا برای بررسی سناریوی کم‌آبیاری با کاهش عمق‌های مختلف آبیاری در نظر گرفته شد. با بررسی این سناریو، مدل AquaCrop نشان داد در کم‌آبیاری در سطح ۸۰ درصد (IRR80%) با پذیرش ۸ درصد کاهش عملکرد به میزان ۱/۷۲ میلیون مترمکعب و نیز در کم‌آبیاری در سطح ۶۰ درصد (IRR60%) با پذیرش ۱۶ درصد کاهش عملکرد به میزان ۳/۴۵ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود. با توجه به اینکه فاصلهٔ آبیاری ۲۰ روزه (F20) در محدودهٔ هشتگرد دور آبیاری غالب محدوده است، بررسی فواصل مختلف آبیاری نتایج نشان داد در سناریوی افزایش فاصلهٔ آبیاری، ۲۵ روزه (F25)، با حفظ بهره‌وری مطلوب و تقریباً با پذیرش کاهش عملکرد ۱۰ درصد به میزان ۰/۷۳ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد میزان عملکرد و بهره‌وری آب در کشت گندم در شرایط موجود به ترتیب برابر با ۵/۰ تن در هکتار و ۱/۵۶ کیلوگرم بر مترمکعب و پس از اعمال سناریو کم‌آبیاری به ترتیب برابر با ۴/۷۵ تن در هکتار (۵ درصد کاهش) و ۱/۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب (۱۵ درصد افزایش) به‌دست می‌آید (شکل ۴). دیگر محققان (Khorsand *et al.*, 2014; Rezaverdinejad *et al.*, 2014; Amiri *et al.*, 2016; Amiri *et al.*, 2018; Khorsand *et al.*, 2024) نیز دریافتند که مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد گندم و کلزا تحت تنش‌های مختلف آبیاری و شوری کارایی قابل قبول دارد و می‌توان از این مدل برای بررسی سناریوهای مختلف استفاده کرد.

نتایج بررسی سناریوی کاهش عمق آب آبیاری برای جو با مدل AquaCrop نشان داد در سناریوی کم‌آبیاری در سطح ۸۰ درصد (IRR80%) با پذیرش ۱۲ درصد کاهش عملکرد به میزان ۰/۵۴ میلیون مترمکعب و نیز در کم‌آبیاری در سطح ۶۰ درصد (IRR60%) با پذیرش ۲۳/۸ درصد کاهش عملکرد به میزان ۱/۰۸ میلیون مترمکعب در مصرف

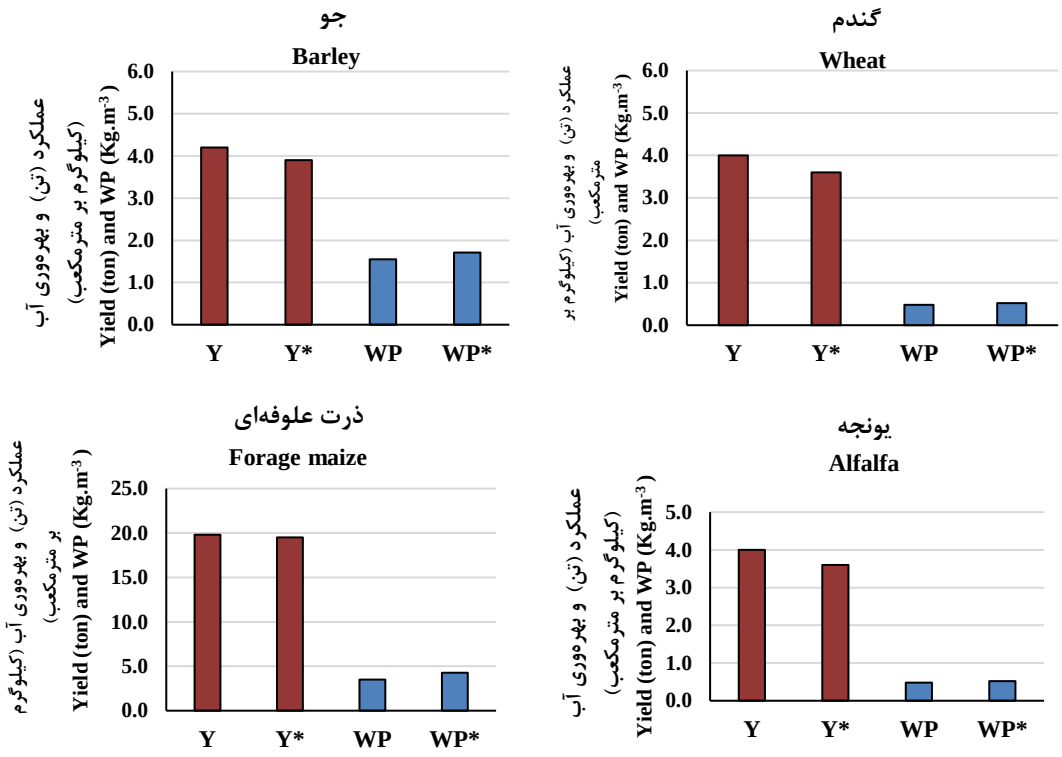
آب صرفه‌جویی می‌شود. نتایج بررسی فاصله‌های مختلف آبیاری نشان داد در فاصلهٔ آبیاری ۲۵ روزه (F25) با حفظ بهره‌وری مطلوب و تقریبا با پذیرش کاهش عملکرد ۵ درصد، به میزان ۲/۸۲ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود. گزینه‌های مطلوب کم‌آبیاری در سطح ۸۰ درصد (IRR80%) و دور آبیاری ۲۵ روزه (F25) خواهد بود (جدول ۱۱). بررسی‌ها نشان می‌دهد میزان عملکرد و بهره‌وری آب محصول جو در شرایط موجود به ترتیب برابر با ۴/۲ تن در هکتار و ۱/۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب و پس از اعمال سناریو کم‌آبیاری برابر با به ترتیب ۳/۹ تن در هکتار (۹ درصد کاهش) و ۱/۷۱ کیلوگرم بر مترمکعب (۱۰ درصد افزایش) است (شکل ۴). نتیجهٔ مطالعات کریمی و همکاران (Karimi Organi *et al.*, 2016) و رمضانی و همکاران (Ramezani *et al.*, 2018) نیز با بررسی عملکرد مدل AquaCrop برای جو نشان داد که این مدل قادر به برآورد و پیش‌بینی عملکرد مطلوب تحت سناریوهای مختلف آبیاری و تاریخ کاشت است.

نتایج بررسی سناریوی کم‌آبیاری برای ذرت علوفه‌ای با مدل AquaCrop نشان داد در سناریوی کم‌آبیاری در سطح ۸۰ درصد (IRR80%) با حفظ عملکرد، به میزان ۲/۳۵ میلیون مترمکعب و نیز کم‌آبیاری در سطح ۶۰ درصد (IRR60%) با پذیرش ۵/۵۶ درصد کاهش عملکرد، به میزان ۴/۷۱ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود. فاصلهٔ آبیاری ۹ روزه (F9) در محدودهٔ دشت هشتگرد، دور آبیاری غالب ذرت علوفه‌ای است. بررسی فواصل مختلف آبیاری نشان داد در سناریوی افزایش فاصله آبیاری ۱۲روزه (F12) با حفظ بهره‌وری مطلوب و تقریباً با پذیرش کاهش عملکرد ۳/۵ درصد، به میزان ۰/۹ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود. بنابراین، گزینه‌های کم‌آبیاری در سطح ۶۰ درصد (IRR60%) و دور آبیاری ۱۲ روزه (F12) خواهد بود (جدول ۱۱). میزان عملکرد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای در شرایط موجود به ترتیب برابر با ۱۹/۸ تن در هکتار و ۳/۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و پس از اعمال سناریو کم‌آبیاری برابر با به ترتیب ۱۹/۵ تن در هکتار (۲ درصد کاهش) و ۴/۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب (۲۲ درصد افزایش) خواهد بود (شکل ۴). نتایج مطالعات امیری و خورسند (Amiri & Khorsand, 2018) و قربانیان کردآبادی و همکاران (Ghorbanian Kurdabadi *et al.*, 2013) با بررسی اثر کم‌آبیاری برای ذرت نشان داد که با مدیریت کم‌آبیاری می‌توان با حفظ عملکرد مطلوب و کاهش مصرف آب آبیاری، کارایی مصرف آب را افزایش داد که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد.

بررسی سناریوی کم‌آبیاری برای یونجه با مدل AquaCrop نشان داد کم‌آبیاری در سطح ۸۰ درصد (IRR80%) با پذیرش ۱۰ درصد کاهش عملکرد، به میزان ۳/۰۵ میلیون مترمکعب و در کم‌آبیاری در سطح ۶۰ درصد (IRR60%) با پذیرش ۱۷/۵ درصد کاهش عملکرد به میزان ۶/۱ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود. بررسی فاصله‌های مختلف آبیاری نتایج نشان داد در فاصلهٔ آبیاری ۱۵ روزه (F15) با حفظ بهره‌وری مطلوب و تقریباً با پذیرش کاهش عملکرد ۷/۵ درصد، به میزان ۰/۹ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی خواهد شد. در سناریوی افزایش دور آبیاری ۱۸ روزه (F18) صرفه‌جویی قابل توجهی به میزان ۱/۹۸ میلیون مترمکعب ایجاد خواهد شد اما چون کاهش عملکرد به میزان ۲۰ درصد اتفاق می‌افتد به لحاظ اقتصادی برای کشاورز مطلوب نخواهد بود. گزینه‌های مطلوب کم‌آبیاری در سطح ۸۰ درصد (IRR80%) و دور آبیاری ۱۵ روزه (F15) خواهد بود (جدول ۱۱).

میزان عملکرد و بهره‌وری آب محصول یونجه در شرایط موجود به ترتیب برابر با ۴/۰ تن در هکتار و ۰/۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب و پس از اعمال سناریوی کم‌آبیاری به ترتیب برابر با ۳/۶ تن در هکتار (۱۰ درصد کاهش) و ۰/۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب (۴ درصد افزایش) است (شکل ۴). رمضانی و همکاران (Ramezani *et al.*, 2017) نیز برداشت‌های مختلف گیاه یونجه را در اردستان با استفاده از مدل AquaCrop

ارزیابی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داده AquaCrop مدل گیاهی قدرتمند و با ارزشی برای بهبود مدیریت آب در مزرعه و محاسبه بهره‌وری آب یونجه است. به طور کلی بررسی‌ها نشان می‌دهد با اتخاذ برترین سناریوهای کم‌آبیاری برای گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه در سطح ۷۵۹۶ هکتار (معادل ۷۵/۸ درصد از کل سطح زیر کشت محصولات زراعی) در دشت هشتگرد، صرفه‌جویی قابل توجهی به میزان ۱۰/۵ میلیون مترمکعب در سطح کل دشت اتفاق خواهد افتاد (جدول ۱۱).



شکل ٤- مقدار عملکرد و بهره‌وری آب برای محصول گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه در شرایط موجود (Y, WP) و بعد از اعمال سناریو کم‌آبیاری (Y*, WP*)

Figure 4- The amount of yield and water productivity for wheat, barley, forage maize and alfalfa crops under existing conditions (Y, WP) and after applying the deficit irrigation scenario (Y*, WP*)

جدول ۱۱- صرفه جویی در مصرف آب برای محصولات مختلف پس از اعمال سناریوها
Table 11- Water savings for different crops after applying the scenarios

محصول Crop	سناریو برتر Optimal scenario	مساحت Area		صرفه‌جویی آب (میلیون مترمکعب) Water savings (MCM)
		هکتار ha	درصد %	
گندم Wheat	IRR80-IF25	۲۶۹۱	۲۶/۸	۱/۷۲
جو Barely	IRR80-IF25	۱۰۰۰	۱۰/۰	۱/۰۸
ذرت علوفه‌ای Forage maize	IRR60-IF12	۲۰۶۵	۲۰/۶	۴/۷۱
یونجه Alfaalfa	IRR80-IF20	۱۸۴۰	۱۸/۴	۳/۱
کل Total	-	**۷۵۹۶**	**۷۵/۸**	**۱۰/۵۳**

نتیجه‌گیری

وضعیت کنونی دشت هشتگرد حاصل عملکرد مجموعه‌ای از عوامل انسانی و طبیعی طی دهه‌های گذشته است و احیاء و تعادل‌بخشی آب زیرزمینی دشت در اولویت قرار دارد. در این مطالعه، وضعیت منابع و مصارف دشت هشتگرد در استان البرز برآورد شد. به طور کلی بر اساس آمار درازمدت سطح آب زیرزمینی (۹۹-۱۳۷۰) به‌طور متوسط سالانه حدود ۶۸ سانتی‌متر افت دارد و میزان سالیانه متوسط کسری مخزن برابر با ۱۶/۸۲ میلیون مترمکعب است. الگوی کشت منطقه شامل گندم پاییزه، جو پاییزه، ذرت علوفه‌ای و یونجه و عمده محصولات باغی در این منطقه هلو، آلوچه، شلیل و سیب است. از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی و مقدار آب مصرفی در منطقه استفاده شد. واسنجی مدل AquaCrop برای شرایط منطقه‌ای و بر اساس عملکرد محصولات زراعی نشان داد این مدل به‌خوبی می‌تواند عملکرد محصولات زراعی مورد مطالعه را با کم‌ترین میزان خطای نسبی (RE) برای گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه برای دشت هشتگرد در مرحلهٔ واسنجی مدل شبیه‌سازی کند. راهکارهای عملی و کم‌هزینه برای صرفه‌جویی در مصرف آب با حداقل هزینه مانند تغییر تاریخ کاشت، الگوهای مختلف کم‌آبیاری نیز بررسی شدند.

یکی از گزینه‌های کاهش برداشت از منابع آب در مطالعهٔ حاضر، با توجه به پایین بودن راندمان آبیاری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ضعف‌های مدیریت آب کشاورزی، اثربخشی ارتقاء راندمان آبیاری به راندمان برتر موجود در منطقه به‌عنوان راهکار مدیریتی قابل دستیابی، بدون تغییر روش آبیاری در دشت هشتگرد است. بررسی‌ها نشان داد، با توجه به سطوح ارتقا راندمان در مناطق مختلف و برای کشت‌های مختلف منجر به صرفه‌جویی به میزان ۱۷/۷میلیون مترمکعب (۵/۹ درصد) صرفه‌جویی در مصرف آب تخصیصی خواهد شد که می‌توان در شرائط کم‌آبی امکان تامین آب مورد نیاز محصولات را بدون کاهش عملکرد فراهم خواهد کرد. در عین حال، از گزینهٔ مدیریتی تغییر تاریخ کاشت بر میزان نیاز خالص آبیاری در محصولات مختلف با توجه به امکان کاهش نیاز خالص آبی گیاه به‌دلیل کاهش طول دورهٔ رشد و امکان افزایش بهره‌وری از میزان بارش و نهایتاً تاثیر آن در میزان صرفه‌جویی آب مورد بررسی و نشان داده شد با انتخاب تاریخ کاشت بهینه (با توجه به دامنهٔ تاریخ کشت متداول در منطقه) برای محصولات غالب محدودهٔ دشت هشتگرد به کاهش نیاز ناخالص آبیاری به میزان ۲/۴ میلیون مترمکعب (۰/۸ درصد) می‌انجامد. گزینهٔ دیگر مدیریتی، اعمال کم‌آبیاری تحت الگوهای مدیریتی مختلف برای محصولات غالب زراعی، نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری و نیز با مدیریت دورهای آبیاری صرفه‌جویی قابل توجهی در میزان آب مورد نیاز خواهد شد. با اعمال کم‌آبیاری می‌توان به میزان ۱۹/۳ میلیون مترمکعب(۶/۰ درصد) در دشت هشتگرد در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در بسیاری از مواقع می‌توان بدون زیر بار رفتن هزینه‌های کلان برای تامین امکانات و تجهیزات مدرن، در شرایط مدیریتی برتر موجود در منطقه با اعمال سناریوهای مختلف از جمله بهبود راندمان، تغییر تاریخ کاشت و کم‌آبیاری در مصرف آب آبیاری مورد نیاز صرفه‌جویی قابل توجهی کرد. سهم هر کشت در میزان صرفه‌جویی طبیعتاً متناسب است با متوسط آب مصرفی در هکتار و سطح اراضی تحت هر کشت.

مراجع

Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T. B. S., Singh, M., Pathak, H., & Ahmad, T. (2012). Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110: 55-66.

Agricultural Jihad. (2021). Alborz province agricultural statistics in the hydrological year 2019-2020, 84 pp.

Alborz Regional Water Organization. (2020). Investigating the state of water resources and annual consumption of Alborz province in the hydrological year 2019-2020. Iran Water Resources Management Company, Water Resources Basic Studies Office. 37 pp.

Alizadeh, H.A., Nazari, B., Parsinejad, M., Ramezani, Eetedali, H., & Janbaz, H.R. (2011). Evaluation of AquaCrop Model on Wheat Deficit Irrigation in Karaj area. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 4(2), 273. (In persian)

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations 56: 97-156.

Amiri, E., & Khorsand, A. (2018). Evaluation of Aquacrop model to predict maize total biomass and grain yield under different water regimes and fertilizer. *Plant Ecophysiology*, 10(33), 174-185. (In persian)

Amiri, E., Bahrani, A., Khorsand, A., & Haghjoo, M. (2016). Evaluating AquaCrop Model Performance to Predict Grain Yield and Wheat Biomass, Under Water Stress. *Water and Soil Science*, 25(4/2), 217-229. (In persian)

Amiri, E., Khorsand, A., Daneshian, J., & Yousefi, M. (2018). Predicting biomass and grain yield in canola under different water regimes and fertilizers using AquaCrop model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(1), 57-72. (In persian)

Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A., & Rahnama. A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agriculture Water Management*, 100 (1), 1-8.

Consulting engineers for water and sustainable development. (2009). Studies on the updating of the balance of water resources, the study areas of the Salt Lake watershed, water balance report, sustainable water and development consulting engineers. *Appendix No. 5*, 79 pp. (In persian)

Djaman, K. (2011). Crop evapotranspiration, crop coefficients, plant growth and yield parameters, and nutrient uptake dynamics of maize (Zea mays L.) under full and limited irrigation. The University of Nebraska-Lincoln.

Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. Irrigation and drainage paper, 33, 257.

Droogers, P., Immerzeel, W.W., & Lorite, I. J. (2010). Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations. *Agriculture Water Management*, 97, 1351–1359.

Eskandaripour, R., Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Zeinalzadeh, K., & Norjoo, A. (2020). Investigation of Polyethylene Mulch on Improvement of Tomato Water Use Efficiency using AquaCrop Model. *Journal of Plant Ecophysiology*, 11(39), 71-85. (In persian)

Esmaili Falak, A., & Abbasi, F. (2024). Introduction and Analysis of Effective Megatrends in Water, Soil and Agriculture in the World and Iran Until 2050. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 24(93)*, 101-118. doi: 10.22092/idser.2024.365754.1581 (In persian)

Farahani, H. J., Steduto, P., & Oweis, T. Y. (2009). Parameterization and evaluation of AquaCrop for full and deficit irrigated cotton. *Agronmi Journal*, 101, 469-476.

Frank, A. & Bauer, A. (1995). Phyllochron difference in wheat, barley and forage grasses. *Crop Science*, 35: 19-23.

Garcia-Vila, M., Fereres, E. Mateos, L., Orgaz, F., & Steduto, P. (2009). Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. Agronmi Journal 101: 477- 487.

Ghorbanian Kurdabadi, M., Liaghat, A.M, Vatankhah, E., & Noori, H. (2013). Simulation of yield and evapotranpiration of forage maize using AquaCrop model. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 4(1), 48-64. (In persian)

Heng, L.K., Evett, S.R., Howell, T.A., & Hsiao, T.C. (2009). Calibration and testing of FAO AquaCrop model for maize in several locations. *Agronmi Journal*, 101: 488-498.

Jafari, H., & Abbasi, F. (2024). Evaluation of wheat water irrigation management in Iran with the approach of reducing the area under cultivation and improving water productivity. Iranian Journal of Soil and Water Research. doi: 10.22059/ijswr.2024.380800.669778 (In persian)

Karimi Organi, H., Rahimi Khoob, A. & Nazari Fard, M.H. (2016). Calibration and validation of Aquacrop model for berlay in Pakdasht region. *Iranain Water and Soil Research*, (3) 47, 539-549. (In persian)

Khorsand, A., Dehghanisanij, H., Heris, A.M., Asgarzadeh, H., & Rezaverdinejad, V. (2024). Calibration and evaluation of the FAO AquaCrop model for canola (Brassica napus) under full and deficit irrigation in a semi-arid region. *Applied Water Science*, 14(3), 56.

Khorsand, A., Verdinejad, V.R., & Shahidi, A. (2014). Performance evaluation of AquaCrop model to predict yield production of wheat, soil water and solute transport under water and salinity stresses. *Water and Irrigation Management*, 4(1), 89-104. (In persian)

Li, W., Song, R., Awais, M., Ji, L., Li, S., Liu, M., ... & Qi, H. (2024). Global Sensitivity Analysis of Crop Parameters Based on AquaCrop Model. Water Resources Management, 38(6), 2039-2058.

Liaghat, A. M., Mokari Ghahroodi, E., Noory, H., & Sotoudenia, A. (2015). Evaluation of Qazvin Plain Irrigation Systems Through an Assessment of Classical vs Neoclassical Irrigation Efficiencies. Iranian Journal of Soil and Water Research, 46(2), 343-351. doi: 10.22059/ijswr.2015.55938 (In persian)

Lu, Y., Wei, C., McCabe, M. F., & Sheffield, J. (2022). Multi-variable assimilation into a modified AquaCrop model for improved maize simulation without management or crop phenology information. Agricultural Water Management, 266, 107576.

McMaster, G.L., Wilhelm, W., & Morgan J. (1994). Simulating winter wheat shoot apex phenology. *The journal of agricultural science*. 119, 1-12.

Niamnsi, Y.N., & Mbue, I.N. (2009). Estimation for ground water balance based on recharge and discharge: a tool for sustainable ground water management. *Zhonghu County Alluvial Plain Journal American Science*, 5 (2), 40-83.

Nikbakht, J., & Najib, Z. (2015). Effect of irrigation efficiency increasing on groundwater level fluctuations (Cast study: Ajab-Shir Plain, East Azarbaijan). *Water and Irrigation Management, 5*(1), 115-127. (In persian)

Parsinejad, M., Raja, O., & Chehrenegar, B. (2022). Practical analysis of remote sensing estimations of water use for major crops throughout the Urmia Lake basin. *Agricultural water management*, *260*, 107232.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T., & Fereres, E. (2016). Refrence Manual Aquacrop Version 5.0 Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. & Freres, E. (2012). Refrence Manual Aquacrop, FAO, *Land and Water Division*, Rome Italy.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres. E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agron. J.* 101, 438–447.

Raja, O., & Parsinejad, M. (2023). Cost-effective strategies to improve crop water productivity—case study: Bakhtegan and Maharloo, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *20*(1), 883-894.

Raja, O., Parsinejad, M., & Sohrabi, T. (2019). Evaluation of managment strategies to reduce water use in Marvdasht-Kharameh study area, *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 8(4), 67-86. (In persian)

Raja, O., Parsinejad, M., Sohrabi, T., & Ahmadaali, Kh. (2019). Status Investigation of the Marvdasht-Kharameh water resources using sustainability analysis indicators, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), 897-909. (In persian)

Ramezani Etedali, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., & Tavakkoli, A. (2016). AquaCrop Model Calibration and Evaluation in Irrigation Management for Main Grains. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *10*(3), 389-397. (In persian)

Ramezani, F., Kaviani, A., & Ramezani Etedali, H. (2017). Evaluation of AquaCrop Model for different Harvesting time of Alfalfa in Ardestan. *Water and Soil*, 31(3), 738-753. (In persian)

Ramezani, M., Babazadeh, H., & Sarai Tabrizi, M. (2018). Simulating Barley Yield under Different Irrigation Levels by using AquaCrop Model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(4), 161-172. (In persian)

Rasaei, A. H., Sharafati, A., & Kardan Moghaddam, H. (2020). Analysis of Groundwater Uncertainty in Climate Change (Case study: Hashtgerd Plain). *Iranian journal of Ecohydrology*, 7(3), 815-827. (In persian)

Rezaverdinejad, V., Khorsand, A., & Shahidi, A. (2014). Evaluation and comparison of AquaCrop and FAO models for yield prediction of winter wheat under environmental stresses. *J. Biodivers. Environ. Sci*, 4(6), 438-449.

Salemi, H.R., Mohd Soom, M.A., Lee, T.S., Mousavi, S.F., Ganji, A., & Yusoff, M.K. (2011). Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*, 610, 2204-2215.

Schiermeier, Q. 2014. Water risk as world warms. Nature, 505, 10‑11.

Shirazi, M., & Nateghi, S. (2020). Determination of the Relationships Between the Meteorological and Hydrological Droughts in the Hashtgerd Plain. *Watershed Management Research, 33*(1), 72-87. (In persian)

Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water*. FAO Roma.

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: 426– 437.

Taheri Tizro, A., Nozari, H., & Alikhani, H. (2016). Spatio-Temporal Water Levels Forecasting by Time Series-Geostatistics as a Hybrid Model in Hashtgerd Plain-Alborz Province. *Journal of Water and Soil Science*, 20 (76), 99-113. (In persian)

Tavakoli, A.R., Moghadam M.M. & Sepaskhah, A.R. (2015). Evaluation of the AquaCrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. *Agricultural Water Management*, 161: 136-146.

UNESCO. (2010). science report 2010, The Current Status of Science around the World, pp.542.

Wali, U.S., Walia, S.S., Sidhu, A.S., & Nayyar, S. (2014). Productivity of direct seeded rice in relation to different dates of sowing and varieties in central Punjab. Journal of Crop and Weed, 10 (1): 126-129.

Xie, Z., Kong, J., Tang, M., Luo, Z., Li, D., Liu, R., ... & Zhang, C. (2023). Modelling winter rapeseed (Brassica napus L.) growth and yield under different sowing dates and densities using AquaCrop model. *Agronomy*, *13*(2), 367.

Zhang, C., Kong, J., Tang, M., Lin, W., Ding, D., & Feng, H. (2023). Improving maize growth and development simulation by integrating temperature compensatory effect under plastic film mulching into the AquaCrop model. *The Crop Journal*, *11*(5), 1559-1568.

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research/Vol.25/No.96 Autumn /2024/P: 1-26

Original Research

Evaluation the Effectiveness of Management Strategies to Reduce Agricultural Water Use by Using the AquaCrop Model (Case Study: Hashtgerd plain)

***O. Raja, S. Veysi, A. Barzegar**

***Corresponding Author:** [1] Researcher, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
Received: 13 October 2024, **Accepted:** 5 November 2024
Email: omid.raja@ut.ac.ir
https://doi.org/ 10.22092/idser.2024.367320.1595

Extend Abstract

Intouduction

Many factors have contributed to the drop in the water table of groundwater, including the increase in cultivated area, decrease in rainfall, climate change, and the continuation of drought in recent years, and withdrawing excessive amounts of surface water sources and groundwater from unauthorized wells, which has faced serious challenges in the water sector in Alborz province. The Hashtgerd plain is located in the Alborz province. The current situation of the Hashtgerd plain is the result of a series of human and natural factors over the past few decades, and the restoration and balance of the underground water of the plain is a priority. According to long-term statistics, the groundwater level has decreased by 19.8 m in 29 years (1990-2019) on average, there is a drop in the groundwater level of about 68 cm. per year. The total aquifer deficit is 487.85 million cubic meters, and the average annual amount of the aquifer deficit is 16.82 million cubic meters (6.2%). Given these conditions, it is essential to apply effective solutions for optimal and efficient water management.

Methodology

The purpose of this study was to provide practical and low-cost solutions to save water consumption in Hashtgerd Plain. There are different solutions with minimal cost, such as improving irrigation efficiency, changing the planting date, and different patterns of deficit irrigation. The approach of this study is to present and examine solutions that do not require changing the irrigation system or even changing the cultivation pattern and also not reducing the cultivated area in the region. It is the examination of the solutions that can be implemented at the lowest possible cost without adversely affecting the livelihood of farmers. The objective of the study was to reduce water consumption or prevent from excessive groundwater of Hashtgerd plain aquifer. The proposed solutions do not require new tools such as precision leveling machines and, so on. Each of the above strategies was evaluated based on the actual conditions in the region. The main objective was to evaluate and estimate the water requirements of the dominant crops in the Hashtgerd Plain, and to present different scenarios for improving irrigation efficiency according to the superior conditions in the region. The feasibility of saving water consumption through strategies to change the planting date and deficit irrigation was evaluated using the AquaCrop 6.0 model.

Results and discussion

In this study, the AquaCrop model was used to simulate the yield of crops and the amount of water use in the region. The calibration of the AquaCrop model for regional conditions has demonstrated that the AquaCrop model is capable of predicting crop yield with the lowest relative error (RE) for wheat, barley,

fodder corn, and alfalfa for the plains during the calibration phase of the simulation model. According to the levels of efficiency improvement in different regions and for different crops, it will lead to savings of 17.7 million cubic meters (5.9%) in the amount of allocated water consumption. This will can provide the possibility of supplying water to a larger area of land without reducing yield under water scarcity conditions. The outcomes of the scenario involving a change in planting date through AquaCrop model simulation demonstrated that this management pattern has the potential to reduce water consumption by 2.4 million cubic meters (0.8%) in the region. In addition, different levels of deficit irrigation can save 19.3 million cubic meters of water consumption.

Conclusions

The obtained results show that in many cases, it is possible to provide without modern facilities and huge costs, applying different scenarios such as improving efficiency, changing planting dates and deficit irrigation has achieved significant savings in the required irrigation water consumption. Naturally, the share of each crop in the amount of savings is proportional to the average water consumption per hectare and the area of land under each crop. In general, the AcuCrop model can be used as a practical tool for simulating crop yield and evaluating management scenarios.

Keywords: Alborz Province; Deficit Irrigation; Irrigation Efficiency; Optimal Planting Date; Water Saving