

Investigation of the Effect of Adjustment of Estimation of Agricultural Water Demand on the Performance of Water Distribution System in Irrigation Districts (Case Study of Roodasht Irrigation District, Esfahan)

HABIB KARIMI AVARGANI¹, SEIED MEHDY HASHEMY SHAHDANY^{*1}, ABDOLMAJID LIAGHAT², SEYED EBRAHIM HASHEMI GARMDARREH¹

1. Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: Sep. 8, 2020- Revised: Oct. 29, 2020- Accepted: Nov. 17, 2020)

ABSTRACT

The poor performance of irrigation districts led to the unreliable distribution of surface water among farmers. Therefore, it is necessary to improve the water distribution in the irrigation district. For this purpose, there are two practical solutions, improve operational method and adjustment of estimation of agricultural water demand, each of which has been researched separately. In this study, for the first time, the effect of improving the adjustment of estimation of water demand was investigated by developing and combining AquaCrop model and ICSS hydrodynamic model for Roodasht irrigation district under a water shortage scenario in the status quo. For this purpose, the daily agricultural water demand was estimated for each of the secondary irrigated units based on the cultivation pattern by using the AquaCrop model. After calculating the average daily flow rate to each off-take (the output of the water distribution simulator model in the main canal) the adequacy index was calculated for two conditions, 1) with considering the amount of requirements specified by the network administrator (available condition) and 2) adjustment of water demand. The results showed that the performance evaluation indicator improved from 3% to 16% for all off-takes by adjustment of agricultural water demand. This improvement has been achieved by reducing the amount of water right in the upstream and middle of the main canal and increasing the amount of water right for downstream. Also, the equity of water distribution has improved among water users by adjustment of agricultural water demand.

Keywords: Adequacy, AquaCrop Model, ICSS Hydrodynamic Model, Irrigation Canal, Operational Management.

*Corresponding Author's Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

بررسی تأثیر تدقیق برآورد میزان تقاضای آب کشاورزی در عملکرد سیستم توزیع آب در شبکه‌های آبیاری (مطالعه موردی شبکه آبیاری رودشت اصفهان)

حبیب کریمی اورگانی^۱، سید مهدی هاشمی شاهدانی^{۱*}، عبدالمجید لیاقت^۲، سید ابراهیم هاشمی گرم‌دره^۱

۱. گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۸/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۸/۲۷)

چکیده

عملکرد ضعیف بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری منجر به توزیع غیرمطمئن آب سطحی بین کشاورزان شده است. لذا اصلاح و بهبود نحوه توزیع آب در شبکه آبیاری امری ضروری است. برای انجام این مهم دو راهکار عملی ارتقاء شیوه بهره‌برداری و برآورد دقیق میزان تقاضای آب کشاورزی وجود دارد که در مورد هر یک به صورت جداگانه تحقیقات زیادی صورت گرفته است. در این پژوهش برای اولین بار با توسعه و تلفیق دو مدل AquaCrop و مدل هیدرودینامیک ICSS، اثر بهبود میزان دقت برآورد تقاضای آب در بهره‌برداری روزانه از شبکه آبیاری رودشت، تحت سناریوی کم‌آبی در شرایط موجود بررسی شد. بدین منظور در ابتدا میزان تقاضای روزانه آب کشاورزی برای هر منطقه زراعی درجه دو و براساس الگوی کشت موجود در منطقه با استفاده از مدل AquaCrop برآورد گردید. پس از محاسبه میزان متوسط دبی تحویلی روزانه به هر آبگیر (خروجی مدل شبیه‌ساز توزیع آب در کانال اصلی) مقدار شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب در دو حالت، (۱) با در نظر گرفتن مقدار نیاز مشخص شده توسط مدیر شبکه (شرایط موجود) و (۲) مقدار تدقیق شده تقاضا در محل آبگیر محاسبه گردید. بررسی مقادیر شاخص کفایت توزیع آب حاکی از آن است که تدقیق میزان تقاضای آب کشاورزی برای کلیه آبگیرها سبب بهبود مقدار این شاخص از ۳٪ تا ۱۶٪ شد. بهبود مذکور عمدتاً در بالادست و میان دست کانال اصلی با کاهش میزان حقابه و در پایین دست با افزایش میزان حقابه و امکان دریافت آب بیشتر محقق شده است. نتایج تحقیق نشان داد با تدقیق میزان تقاضای آب کشاورزی، عدالت توزیع آب بین آب‌بران نیز تا حدودی بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری، کانال آبیاری، کفایت توزیع آب، مدل AquaCrop، مدل هیدرودینامیک ICSS.

مقدمه

کمبود آب و فقر از مهم‌ترین چالش‌های جهانی به ویژه در مناطق خشک جهان است (Yao *et al.*, 2020). کشاورزی بخش مهمی از اقتصاد در کشورهای در حال توسعه است که با کمبود بهره‌وری در استفاده از منابع آب و کاهش منابع آب مواجه است (Li *et al.*, 2020). از بین تمام مصارف آب، کشاورزی مصرف کننده اصلی است و کشاورزی آبیاری تقریباً ۷۰ درصد از منابع آب موجود در جهان را مصرف می‌کند (Galan-Martin *et al.*, 2017). با این وجود، کمبود آب کشاورزی به دلیل رشد سریع تقاضای آب برای بخش‌های غیرکشاورزی مانند مصارف صنعتی، خانگی و زیست محیطی تحت فشارهای فزاینده‌ای قرار دارد. در مناطق کشاورزی آب مورد نیاز آبیاری از دو طریق آب سطحی و آب زیرزمینی تامین می‌گردد. با هدف استفاده موثر از منابع آب سطحی در بخش کشاورزی، برای انتقال مقدار زیادی آب از یک رودخانه و یا منبع دیگر به محل مورد نظر، شبکه‌های آبیاری

شامل شبکه‌ای از کانال‌های روباز احداث شده است. امروزه شبکه‌های آبیاری که وظیفه انتقال و توزیع منابع آب سطحی را بر عهده دارند، با اختصاص بخش اعظم نواحی آبیاری به خود، مصرف کننده عمده آب در بخش کشاورزی به‌شمار می‌روند. مطالعات و بررسی‌های مختلف در مورد نحوه عملکرد شبکه‌های آبیاری حاکی از عملکرد ضعیف مدیریت بهره‌برداری این شبکه‌ها است (Nikmehr *et al.*, 2018). از جمله این عوامل می‌توان به نقص در طراحی و اجرا، عدم اجرای منظم برنامه‌های دوره بازرسی و نگهداری و بهره‌برداری با رویکرد بالا به پایین که منجر به ناعدالتی فاحش در توزیع آب سطحی بین کشاورزان واقع در بالادست و پایین دست شبکه آبیاری شده اشاره نمود (Monem *et al.*, 2018). تحقیقات صورت گرفته گویای این است که تلفات قابل توجهی در بخش انتقال و توزیع آب در شبکه‌های آبیاری کشور رخ می‌دهد. این مقدار تلفات با توجه به شرایط نگهداری و مدیریتی شبکه‌ها در محدوده گسترده‌ای، کمتر از ۱۵ درصد تا

سناریوهای مختلف با استفاده از مدل هیدرودینامیکی CANALMAN مورد ارزیابی قرار دادند. (2010) Bhadra *et al.* با استفاده از مدل هیدرودینامیکی^۱ IRCIM راهکار تغییر برنامه توزیع آب در یکی از شبکه‌های هند را جهت بهبود بهره‌وری و رفع کم‌آبی، شبیه‌سازی و ارزیابی نمود. (2005) Monem *et al.* در تحقیقی دستورالعمل مناسب بهره‌برداری کانال EIR1 شبکه دز را با استفاده از مدل هیدرودینامیکی ICSS تعیین نمودند. نتایج این تحقیق حاکی از تأثیر عملیات بهره‌برداری ارائه شده در کاهش حجم تلفات و کمبودها در نتایج شبیه‌سازی بوده است به‌گونه‌ای که بهبود راندمان و کفایت تحویل آب در گزینه‌های مختلف بهره‌برداری تا حداکثر ۵ درصد افزایش یافت. (2017) Afrasiabikia *et al.* از مدل هیدرودینامیکی SOBEK جهت شبیه‌سازی کانال اصلی شبکه‌ی آبیاری درودزن استفاده نموده و به کمک سه شاخص کفایت، عدالت و توزیع مازاد آب، تحویل و توزیع آب را در این کانال تحت سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار دادند و بهترین سناریو جهت بهره‌برداری مطلوب در این کانال را ارائه کردند. (2019) Kaghazchi *et al.* با توسعه یک شبکه هیبرید بی‌زین^۲ با کمک مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS به شبیه‌سازی و ارزیابی توزیع و تحویل آب در کانال آبیاری اصلی تحت سناریوهای مختلف نوسان جریان کانال پرداختند. (Ebrahimiyan 2018) وضعیت هیدرولیکی جریان در شبکه آبیاری و زهکشی عقیلی را به کمک مدل ICSS شبیه‌سازی و تحت سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار داد.

همان‌طور که اشاره شد علاوه بر لزوم بهبود عملکرد سیستم توزیع آب (مدیریت آب در خارج از مزرعه) به‌کارگیری روش‌های کارآمد جهت محاسبه و برآورد دقیق‌تر میزان تقاضای آب در محدوده‌های مختلف یک شبکه آبیاری (مدیریت آب داخل مزرعه) لازم می‌باشد. در این زمینه از مدل‌های گیاهی و تکنیک‌های سنجش از دور بهره برده می‌شود. (2018) Kamali *et al.* با استفاده از تصاویر لندست و الگوریتم سبال، نیاز آبی و ضریب گیاهی ذرت در اراضی ایستگاه زراعی بابل در استان مازندران را محاسبه نمودند. (2017) Karbasi *et al.* با استفاده از ماهواره‌ی Landsat 8، نیاز آبی گیاهان ذرت و یونجه را تعیین نمودند. (2009) Casa *et al.* به کمک تصاویر ماهواره‌ای و روشی مبتنی بر سنجش از دور و GIS نیاز آبی محصول برای دشت پنتینا در ایتالیا را برآورد نمودند. محققین بسیاری با استفاده از معادله بیلان انرژی و تلفیق آن با تکنیک سنجش از دور، میزان

مقادیر زیادی در بازه ۶۰-۴۰ درصد گزارش شده‌اند (Karimi *et al.*, 2020). به طور میانگین تلفات انتقال و توزیع آب در شبکه‌های آبیاری کشور در حدود ۳۰ درصد می‌باشد (Abbasi *et al.*, 2017). به همین دلیل توجه بسیاری از محققان معطوف به اصلاح و بهبود نحوه توزیع آب در شبکه آبیاری شده است که برای انجام این مهم دو راهکار عملی ارتقاء شیوه بهره‌برداری و برآورد دقیق میزان تقاضای آب کشاورزی پیشنهاد شده است.

مدیریت بهینه و یکپارچه آب در شبکه‌های آبیاری مستلزم در نظر گرفتن تخصیص بهینه آب به محصولات مختلف در سطح مزرعه و برنامه‌ریزی بهینه انتقال آب در سطح کانال است که غالباً مورد غفلت قرار می‌گیرد. در پژوهشی یک روش گام به گام یکپارچه برای تخصیص بهینه آب در کانال‌های آبیاری ارائه گردید. برای این منظور سه زیرمدل برای تخصیص بهینه آب بین محصولات مختلف، توزیع بهینه آب در طی دوره رشد هر محصول و تحویل بهینه آب بین انشعابات کانال‌ها تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. مدل‌های تهیه شده بر روی کانال توزیع K منشعب از کانال A از شبکه آبیاری مغان به‌کار گرفته شد و با هدف بیشینه نمودن سود کل، تخصیص آب بین محصولات مختلف، توزیع آن در طول دوره رشد هر یک از آنها و عوامل تحویل آب برای این کانال به صورت بهینه تعیین گردید. سه سناریوی مختلف مقدار آب، شامل شرایط نرمال، ۲۵ و ۵۰ درصد کمبود آب در فرآیند مدل‌سازی مورد توجه قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که علیرغم کاهش سود کل در سناریوهای ۲۵ و ۵۰ درصد کمبود آب نسبت به شرایط نرمال، بهره‌وری مصرف آب به‌ترتیب به‌میزان ۲۴ و ۴۰ درصد افزایش یافته است، همچنین با استفاده از یک روش یکپارچه، حداکثر سود در سطح مزرعه و حداکثر کفایت با حداقل تلفات آب در سطح کانال به‌طور همزمان برآورده می‌شود (Kanooni and Monem, 2014; Kanooni and Monem, 2016).

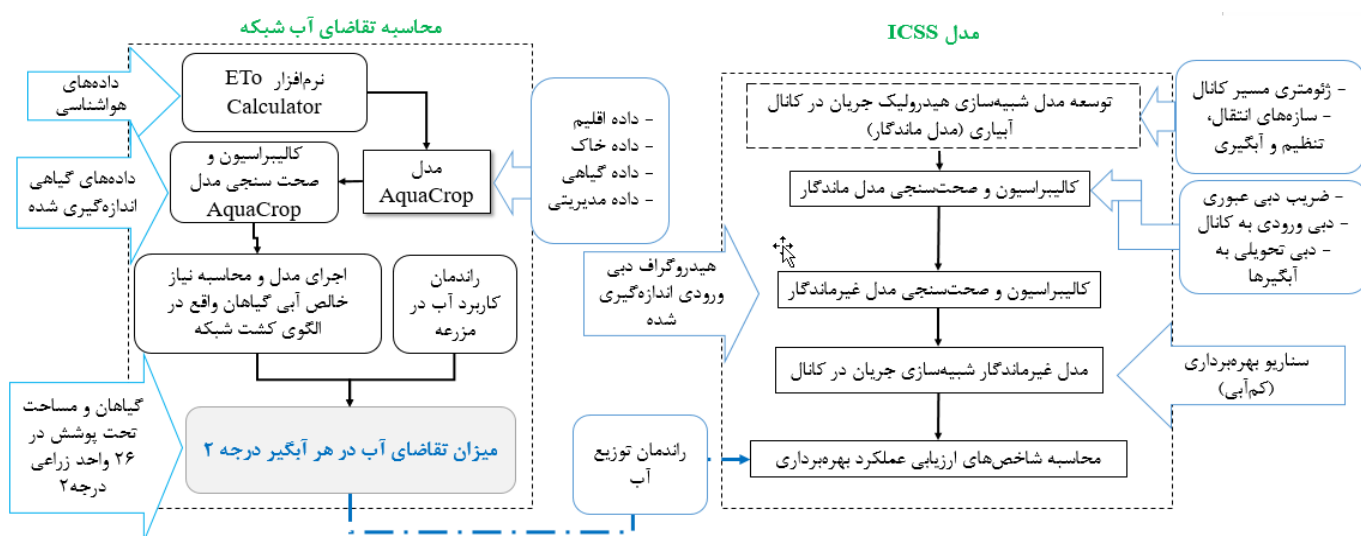
در دو دهه اخیر کاربرد مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی عملکرد بهره‌برداری از شبکه کانال‌های آبیاری، در راستای (۱) شبیه‌سازی وضعیت بهره‌برداری حال حاضر، (۲) ارزیابی عملکرد توزیع آب سطحی و (۳) بررسی استراتژی‌های مختلف مدیریتی به‌منظور بهبود توزیع آب در کانال آبیاری، روند رو به رشدی داشته است. (2015) Dejen با هدف بهبود عملکرد هیدرولیکی سیستم توزیع آب کشاورزی در شبکه ماتاها در کشور اتیوپی، شبیه‌سازی توزیع آب را با استفاده از مدل DUFLOW انجام داده و با به‌کارگیری شاخص‌های کفایت، راندمان، عدالت و پایداری، روش‌های بهبود عملکرد را مورد ارزیابی قرار داد. (Ghumman *et al.*, 2018) عملکرد بهره‌برداری کانال swat پاکستان را تحت

توسعه داده شده تحت سناریوی کم‌آبی در شرایط موجود در شبکه آبیاری مورد مطالعه بررسی شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در دو بخش کلی اجرا گردید. بخش اول مربوط به محاسبه میزان تقاضای آب با استفاده از مدل گیاهی AquaCrop می‌باشد که ابتدا با استفاده از نرم‌افزار ET_o Calculator میزان تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه و نتیجه وارد مدل AquaCrop گردید. با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای اندازه‌گیری شده، کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل صورت گرفت. با اجرای مدل با در نظر گرفتن راندمان کاربرد آب در مزرعه و با در اختیار داشتن نوع و سطح زیرکشت هر یک از محصولات در نواحی کانال‌های درجه ۲ شبکه، مقدار تقاضای آب در هر یک از آبگیرهای درجه ۲ محاسبه گردید که این خروجی، ورودی مدل هیدرودینامیک می‌باشد. در بخش دوم به ارزیابی عملکرد بهره‌برداری شبکه با استفاده از مدل هیدرودینامیکی ICSS پرداخته شده است. ابتدا مدل شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال آبیاری در حالت ماندگار توسعه یافت و سپس کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل ماندگار و غیرماندگار صورت گرفت و شبیه‌سازی جریان در کانال تحت سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی انجام شد و شاخص ارزیابی عملکرد بهره‌برداری استخراج گردید. روند کلی پژوهش در شکل (۱) نمایش داده شده است.

نیاز آبی گیاه را محاسبه نموده و نتایج قابل قبولی کسب کردند (Filgueiras et al., 2020). مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه نیز با به کارگیری روابط پیچیده‌تری در عین حال دقیق‌تر، میزان نیاز آبی گیاه را برآورد می‌نمایند. مطالعات بسیاری بر روی نیاز آبی گیاهان و برنامه‌ریزی آبیاری با استفاده از مدل‌هایی همچون EPIC، WOFOST، DSSAT، SWAP و ... در سراسر دنیا انجام شده است (Ran et al., 2020). مدل AquaCrop که توسط سازمان خوار و بار جهانی (FAO) ارائه شده است، در عین سهولت کار، توانمندی و دقت بالایی در برآورد نیاز آبی گیاهان دارد و کمک شایانی به برنامه‌ریزی هر چه بهتر آبیاری مزارع در شرایط مختلف فراهم می‌آورد، به همین دلیل مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است (Ammar et al., 2019). بررسی مطالعات مختلف صورت گرفته حاکی از آن است که اثرات به‌کارگیری دو راهکار مدیریت آب خارج (بهبود سیستم توزیع) و داخل مزرعه (تدقیق میزان تقاضای آب)، عمدتاً به صورت جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش در نظر است برای اولین بار با توسعه و تلفیق دو مدل ریاضی (۱) مدل گیاهی AquaCrop به منظور برآورد میزان دقیق تقاضای روزانه آب کشاورزی برای هر منطقه زراعی درجه دو و براساس الگوی کشت موجود در منطقه، (۲) مدل ریاضی شبیه‌سازی توزیع آب در یک کانال اصلی آبیاری با استفاده از مدل هیدرودینامیک ICSS، اثر بهبود میزان دقت برآورد تقاضای آب را در بهره‌برداری روزانه یک شبکه آبیاری بررسی نماید. در این راستا عملکرد توزیع آب توسط مدل تلفیقی



شکل ۱- روند کلی انجام پژوهش شامل مراحل توسعه مدل‌های ریاضی AquaCrop و ICSS و نحوه ارتباط مدل‌ها

فاصله ۳۰ الی ۱۰۰ کیلومتری شرق و جنوب شرقی اصفهان بین طول‌های جغرافیایی ۵۲ درجه تا ۵۲ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و ۳۲ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی واقع

معرفی منطقه مطالعاتی

شبکه آبیاری رودشت آخرین شبکه از شش شبکه آبیاری می‌باشد که از رودخانه زاینده‌رود آبیاری می‌نماید. منطقه رودشت در

سرریزهای نوک اردکی، شیب کف ۰/۰۰۳، ضریب زبری مانینگ ۰/۱۷، شیب جانبی ۱/۵ و محدوده عمق ۴/۵-۲/۵ متر می‌باشد. مشخصات هیدرولیکی آبیگرها در جدول (۱) ارائه شده است. داده‌های روزانه هواشناسی از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک ورزنه با مختصات جغرافیایی به طول ۳۷° ۵۲' و عرض ۲۴° ۳۲' و ارتفاع ۱۴۵۰ از سطح دریا جمع‌آوری و وارد مدل گردید. تبخیر و تعرق مرجع برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های هواشناسی و به کمک نرم‌افزار ET_o Calculator (اساس محاسبه تبخیر و تعرق مرجع در این نرم‌افزار معادله پنمن-مونتیت-فائو می‌باشد) محاسبه گردید.

شده است. این منطقه دارای آب و هوای گرم و خشک (به‌ویژه در بهار و تابستان) و اقلیم نیمه‌بیابانی شدید می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه حدود ۸۸ میلی‌متر و مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه (ET_o) ۱۵۳۷ میلی‌متر گزارش شده است. این منطقه گسترده در دو سوی زاینده رود به دو بخش رودش شمالی و رودش جنوبی (یکی در شمال و دیگری در جنوب زاینده رود) تقسیم شده است. شبکه آبیاری این منطقه حدود ۴۵۰۰۰ هکتار از اراضی مربوطه را تحت پوشش قرار می‌دهد. در این پژوهش کانال اصلی شاخه چپ رودش شمالی به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید که دارای ۲۶ آبیگر (برای آبیگری کانال‌های فرعی درجه دو) و ۱۴ سازه تنظیم از نوع

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی آبیگرهای واقع در کانال اصلی رودش

شماره آبیگر	دریچه آبیگر	نوع آبیگر	سطح زیرکشت (هکتار)	دبی مورد تقاضا (لیتر بر ثانیه)	شماره آبیگر	دریچه آبیگر	نوع آبیگر	سطح زیرکشت (هکتار)	دبی مورد تقاضا (لیتر بر ثانیه)
۱	P0R	L2	۱۷۰	۵۵	۱۴	CL7	XX2	۶۲۸	۳۳
۲	P0L	L2	۵۴۸	۲۱	۱۵	PL7	XX2	۶۸۶	۱۲
۳	CL1	XX2	۶۴۰	۱۵	۱۶	CL8	L2	۶۵۱	۱۲
۴	CL2	XX2	۱۲۸۷	۷۹	۱۷	PL8	XX2	۷۷۸	۱۲
۵	PL2	XX2	۲۸۰	۷۳	۱۸	CL9	L2	۷۸۵	۵۸
۶	CL3	XX2	۳۷۵	۲۱	۱۹	PL9	XX2	۷۲۸	۵۸
۷	PL3	XX2	۴۲۸	۴۹	۲۰	CL10	L2	۳۴۰	۵۸
۸	CL4	XX2	۴۵۸	۵۵	۲۱	CL11	L2	۴۲۰	۱۷۵
۹	PL4	XX2	۵۵۸	۱۰۰	۲۲	PL11	XX2	۳۳۰	۶۰
۱۰	CL5	XX2	۵۰۸	۲۱	۲۳	CL12	XX2	۴۷۳	۶۰
۱۱	PL5	XX2	۵۳۹	۲۱	۲۴	CL13	L2	۲۲۰	۱۷۵
۱۲	CL6	L2	۷۰۹	۲۴	۲۵	PL13	XX2	۱۵۵	۶۱
۱۳	PL6	XX2	۸۴۰	۳۳	۲۶	CL14	XX2	۱۷۵	۱۱۲

جدول ۲- میانگین داده‌های روزانه هواشناسی منطقه مورد مطالعه

ماه	بارش (میلیمتر)	رطوبت‌هوا (%)	دمای حداکثر (°C)	دمای حداقل (°C)	سرعت باد (متر بر ثانیه)	تبخیر و تعرق مرجع (میلیمتر)
فروردین	۰/۷۶	۳۷/۹	۲۲/۱	۶/۱	۱/۷۹	۴/۲۵
اردیبهشت	۰/۰۸	۳۰	۲۷/۹	۱۰/۹	۱/۲۳	۵/۱۵
خرداد	۰	۱۸/۹	۳۵/۴	۱۶/۳	۱/۲۳	۶/۵
تیر	۰	۱۸/۵	۳۸/۱	۱۸/۷	۰/۹۳	۶/۳۲
مرداد	۰	۲۰/۲	۳۵/۸	۱۶/۲	۰/۵۶	۵/۱۶
شهریور	۰	۲۶/۹	۳۲/۸	۱۴/۶	۰/۸۷	۴/۵۲
مهر	۰	۲۷/۷	۲۹	۱۰	۰/۷۴	۳/۲۹
آبان	۰/۲۹	۴۴/۰۲	۱۷/۶	۱/۶	۰/۵۴	۱/۱۷
آذر	۰/۶	۵۷/۷	۱۳/۱	-۰/۱۸	۰/۳۸	۱/۰۴
دی	۰/۰۴	۴۷/۳	۱۲/۶	-۲/۵	۰/۷۷	۱/۳
بهمن	۰/۳۳	۴۱/۹	۱۶/۲	-۰/۲	۱/۴۳	۲/۲۲
اسفند	۰/۲۳	۳۹/۸	۱۴/۹	۰/۴	۰/۹۲	۲/۳۹

در منطقه مورد مطالعه شامل کارشناسان کشاورزی منطقه، گزارش جامع حوضه زاینده‌رود استخراج گردید (Mousavi, Zadeh et al., 2018; Abbasi et al., 2017; Ramezani et al.,

اطلاعات مورد نیاز مدل AquaCrop از جمله اطلاعات و خصوصیات خاک، ضرایب گیاهی و داده‌های گیاهی از جمله تاریخ کاشت و دوره‌های فیزیولوژیکی گیاهان با استفاده از منابع موجود

پارامترهای گیاهی و خاک ایران، دوره ۵۲، شماره ۴، تیر ۱۴۰۰ (علمی - پژوهشی) ۱۱۵۴
 (2017; Raber et al., 2015). پارامترهای گیاهی وارده به مدل گیاهی AquaCrop در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- پارامترهای گیاهی در مدل AquaCrop برای گیاهان واقع در الگوی کشت

پارامتر محصول	مساحت زیرکشت هکتار	پوشش اولیه درصد	حداکثر پوشش گیاهی درصد	CGC*	CDC**	رسیدن به پوشش کامل روز	رسیدگی کامل روز
گندم	۱۰۳۴۳	۶/۷	۹۶	۳/۷	۷/۲	۱۵۵	۲۱۱
جو	۱۹۴۱	۶	۹۵	۴/۶	۷/۷	۱۳۰	۱۸۲
یونجه	۸۶۲	۹	۸۵	۳۶/۵	۸	۲۰	۴۶
گلرنگ	۵۴۱	۱/۵	۹۵	۹	۸/۳	۸۲	۱۱۱
چغندر قند	۲۲	۰/۵	۸۸	۸/۱	۵/۵	۱۰۰	۱۷۰

** ضریب کاهش پوشش گیاهی

* ضریب رشد پوشش گیاهی

مدل AquaCrop و برآورد نیاز آبی

به منظور برآورد نیاز آبی گیاهان واقع در الگوی کشت شبکه از مدل AquaCrop نسخه ۶،۱ بهره گرفته شد. AquaCrop یک مدل گیاهی ساده و کاربر دوست است که توسط سازمان فائو به منظور شبیه سازی عملکرد انواع محصولات کشاورزی در اقلیم های مختلف ارائه شده است. برتری این مدل نسبت به سایر مدل های گیاهی تعداد پارامترهای کمتر برای واسنجی می باشد. همچنین در حین سادگی و سهولت کار با آن، از توانمندی و دقت بالایی در شبیه سازی پوشش گیاهی، عملکرد محصول و نیاز آبی برخوردار برخوردار می باشد. این مدل توانایی شبیه سازی سناریوهای مختلف آبیاری را به منظور انتخاب مناسب ترین آن ها (از نظر عملکرد و کارایی مصرف آب) داشته و نهایتاً می تواند توصیه و راهکارهای مدیریتی و عملی مناسب را برای کشاورزان و بهره برداران فراهم نماید. مدل AquaCrop، بیلان آبی خاک را برای آن قسمت از پروفیل خاک که سیستم ریشه های گیاه در آن واقع شده است به صورت روزانه انجام می دهد. در این فرآیند، مدل با استفاده از مقدار آب وارد شده (از طریق بارندگی و آبیاری) و خارج شده (توسط تبخیر و تعرق از سطح خاک و گیاه) بیلان آبی خاک را محاسبه می کند. ویژگی ممتاز مدل در بیلان آب خاک، جداسازی تبخیر از تعرق است. معادله بیلان آب (۱) در طول فصل زراعی به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$I+R=E+T+D+\Delta W \quad (\text{رابطه ۱})$$

که اجزای آن شامل I: آبیاری، R: بارندگی، E: تبخیر واقعی، T: تعرق واقعی، D: نشت و نفوذ عمقی و ΔW : تغییرات آب ذخیره شده در منطقه توسعه ریشه می باشد. ارزیابی کالیبراسیون و صحت سنجی این مدل با استفاده از شاخص های آماری ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص توافق (d) انجام گرفت (روابط ۲، ۳ و ۴).

$$R^2 = \frac{\left[\sum (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (\text{رابطه ۴})$$

که P_i مقادیر برآورد شده مدل، \bar{P} متوسط مقادیر برآورد شده مدل، O_i مقادیر اندازه گیری شده، \bar{O} متوسط مقادیر اندازه گیری شده و n تعداد مشاهدات می باشند.

شبیه سازی بهره برداری

به منظور شبیه سازی بهره برداری در کانال اصلی شاخه چپ رودست شمالی از مدل هیدرودینامیکی ICSS استفاده شد. این مدل توسط Manz and Schaalje (1990) به منظور شبیه سازی سیستم های انتقال و توزیع آب آبیاری از نظر هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و بهره برداری تهیه شده است (Kaghazchi et al., 2019). جهت ساخت مدل لازم است که مشخصات هندسی و فیزیکی کانال و داده های جریان، وارد مدل شوند. این داده ها شامل اطلاعات مربوط به مسیر کانال، مقاطع عرضی، سازه های هیدرولیکی، موقعیت قرارگیری سازه ها و همچنین شرایط مرزی بالادست و پایین دست می باشد. جدول (۱) اطلاعات مذکور را نمایش می دهد. همان طور که قبلاً ذکر شد کانال مورد مطالعه دارای ۱۴ سازه تنظیم و ۲۶ سازه آبرگیر می باشد که این سازه ها با توجه به اطلاعات دریافتی، توسط نرم افزار مدل شدند.

واسنجی و صحت سنجی مدل شبیه سازی شده در تحقیق حاضر بر اساس اطلاعات اندازه گیری شده دبی ورودی و دبی تحویلی به آبرگیرها در کانال مورد مطالعه صورت گرفت. اطلاعات مذکور مربوط به یک دوره ۵۳ روزه بهره برداری (۲۱ فروردین الی

$$P_A = \frac{1}{T} \sum_T \left[\frac{1}{R} \sum_R (P_a) \right] \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$P_a = \frac{Q_d}{Q_r} \quad \text{if } Q_d < Q_r \quad \text{otherwise } P_a = 1$$

که در آن Q_d و Q_r به ترتیب معرف مقدار آب مورد نیاز و مقدار آب تحویل داده شده در عمل برای آبیگر x در دوره زمانی t و نمادهای $\frac{1}{T} \sum$ و $\frac{1}{R} \sum$ به ترتیب متوسط زمانی و مکانی هستند. شاخص کفایت بر اساس مفاهیم «خوب» و «متوسط» و «ضعیف» مطابق با استاندارد ارایه شده توسط Molden and Gates (1990) (به ترتیب در محدوده ۰/۹-۰/۸، ۰/۸-۰/۷ و کمتر از ۰/۸) ارزیابی شده است.

نتایج و بحث

مدل AquaCrop با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت که نتایج دو محصول عمده زیرکشت شبکه (حدود ۹۰ درصد سطح اراضی شبکه زیر کشت این دو محصول می‌باشد) در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴- پارامترهای آماری برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop

محصول	R^2	RMSE (ton/ha)	d
واسنجی	۰/۹۳	۰/۴۶	۰/۹۷
	۰/۹۱	۰/۱۷	۰/۹۶
	۰/۸۶	۰/۸۱	۰/۹۵
	۰/۸۲	۰/۳۳	۰/۹۵
صحت‌سنجی	۰/۹۱	۱/۱۲	۰/۹۷
	۰/۹۲	۰/۶۸	۰/۹۲
	۰/۸۴	۰/۹۲	۰/۹۴
	۰/۸۸	۰/۴	۰/۹

مطابق با جدول (۴)، و در مقایسه با نتایج پژوهش‌های دیگر

از جمله (Xing et al. (2017)، (Iqbal et al., Toumi et al. (2016)، (Andarzian et al. (2011) ال. (2014) که محدوده RMSE را برای زیست‌توده و دانه گندم به ترتیب ۰/۶-۱/۶۵ و ۰/۳-۰/۷۴ تن در هکتار و ۰/۷-۰/۷۷ و ۰/۳۶-۱/۵ تن در هکتار گزارش دادند، (Saab et al. (2015) محدوده RMSE را برای زیست‌توده و دانه جو به ترتیب ۰/۷-۰/۷۷ و ۰/۳۶-۱/۵ تن در هکتار گزارش دادند، شاخص‌های آماری در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در محدوده قابل قبولی قرار دارند و بدین سبب نتایج نشان از دقت خوب مدل AquaCrop در شبیه‌سازی رشد، عملکرد دانه و زیست‌توده گیاه دارد. در گام بعدی مدل واسنجی شده به منظور برآورد نیاز آبی کل الگوی کشت (محصولات مورد اشاره در جدول ۳) به تفکیک نواحی زراعی درجه ۲ شبکه آبیاری مورد مطالعه به کار گرفته

۱۱ خرداد) سال ۱۳۹۴ می‌باشد. ۲۷ روز از این داده‌ها برای واسنجی و ۲۶ روز برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور واسنجی مدل‌های هیدرودینامیک مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان در کانال‌های آبیاری عموماً ضریب آبگذری سازه‌های کنترل سطح آب، سازه‌های آبیگر و یا به صورت توامان به عنوان متغیرهای قابل تغییر جهت انطباق مقادیر شبیه‌سازی شده دبی تحویلی در آبیگرها با مقادیر اندازه‌گیری شده در محل آبیگرها انتخاب می‌گردند. یکی از روش‌های مرسوم در مطالعات طراحی سامانه‌های کنترل خودکار بکارگیری روش‌های تشخیص سیستم^۱ (SI) است که اقدام به تعیین همزمان ضرایب سیستم‌های کنترل خودکار غیرمتمرکز برای کانال مورد مطالعه می‌نماید (Litrico et al., 2007). در این تحقیق با تأثیر گرفتن از روش مذکور اقدام به تغییر همزمان ضریب آبگذری سازه‌های نوک اردکی واقع در طول کانال به صورت سعی و خطا شد. بر این اساس پارامتر دبی ورودی به کانال اصلی به عنوان پارامتر مشخص می‌باشد و ضرایب آبگذری سازه‌های نوک اردکی به عنوان پارامترهای واسنجی در نظر گرفته شد. شاخص‌های آماری میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب خطای پسماند (CRM) اقدام به بررسی مقدار اختلاف شبیه‌سازی شده دبی تحویلی به هر آبیگر یا مقدار اندازه‌گیری شده توسط میراب، در فرآیندهای واسنجی و سپس صحت‌سنجی، نمودند. شایان ذکر است که بعد از واسنجی مدل و تنظیم پارامترهای آن، مدل برای ۲۶ روز بعدی جهت صحت‌سنجی اجرا گردید و شاخص‌های آماری مذکور به منظور بررسی دقت مدل در دوره صحت‌سنجی استفاده شد. فرمول شاخص‌های مذکور در قالب روابط زیر ارائه شده است.

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (\text{رابطه ۵})$$

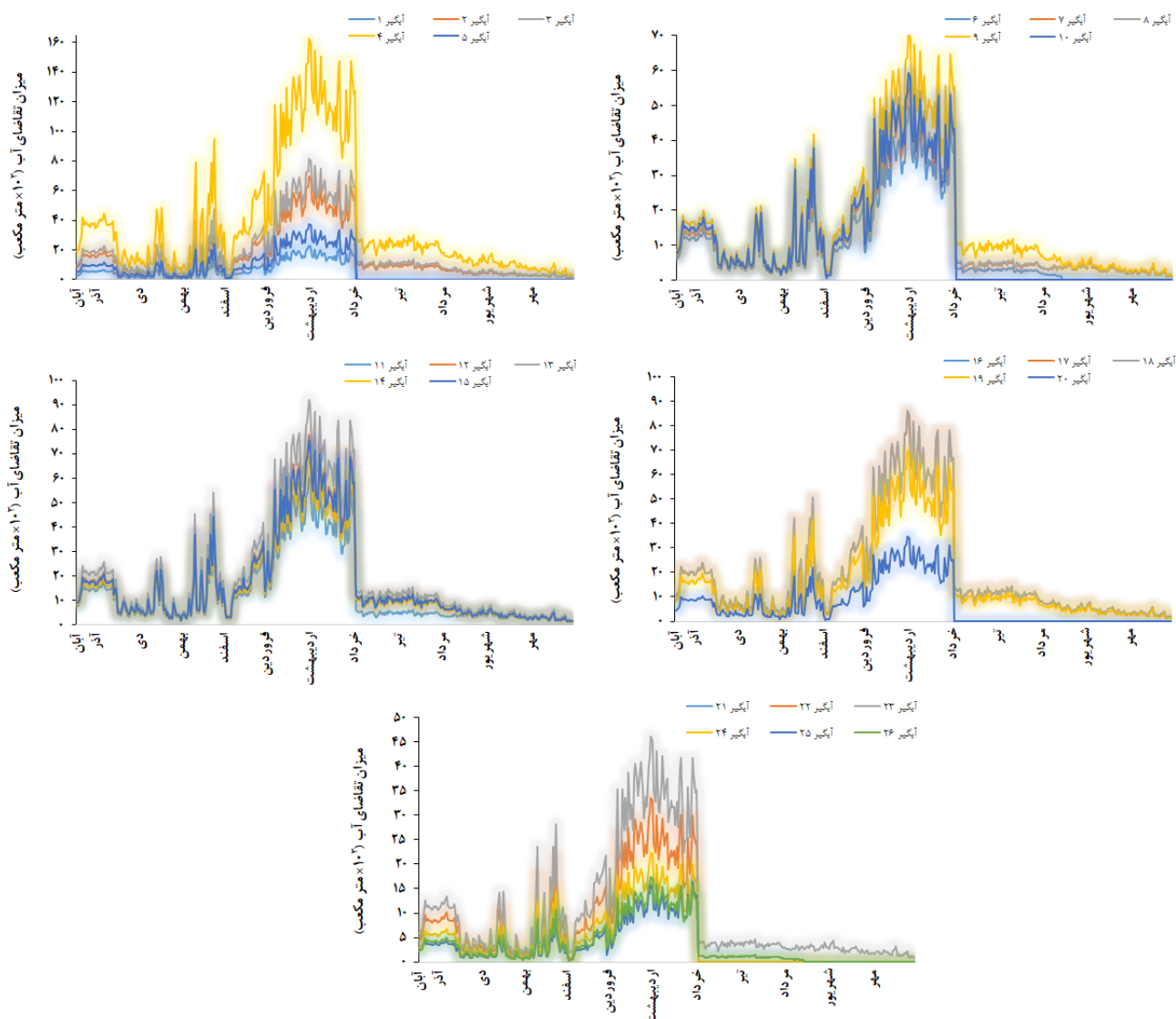
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در این روابط O_i و P_i به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده می‌باشند.

ارزیابی تحویل و توزیع آب به صورت نقطه‌ای (به تفکیک هر سازه آبیگر)، منطقه‌ای (در سه ناحیه بالادست، میان دست و پایین دست) با بهره‌گیری از شاخص کفایت تحویل و توزیع آب انجام شد. این شاخص بیان‌کننده میزان توانایی روش بهره‌برداری در تحویل آب به میزان درخواست شده می‌باشد. این شاخص به کمک رابطه (۷) قابل محاسبه است.

شد. نهایتاً نیاز ناخالص آبیاری در محل آبیگر واحد درجه دو، با لحاظ نمودن راندمان توزیع آب در شبکه آبیاری رودشت محاسبه گردید. شایان ذکر است که با توجه به اینکه در اندازه‌گیری میدانی به منظور تعیین راندمان توزیع آب در این شبکه آبیاری انجام نشده است، لذا میزان راندمان مذکور مطابق توصیه (Karimi et al., 2020; Abbasi et al., 2017) در محدوده ۷۰-۴۰ درصد میزان دبی ورودی به کانال‌های درجه دو در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر، به‌جای در نظر گرفتن مقدار نیاز مشخص شده روزانه، توسط شرکت بهره‌برداری شبکه آبیاری، مقدار تدقیق شده تقاضای آب (شکل ۲) در نظر گرفته شد.

شده است، لذا میزان راندمان مذکور مطابق توصیه (Karimi et al., 2020; Abbasi et al., 2017) در محدوده ۷۰-۴۰ درصد میزان دبی ورودی به کانال‌های درجه دو در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر، به‌جای در نظر گرفتن مقدار نیاز مشخص شده روزانه، توسط شرکت بهره‌برداری شبکه آبیاری، مقدار تدقیق شده تقاضای آب (شکل ۲) در نظر گرفته شد.



شکل ۲- میزان تقاضای آب آبیگرهای درجه ۲ در طول فصل زراعی

هر آبیگر نسبت به میزان تقاضای آب محاسبه شده در این تحقیق را به تفکیک ۲۶ آبیگر و در طول ۴ ماه بهره‌برداری ارائه کرده است. بررسی نتایج حاصله نشان می‌دهد که (۱) میزان نیاز مشخص شده توسط مدیر شبکه برای هر آبیگر با میزان تقاضای آب (مبتنی بر الگوی کشت کنونی شبکه) مطابقت مناسبی ندارد به‌نحویکه در بالادست و میان‌دست کانال اصلی (آبیگرهای ۱# تا ۱۷#) عمدتاً در اکثر روزها درصد تغییرات مثبت و در پایین‌دست کانال (آبیگرهای ۱۸# تا ۲۶#) و به‌خصوص سه آبیگر انتهایی

به‌منظور تحقق هدف اصلی این تحقیق، مقادیر تقاضای آب در محل هر آبیگر واحد درجه دو با مقادیر نیاز ثبت شده (گردآوری شده از دفتر بهره‌برداری شبکه آبیاری) مقایسه گردید. با توجه به اینکه مقدار شاخص کفایت تحویل آب، مطابق فرمول ۷، از تقسیم مقدار آب تحویل داده شده به مقدار تقاضا در هر آبیگر محاسبه می‌گردد، لذا افزایش/کاهش میزان تقاضا (مخرج کسر) سبب تغییر در مقدار این شاخص خواهد شد. جدول (۵) حدود درصد تغییرات مقدار نیاز مشخص شده توسط مدیر شبکه

واقعی)، این تفاوت چشمگیر است. به علاوه آنکه کمبود آب تحویل داده شده به سبب غیرواقعی بودن میزان نیاز مشخص شده توسط مدیر شبکه، به همراه دسترسی بیشتر به آب در بالادست نسبت به پایین دست شبکه منجر به تشدید کمبود آب تحویلی در پایین دست خواهد شد. در ادامه مقادیر تقاضای واقعی محاسبه شده (میزان تقاضای روزانه در محل آبیگر) جایگزین مقدار تقاضا در شاخص ارزیابی عملکرد کیفیت تحویل آب (مخرج کسر رابطه ۷) خواهد شد تا با استفاده از نتایج مدل شبیه ساز توزیع آب، میزان متوسط دبی تحویلی روزانه، مقادیر شاخص های کیفیت بدست آید.

شبکه، این مقدار منفی است. علاوه بر مقادیر حداکثر و حداقل درصد تغییرات «مقدار نیاز مشخص شده توسط مدیر شبکه» در هر آبیگر نسبت به «میزان تقاضای آب تدقیق شده» در طول دوره بهره برداری، متوسط حدود تغییرات در طول دوره بهره برداری در جدول (۵) ارائه شده است. بر اساس مقادیر متوسط حدود تغییرات، میتوان به این نکته اشاره نمود که در اکثر آبیگرها به جز ۳ آبیگر انتهایی، دامنه تغییرات $\pm 10\%$ است که به خصوص برای آبیگرهای با ظرفیت دبی تحویلی کمتر، مقدار تفاوت چشمگیر نیست. در ارتباط با سه آبیگر انتهایی با توجه به افزایش تعداد روزهای آبیگری با برآورد تقاضای کمتر (میزان نیاز مشخص شده توسط مدیر شبکه در حدود 15% کمتر از میزان تقاضای

جدول ۵- درصد تغییرات مقدار نیاز مشخص شده توسط مدیر شبکه هر آبیگر نسبت به میزان تقاضای آب (محاسبه شده در این تحقیق) در طول دوره بهره-

برداری

شماره آبیگر

	# ۱	# ۲	# ۳	# ۴	# ۵	# ۶	# ۷	# ۸	# ۹	# ۱۰	# ۱۱	# ۱۲	# ۱۳
منفی	۷	۶	۶	۵	۵	۵	۵	۶	۶	۶	۶	۷	۷
مثبت	۲۴	۲۵	۲۵	۲۶	۲۶	۲۶	۲۶	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۴	۲۴
حدود تغییر	(-۵+۱۱)	(-۴+۱۲)	(-۴+۱۰)	(-۴+۱۰)	(-۴+۱۱)	(-۵+۱۰)	(-۸+۱۰)	(-۸+۱۱)	(-۸+۱۱)	(-۵+۹)	(-۷+۹)	(-۷+۹)	(-۹+۸)
منفی	۱	۱	۱	۲	۴	۵	۵	۵	۵	۷	۶	۶	۷
مثبت	۳۰	۳۰	۳۰	۲۹	۲۷	۲۶	۲۶	۲۶	۲۶	۲۴	۲۵	۲۵	۲۴
حدود تغییر	(-۳+۱۳)	(-۲+۹)	(-۲+۱۱)	(-۲+۱۰)	(-۲+۹)	(-۵+۱۰)	(-۵+۱۰)	(-۵+۱۰)	(-۵+۱۰)	(-۵+۶)	(-۶+۸)	(-۶+۸)	(-۹+۸)
منفی	۲	۱	۱	۲	۱	۲	۴	۴	۴	۴	۴	۶	۶
مثبت	۲۹	۳۰	۳۰	۲۹	۳۰	۲۹	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۵	۲۵
حدود تغییر	(-۳+۱۴)	(-۲+۱۰)	(-۲+۱۱)	(-۲+۹)	(-۲+۱۱)	(-۴+۱۰)	(-۴+۱۰)	(-۴+۱۰)	(-۴+۱۰)	(-۴+۱۰)	(-۸+۸)	(-۷+۶)	(-۸+۶)
منفی	۶	۴	۵	۵	۶	۵	۵	۵	۵	۵	۶	۶	۷
مثبت	۲۵	۲۷	۲۶	۲۶	۲۵	۲۶	۲۶	۲۶	۲۶	۲۶	۲۵	۲۵	۲۴
حدود تغییر	(-۲+۱۳)	(-۱+۹)	(-۳+۱۰)	(-۴+۱۲)	(-۴+۱۰)	(-۴+۱۰)	(-۴+۱۰)	(-۴+۱۰)	(-۴+۱۰)	(-۴+۱۰)	(-۷+۹)	(-۸+۷)	(-۹+۶)

شماره آبیگر

	# ۱۴	# ۱۵	# ۱۶	# ۱۷	# ۱۸	# ۱۹	# ۲۰	# ۲۱	# ۲۲	# ۲۳	# ۲۴	# ۲۵	# ۲۶
منفی	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۶	۱۶	۱۶	۱۷	۱۸	۱۷	۱۷	۲۱	۲۳
مثبت	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۵	۱۵	۱۵	۱۴	۱۳	۱۴	۱۴	۱۰	۸
حدود تغییر	(-۹+۸)	(-۸+۸)	(-۸+۷)	(-۹+۶)	(-۹+۳)	(-۹+۳)	(-۱۰+۴)	(-۱۰+۳)	(-۹+۳)	(-۱۰+۳)	(-۱۰+۴)	(-۱۶+۳)	(-۱۵+۴)
منفی	۱۱	۱۳	۱۱	۱۱	۱۷	۱۶	۱۵	۱۷	۱۷	۱۷	۲۰	۲۰	۲۳
مثبت	۲	۱۸	۲۰	۲۰	۱۴	۱۵	۶	۱۴	۱۴	۱۴	۱۱	۱۱	۸
حدود تغییر	(-۸+۶)	(-۹+۶)	(-۸+۷)	(-۱۰+۷)	(-۹+۳)	(-۸+۵)	(-۱۱+۵)	(-۱۱+۵)	(-۹+۳)	(-۱۱+۵)	(-۱۵+۴)	(-۱۵+۷)	(-۱۵+۴)
منفی	۱۳	۱۱	۱۱	۱۲	۱۷	۱۷	۱۶	۱۶	۱۵	۱۷	۲۷	۲۷	۲۵
مثبت	۱۸	۲۰	۲۰	۱۹	۱۴	۱۴	۱۵	۱۵	۱۵	۱۴	۴	۴	۶
حدود تغییر	(-۸+۶)	(-۹+۵)	(-۸+۷)	(-۹+۷)	(-۱۰+۴)	(-۹+۵)	(-۱۱+۵)	(-۱۱+۵)	(-۱۰+۴)	(-۱۱+۵)	(-۱۴+۳)	(-۱۴+۳)	(-۱۶+۶)
منفی	۱۳	۱۲	۱۲	۱۱	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۶	۲۵	۲۵	۲۲
مثبت	۱۸	۱۹	۱۹	۲۰	۱۳	۱۳	۱۵	۱۳	۱۳	۱۵	۶	۶	۹
حدود تغییر	(-۱۰+۶)	(-۱۰+۵)	(-۱۰+۵)	(-۱۰+۵)	(-۱۰+۳)	(-۱۱+۴)	(-۱۱+۲)	(-۱۱+۳)	(-۱۰+۴)	(-۱۱+۶)	(-۱۷+۶)	(-۱۷+۶)	(-۱۸+۶)

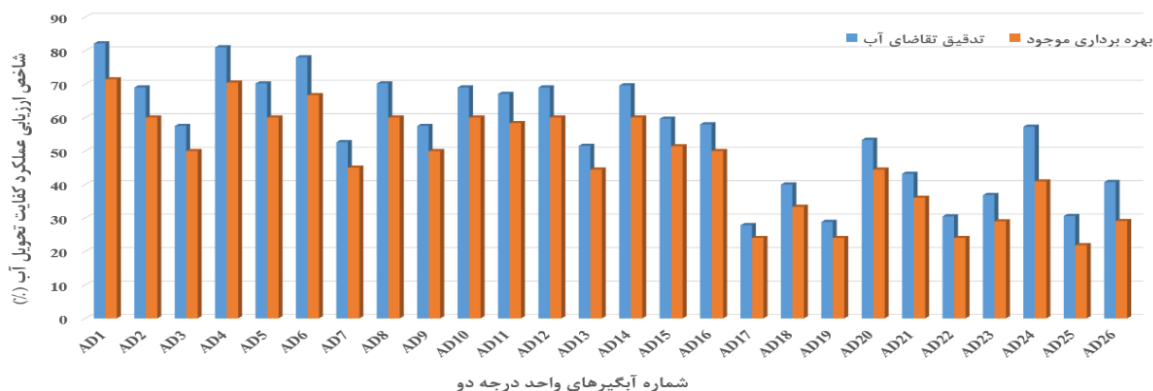
تیرماه در نظر گرفته شد. واسنجی و صحت سنجی مدل بهره برداری توسعه داده شده، بر اساس دبی ورودی به کانال و دبی تحویلی به آبیگرها و با اعمال تغییرات بر روی ضرایب آبیگری مربوط به سازه های تنظیم و سازه های آبیگر صورت گرفت. به طوری که داده های اندازه گیری شده دبی ورودی به کانال و دبی تحویلی به آبیگرها به ترتیب در محدوده (۰/۸، ۶/۶) و (۰، ۰/۲۴) و

بررسی اطلاعات بهره برداری شبکه آبیاری رودشت در سال - های اخیر نشان داد که تخصیص آب به شبکه عمدتاً در چند دوره زمانی در هر سال صورت گرفته و کشاورزان از آب زیرزمینی به - عنوان منبع اصلی تامین آب کشاورزی در دوره های فاقد آب سطحی بهره می برند. لذا همان طور که پیش تر نیز توضیح داده شد، مبنای شبیه سازی توزیع آب، ماه های فروردین تا انتهای

به صورت فرضی نبوده و بر اساس میزان دبی ورودی به شبکه (ثابت شده توسط شرکت میراب) برای ۳۰ روز با کمترین میزان دبی ورودی (از بین ۴ ماه دوره بهره‌برداری) تحت سناریوی کم‌آبی در شکل (۳) ارایه شده است. بررسی مقادیر شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب حاکی از آن است که تدقیق میزان تقاضای آب کشاورزی برای کلیه آبیگرها سبب بهبود مقدار شاخص ارزیابی شده است. در توجیه نتایج بدست آمده می‌توان این توضیح را ارایه نمود که تدقیق مقدار تقاضای آب کشاورزی در عمده آبیگرهای بالادست و میان‌دست شبکه سبب کاهش میزان تقاضای آب در محل هر آبیگر شده است. با توجه به اینکه مدل بهره‌برداری، مقادیر جدید تقاضا را مبنای توزیع آب در کانال در نظر گرفته است، لذا کاهش این مقادیر در بالادست و میان دست از یک سو سبب بهبود وضعیت توزیع در آبیگرهای مذکور شده و از سوی دیگر میزان آب بیشتری را برای استفاده در آبیگرهای پایین دست فراهم نموده است. نتایج شبیه‌سازی بهره‌برداری حاکی از آن است که از بین آبیگرهای پایین دست، سه آبیگر انتهایی به دلیل فرصت ایجاد شده در راستای افزایش میزان تقاضای آب، مقدار تحویلی بیشتری داشته‌اند. همانطور که در شکل (۳) مشخص است بیشترین تغییر در مقدار شاخص کفایت در آبیگرهای شماره ۲۶ و ۲۴ به ترتیب به میزان ۱۲ و ۱۶ درصد رخ داده است. همچنین در شرایط تدقیق تقاضای آب نسبت به بهره‌برداری موجود، آبیگرهای شماره ۱۹ و ۱۷ به ترتیب با ۵ و ۳ درصد تغییر در مقدار شاخص کفایت، کمترین تغییرات را در بین تمامی آبیگرهای واحد درجه دو داشتند. همان‌طور که پیش‌تر نیز توضیح داده شد، تدقیق میزان تقاضای آب کشاورزی برای کلیه آبیگرها سبب بهبود مقدار شاخص کفایت تحویل شده است. این بهبود در اکثر آبیگرهای بالادست و میان‌دست به سبب کاهش میزان تقاضای آب در محل هر آبیگر حاصل شده است. بنابراین با کاهش میزان نیاز در بالادست و میان‌دست کانال تحت مطالعه، میزان آب بیشتری برای استفاده در آبیگرهای پایین‌دست ایجاد شده است.

متغیر بودند. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال اصلی رودشت، با استفاده از شاخص‌های ارزیابی MAE، RMSE و CRM به این صورت است که: (۱) میزان میانگین خطای مطلق (MAE)، برای دوره واسنجی برابر ۰/۰۰۲ و برای دوره صحت‌سنجی ۰/۰۰۳ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. مقدار بهینه این شاخص برابر صفر است. با توجه به اینکه مقادیر مذکور به مقدار بهینه نزدیک می‌باشند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که مدل دقت مناسبی ارائه می‌نماید. (۲) شاخص ضریب خطای پسماند (CRM)، برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی، به ترتیب برابر ۰/۰۴۷- و ۰/۰۶۵- می‌باشند، با توجه به این که بهترین میزان برای CRM صفر می‌باشد، مقادیر کم این شاخص حاکی از دقت قابل قبول مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی است. (۳) میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای دوره واسنجی برابر ۰/۰۰۲۸ و برای دوره صحت‌سنجی ۰/۰۰۴ متر مکعب بر ثانیه به دست آمد. مقادیر مناسب این شاخص نیز دقت مدل را مورد تایید قرار می‌دهد.

پس از محاسبه میزان متوسط دبی تحویلی روزانه به هر آبیگر توسط مدل شبیه‌ساز توزیع آب در کانال اصلی، مقدار شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب، در دو حالت محاسبه شد. در حالت اول که بیانگر شرایط موجود بهره‌برداری شبکه است، میزان تقاضای آب کشاورزی در محل آبیگر درجه دو بر اساس مقدار مشخص شده توسط مدیر شبکه لحاظ گردید. در حالت دوم میزان تقاضا بر اساس مقدار تدقیق شده تقاضا در محل هر آبیگر درجه دو (نتایج بخش اول این تحقیق) مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور بررسی دقیق میزان تأثیر راهکار ارایه شده در این تحقیق در شرایط غیر معمول بهره‌برداری، سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی در نظر گرفته شد. لازم به توضیح مجدد است که در سناریوی بهره‌برداری تحت کم‌آبی، میزان تقاضا در محل هر آبیگر ثابت (بر اساس دو حالت ذکر شده در توضیحات فوق) ولی میزان دبی ورودی به شبکه کاهش یافته است. کاهش مذکور



شکل ۳- مقادیر شاخص ارزیابی کفایت تحویل آب در بهره‌برداری موجود و پس از تدقیق مقادیر تقاضای آب کشاورزی

نتیجه‌گیری

این پژوهش، با استفاده از توسعه و تلفیق مدل AquaCrop (به-منظور برآورد میزان دقیق تقاضای روزانه آب کشاورزی برای هر منطقه زراعی درجه دو) و مدل هیدرودینامیک ICSS، تأثیر بهبود میزان دقت برآورد تقاضای آب را در بهره‌برداری روزانه یک شبکه آبیاری بررسی نموده است. بدین منظور عملکرد توزیع آب توسط مدل تلفیقی توسعه داده شده تحت سناریوی کم‌آبی در شرایط موجود در شبکه آبیاری مورد مطالعه با استفاده از شاخص کفایت بررسی شد. نتایج نشان داد که تدقیق میزان تقاضای آب کشاورزی برای کلیه آبگیرها سبب بهبود مقدار شاخص ارزیابی شده است. علی‌رغم اینکه تدقیق مقدار تقاضای آب کشاورزی در اکثر آبگیرهای بالادست و میان‌دست شبکه سبب کاهش میزان تقاضای آب در محل هر آبگیر شده است. اما شاخص کفایت در آبگیرهای بالادست و میان‌دست به ترتیب حدود ۱۱-۸ درصد و ۹-۳ درصد افزایش یافته است. همچنین پس از تدقیق میزان تقاضای آب کشاورزی، شاخص کفایت در آبگیرهای پایین‌دست ۱۶-۵ درصد بهبود یافته است. در توجیه بهبود میزان شاخص کفایت (پس از تدقیق تقاضا) هم در شرایط کاهش و هم افزایش تقاضا می‌توان به این نکات اشاره کرد. (۱) در شرایط موجود بهره‌برداری آبگیرهای واقع در پایین‌دست کانال، میزان حقابه به نسبت کمتری نسبت به آبگیرهای بالادست دارند، بنابراین افزایش تقاضا (در مقایسه با حقابه در شرایط موجود) سبب این شده که آبگیرها در طول بهره‌برداری بیشتر باز باشند و فرصت تحویل بیشتری داشتند. (۲) کاهش تقاضا به نسبت حقابه موجود (پس از تدقیق) بیشتر در آبگیرهای بالادست و میان‌دست کانال رخ داده

که سبب شده آب بیشتری از بالادست به پایین‌دست کانال منتقل گردد.

با توجه به اینکه مدل‌های گیاهی از جمله مدل AquaCrop به‌منظور واسنجی و صحت‌سنجی نیازمند داده‌برداری‌های مزرعه‌ای می‌باشند و استخراج این اطلاعات زمانبر و هزینه‌بر می‌باشد (به‌خصوص زمانی که تعداد گیاهان واقع در الگوی کشت زیاد باشند)، لذا برای مناطقی که فاقد این آمار و ارقام می‌باشند، می‌توان از روش‌های دیگر همچون روش‌های مبتنی بر سنجش از دور برای تدقیق میزان تقاضای آب کشاورزی استفاده نمود. با بکارگیری نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان عملکرد بهره‌برداری شبکه آبیاری را بهبود بخشید. بخصوص با توجه به اینکه تدقیق برآورد تقاضای آب کشاورزی در عمده آبگیرهای بالادست و میان‌دست سبب کاهش میزان تقاضای آب در محل هر آبگیر شده است، کاهش تلفات در مزارع بالادست شبکه را می‌توان انتظار داشت. همانطور که قبلاً اشاره شد تدقیق میزان تقاضای آب کشاورزی باعث می‌شود آب بیشتری از بالادست کانال به پایین‌دست کانال منتقل گردد، این سبب می‌شود از نارضایتی کشاورزان پایین‌دست شبکه کاسته شود.

سپاس‌گزاری

این تحقیق با حمایت مالی دفتر پژوهش‌های کاربردی شرکت مدیریت منابع آب ایران، در قالب طرح پژوهش کاربردی با شماره قرارداد ۰۸/س/۹۹ صورت پذیرفته است. نویسندگان مقاله تشکر خود را از این شرکت اعلام می‌نمایند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abbasi, F., Sohrab, F., & Abbasi, N. (2017). Evaluation of Irrigation Efficiencies in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17(67), 113-120. (In Farsi)
- Abi-Saab, M. T., Todorovic, M., & Albrizio, R. (2015). Comparing AquaCrop and CropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes. Does calibration year influence the performance of crop growth models?. *Agricultural water management*, 147, 21-33
- Abrha, B., Delbecque, N., Raes, D., Tsegay, A., Todorovic, M., Heng, L. E. E., & Deckers, S. (2012). Sowing strategies for barley (*Hordeum vulgare* L.) based on modelled yield response to water with AquaCrop. *Experimental Agriculture*, 48(2), 252-271.
- Afrasiabikia, P., Parvaresh Rizi, A., & Javan, M. (2017). Scenarios for improvement of water distribution in Doroodzan irrigation network based on hydraulic simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 135, 312-320.
- Ammar, M. E., & Davies, E. G. (2019). On the accuracy of crop production and water requirement calculations: Process-based crop modeling at daily, semi-weekly, and weekly time steps for integrated assessments. *Journal of environmental management*, 238, 460-472.
- Andarzian, ., 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. *Agricultural Water Management*, 100(1), 1-8.
- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K. M., Kebede, A., & Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in

- simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97(11), 1838-1846
- Bhadra, A., Bandyopadhyay, A., Singh, R., & Raghuwanshi, N. S. (2010). An alternative rotational delivery schedule for improved performance of reservoir-based canal irrigation system. *Water resources management*, 24(13), 3679-3700.
- Casa, R., Rossi, M., Sappa, G., & Trotta, A. (2009). Assessing crop water demand by remote sensing and GIS for the Pontina Plain, Central Italy. *Water resources management*, 23(9), 1685-1712.
- Dejen, Z. A. (2015). Hydraulic and operational performance of irrigation schemes in view of water saving and sustainability: sugar estates and community managed schemes In Ethiopia. CRC Press/Balkema.
- Ebrahimian, F. (2018). Management of water distribution and improving water productivity in irrigation networks in water shortage conditions using hydrodynamic models and crop production pattern. MSc dissertation, University of Tarbiat Modares, Tehran. (In Farsi)
- Filgueiras, R., Almeida, T. S., Mantovani, E. C., Dias, S. H. B., Fernandes-Filho, E. I., da Cunha, F. F., & Venancio, L. P. (2020). Soil water content and actual evapotranspiration predictions using regression algorithms and remote sensing data. *Agricultural Water Management*, 241, 106346.
- Galan-Martin, A., Vaskan, P., Anton, A., Esteller, L. J., & Guillen-Gosalbez, G. (2017). Multi-objective optimization of rainfed and irrigated agricultural areas considering production and environmental criteria: a case study of wheat production in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 140, 816-830.
- Ghumman, A. R., Ahmad, S., Rahman, S., & Khan, Z. (2018). Investigating management of Irrigation Water in the Upstream Control System of the Upper Swat Canal. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 42(2), 153-164.
- Iqbal, M. A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E. & del Rio, S. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*, 135, 61-72.
- Kaghazchi, A., Hashemy Shahdany, S. M., Roozbahani, A., Banihabib, M. E., & Taghvaeian, S. (2019). Development of a Hybrid Bayesian Network Model for Hydraulic Simulation of Agricultural Water Distribution and Delivery. In: *5th Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation (KBEI)*, 28Feb-1 Mar, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, pp. 359-365.
- Kamali, M. I., Faridhoseini, A. R., Ansari, H., & Gholami Sefidkouhi, M. A. (2018). Determination of Maize Water Requirement and Crop Coefficient Using Remote Sensing Data and SEBAL Algorithm. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 12(1), 25-39. (In Farsi)
- Kanooni, A., & Monem, M. J. (2014). Integrated stepwise approach for optimal water allocation in irrigation canals. *Irrigation and Drainage*, 63(1), 12-21.
- Kanooni, A., & Monem, M. J. (2016). Allocation and water delivery scheduling optimization in irrigation networks. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 10(1), 12-23. (In Farsi)
- Karbasi, M., Moghadam, M., Nikbakht, J., & Kaviani, A. (2017). Estimation of crop actual evapotranspiration using SEBAL algorithm (Case study: Khoramdareh region at Zanjan province). *Journal of ECO Hydrology*, 3(3), 427-437. (In Farsi)
- Karimi, H., Hashemy Shahdany, S. M., Hashemi Garmdareh, S. E., & Liaghat, A. (2020). Determination of Water Losses through the Agricultural Water Conveyance, Distribution, and Delivery System, Case Study of Roodasht Irrigation District, Isfahan. *Water and Irrigation Management*, 10(1), 143-156. (In Farsi)
- Li, M., Xu, Y., Fu, Q., Singh, V. P., Liu, D., & Li, T. (2020). Efficient irrigation water allocation and its impact on agricultural sustainability and water scarcity under uncertainty. *Journal of Hydrology*, 586, 124888.
- Litrico, X., Malaterre, P. O., Baume, J. P., Vion, P. Y., & Ribot-Bruno, J. (2007). Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(1), 27-37.
- Manz, D. H., & Schaalje, M. (1992). Development and application of the irrigation conveyance system simulation model. In: *International Workshop on the Application of the Irrigation Mathematical Modeling for the Improvement of Irrigation Canal Operation*, 26-30 Oct., Montpellier, France, pp. 101-119.
- Molden, D. J., & Gates T. K. (1990). Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 116(6), 804-23.
- Monem, M. J., Emadi, A., & Ghodoosi, H. (2005). Investigation of Unsteady Flow in Irrigation Canals as a Response to Demand Variation in order to Provide Proper Operation Instructions (case study: E1R1 Canal of Dez Irrigation Network). *Agricultural Engineering Research*, 24(6), 79-94. (In Farsi)
- Monem, M. J., Hashemy Shahdany, S. M., & Eslambolchizadeh, H. (2018). Role of Regulating Reservoir Operational Management in Performance Improvement of Moghan Irrigation Network. *Journal of Water Research in Agriculture*. 31(4), 535-545. (In Farsi)
- Mousavi Zadeh Mojarad, R., Feizi, M., & Ghobadina,

- M. (2018). Prediction of safflower yield under different saline irrigation strategies using AquaCrop model in semi-arid regions. *Australian Journal of Crop Science*, 12(8), 1241-1249.
- Nikmehr, S., Parvarsh Rizi, A., & Monem, M. J. (2018). Performance Assessment of Main Canal of Kosar Irrigation Network Using Upstream and Downstream Automatic Control. *Iranian Water Researches Journal*, 11(1), 109-118.
- Raber, W., Mohajeri, Sh., & Pringgosiswojo, M. (2015). Integrated Water Resources Management (IWRM) in Isfahan. inter 3 GmbH - *Institute for Resource Management*.
- Ramezani, F., Kaviani, A., & Ramezani Etedali, H. (2017). Evaluation of AquaCrop Model for different Harvesting time of Alfalfa in Ardestan. *Journal of Water and Soil*, 31(3), 738-753. (In Farsi)
- Ran, H., Kang, S., Hu, X., Li, S., Wang, W., & Liu, F. (2020). Capability of a solar energy-driven crop model for simulating water consumption and yield of maize and its comparison with a water-driven crop model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 287, 107955.
- Toumi, J., Er-Raki, S., Ezzahar, J., Khabba, S., Jarlan, L., & Chehbouni, A. (2016). Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, 163, 219-235.
- Xing, H. M., Xu, X. G., Li, Z. H., Chen, Y. J., Feng, H. K., Yang, G. J., & Chen, Z. X. (2017). Global sensitivity analysis of the AquaCrop model for winter wheat under different water treatments based on the extended Fourier amplitude sensitivity test. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(11), 2444-2458.
- Yao, Y., Sun, J., Tian, Y., Zheng, C., & Liu, J. (2020). Alleviating water scarcity and poverty in drylands through telecouplings: Vegetable trade and tourism in northwest China. *Science of The Total Environment*, 741, 140387.