Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Optimal allocation of water and land in Moghan irrigation network using crop model and genetic algorithm

Parisa Kahkhamoghadam [1] | Ali Naghi Ziaei [2]✉ | Kamran Davari [3] | Amin Kanooni [4] | Sedigheh Sadeghi [5]

1. Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: Keykhamoghadam.parisa@gmail.com
2. Corresponding Author, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: an-ziaei@um.ac.ir
3. Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: k.davary@um.ac.ir
4. Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail amin.kanooni@uma.ac.ir
5. Department of Applied Mathematics, Faculty of Mathematical Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: se.sadeghi88@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Dec. 15, 2022

Revised: Feb. 20, 2023

Accepted: Feb. 21, 2023

Published online: Feb. 20, 2023

Keywords:
AquaCrop Model ,
Economic Benefit ,
Genetic algorithm.

ABSTRACT

Water is one of the most important physical factors to provide the food security of the world's growing population. The limitation of Iran's water resources, as well as the increasing competition of different sectors for the use of water make the optimal management of water resources necessary. Different strategies are used in irrigation networks for water resources management. One of these strategies is optimal allocation of water and land. In this research, an optimization model for water and land allocation with the aim of maximizing economic benefit is presented based on genetic algorithm and using the AquaCrop plug-in model. For this purpose, #C coding was done in Visual Studio. In order to measure the model performance, the lands covered by one of the Moghan irrigation network channels were investigated. In this model, the agricultural year was divided into 36 periods of ten days. The irrigation water depth in each period and the cultivated area were considered as decision variables. The results show that the highest increase in percentage of economic benefit is related to the first-cultivation maize, alfalfa and wheat by 9, 7.3 and 7 percent respectively. Although the lowest increase in economic benefit is related to the second-cultivation seed maize and soybeans. The optimal allocated water volume was decreased by 14.7 percent, meanwhile the economic benefit was increased by 5.7 percent. Therefore, the optimal water allocation in this region encourages saving water consumption more than increasing economic benefit.

Cite this article: Kahkhamoghadam, P., Ziaei, A. N., Davari, K., Kanooni, A., & Sadeghi, S. (2023). Optimal allocation of water and land in Moghan irrigation network using crop model and genetic algorithm, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (12), 2921-2935. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352463.669411

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352463.669411

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۳، شماره ۱۲ شاپا: ۲۴۲۳-۷۸۳۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

تخصیص بهینه آب و زمین در شبکه‌ی آبیاری مغان با ترکیب مدل‌سازی گیاهی و الگوریتم ژنتیک

پریسا کهخا مقدم[۱] | علی نقی ضیایی[۲]✉ | کامران داوری[۳] | امین کانونی[۴] | صدیقه صادقی[۵]

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: Keykhamoghadam.parisa@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: an-ziaei@um.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: k.davary@um.ac.ir

۴.گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: amin.kanooni@uma.ac.ir

۵.گروه ریاضی کاربردی، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: gmail.com@se.sadeghi88

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۲۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۱

واژه‌های کلیدی:
الگوریتم ژنتیک،
سود اقتصادی،
مدل AquaCrop plug-in.

چکیده

آب یکی از مهم‌ترین عوامل تأمین امنیت غذایی جمعیت رو به رشد جهان است. محدودیت منابع آب کشور و همچنین رقابت فزاینده‌ی بخش‌های مختلف جهت استفاده از آب، مدیریت بهینه از منابع آبی را ضروری می‌سازد. در شبکه های آبیاری استراتژی‌های مختلفی برای مدیریت منابع آبی به‌کار گرفته می‌شود. یکی از این موارد، تخصیص بهینه آب و زمین است. در این پژوهش یک مدل بهینه‌ساز تخصیص آب و زمین با هدف بیشینه‌سازی سود اقتصادی، بر مبنای الگوریتم ژنتیک و استفاده از مدل گیاهی AquaCrop plug-in ارائه شده است. برای این منظور کدنویسی سی شارپ (C#) در فضای ویژوال استودیو انجام شد. برای سنجش کارایی مدل، اراضی تحت پوشش یکی از کانال های شبکه‌ی آبیاری مغان بررسی شد. در این مدل سال زراعی به ۳۶ دوره ده روزه تقسیم و عمق آب آبیاری در هر دوره و مساحت زیر کشت نیز به‌عنوان متغیرهای تصمیم در گرفته شدند. نتایج نشان داد بیشترین درصد افزایش میزان سود اقتصادی مربوط به گیاه ذرت دانه‌ای کشت اول، یونجه و گندم به‌ترتیب با ۹، ۷/۳ و ۷ درصد است. این در حالی است که کمترین افزایش میزان سود اقتصادی مربوط به گیاه ذرت دانه‌ای کشت دوم و سویا است. حجم آب تخصیص یافته در حالت بهینه به میزان ۱۴/۷ درصد کاهش یافت، اما در مقابل سود اقتصادی با افزایش ۵/۷ درصدی همراه بود. لذا تخصیص بهینه آب در این منطقه بیش از افزایش سود اقتصادی، صرفه‌جویی در مصرف آب را تشویق می‌کند.

استناد: کهخامقدم؛ پریسا، ضیایی؛ علی نقی، داوری؛ کامران، کانونی؛ امین، صادقی؛ صدیقه، (۱۴۰۱). تخصیص بهینه آب و زمین در شبکه‌ی آبیاری مغان با ترکیب مدل سازی گیاهی و الگوریتم ژنتیک، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۱۲)، ۲۹۳۵-۲۹۲۱. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352463.669411

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352463.669411

مقدمه

بر اساس شاخص‌های بین‌المللی مدیریت منابع آب[1] ، کشور ایران از نظر تنش آبی در مرحله بحرانی و به شدت بحرانی قرار گرفته است (قوچانیان و فشائی، ۱۴۰۱؛ Zargan & Waez-Mousavi, 2016). این موضوع با رشد جمعیت و افزایش تقاضای محصولات کشاورزی حادتر نیز می‌شود. در چنین شرایطی با توجه به محدودیت منابع آب در دسترس به‌ویژه در بخش کشاورزی بهره‌برداری بهینه از منابع آبی می‌تواند یکی از استراتژی‌های کارآمد باشد (کاشفی نژاد و هوشمند، ۱۳۹۹؛ ولیزادگان و دیندارسوها، ۱۴۰۰).

در این راستا استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تخصیص منابع آبی در دسترس یکی از راه‌کارهایی است که در مطالعات گوناگون برای مدیریت منابع آب مورد توجه قرار گرفته است. مدل‌های‌شبیه‌ساز مورد استفاده در برنامه‌های آبیاری، امکان بررسی و پیش‌بینی رفتار سیستم در مواجهه با انواع متغیرها را فراهم می‌کنند و باعث صرفه‌جویی در هزینه‌ها و تصمیم‌گیری مناسب‌تر می‌شوند؛ همچنین از محدودیت‌های تحقیقات میدانی و صحرایی (شامل زمان‌بر بودن و فقدان منابع انسانی ...) نیز می‌کاهند (Bastiaanssen et al., 2007). مدل AquaCropبه دلیل سادگی و مبتنی بودن بر سیستم خاک- گیاه- اتمسفر برای برنامه‌ریزی آبیاری در سراسر جهان ارزیابی شده است (Linker et al., 2016; Li et al., 2018; Guo et al., 2021). اما باید کارایی این مدل گیاهی در هر منطقه و برای هر محصول بررسی شود.

در سال‌های اخیر بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری با استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی مانند AquaCrop به‌جای استخراج توابع تولید تجربی توسعه یافته است (Tomohari et al, 2015). از الگوریتم‌های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی‌های مختلف از جمله برنامه‌ریزی آبیاری استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی در زمینه‌های متفاوتی از جمله تخصیص و برنامه‌ریزی آبیاری استفاده و نتایج رضایت بخشی را نیز ارائه داده است (Kanooni & Monem, 2014; Rath et al., 2017; Rath et al., 2018). عملکرد محصول، سود اقتصادی و هزینه‌های آب، همه عوامل تعیین کننده‌ای برای برنامه‌ریزی آبیاری و تخصیص منابع آب هستند که باید هنگام بهینه‌سازی در نظر گرفته شوند (Wang et al., 2008; Rath et al., 2018). سابقه‌ی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از تکنیک بهینه‌سازی با استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی مانند AquaCrop می‌تواند در تصمیم‌گیری مربوط به مسائل مدیریت تخصیص آب بسیار مؤثر باشد (García-Vilaa & Fereresa, 2012; Guo et al., 2021). با تخصیص بهینه آب و زمین می‌توان علاوه بر کاهش مصرف آب، بهترین استراتژی ممکن جهت حفاظت از منابع آبی را نیز اجرایی کرد. این استراتژی بدون در نظر گرفتن مسئله اقتصادی ضمانت اجرایی لازم را نخواهد داشت. بنابراین تخصیص بهینه آب و زمین باید سود اقتصادی بیشتری را نیز به‌دنبال داشته باشد.

از این رو در این پژوهش با به‌کارگیری روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و با هدف بیشینه‌سازی سود اقتصادی به تخصیص بهینه آب و زمین در شبکه‌ی آبیاری مغان پرداخته شده است. همچنین جهت ارزیابی پاسخ عملکرد گیاه به آب، از مدل AquaCrop plug-in به‌جای توابع تولید تجربی استفاده شد. استفاده از برنامه plug-in گنجاندن مدل AquaCrop در دیگر برنامه‌ها را میسر ساخته و اجرای‌های متوالی را بدون رابط کاربری ممکن می‌سازد.

پیشینه پژوهش

مطالعات داخلی

ایزدفرد و همکاران (۱۳۹۶) عملکرد شش گیاه زراعی مهم دشت مغان را با استفاده از دو مدل پتانسیل حرارتی-تابشی (مدل فائو) و مدل AquaCrop برآورد کردند. مطالعات این پژوهشگران دقت بیشتر مدل AquaCrop را نسبت به مدل پتانسیل حرارتی-تابشی نشان داد. ایشان همچنین بیان داشتند کمترین کسر اختلاف عملکرد محصولات مورد بررسی به‌ترتیب برای جو، سویا، چغندرقند، گندم، پنبه و ذرت بدست آمده است که خود به‌عنوان ضریب اکولوژیکی در الگوی کشت منطقه نیز می‌تواند در نظر گرفته شود. محمدی و همکاران (۱۳۹۸) برای بهینه‌سازی مقدار آب آبیاری و آبشویی از مدل AquaCrop واسنجی و صحت‌سنجی شده، برای یک رقم گندم بهاره در منطقه مشهد و دو رقم گندم زمستانه در منطقه بیرجند استفاده کردند. بدین منظور کد نویسی در فضای نرم‌افزار MATLAB صورت گرفت. نتایج بهینه‌سازی حاکی از آن بود که با کاهش آب آبیاری و پذیرش کاهش سود به‌مقدار ناچیز می‌توان مشکلات زیست محیطی ناشی از زه‌آب تولیدی را در مناطق مورد بررسی برطرف کرده و به‌این ترتیب از نارضایتی زارعین نیز کاست. کاشفی نژاد و هوشمند (۱۳۹۹) با هدف

1 Water resources vulnerability index

بیشینه‌سازی سود اقتصادی از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی تخصیص آب شبکه‌ی آبیاری مارون استفاده کردند. نتایج نشان داد که وضعیت فعلی تخصیص آب در شبکه‌ی آبیاری مارون بهینه نبوده و با بهینه‌سازی این تخصیص، سود اقتصادی به میزان ۱۶/۴ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که به دلیل افزایش سطح زیر کشت، تغییر چندانی در مصرف آب صورت نمی‌گیرد.

مطالعات خارجی

Katerji et al., (2013) مدل AquaCrop را برای دو گیاه ذرت و گوجه‌فرنگی در سه سطح تنش ارزیابی کردند. آنها نشان دادند که این مدل ابزاری توانمند برای شبیه‌سازی پوشش سبز، تبخیر- تعرق واقعی گیاه و ماده خشک در مقیاس روزانه و بهره‌وری مصرف آب، عملکرد و ماده خشک نهایی در مقیاس فصلی است. در پژوهشی در اسپانیا، محققین توابع تولید چهار محصول اصلی را با استفاده از مدل AquaCropاستخراج کردند. سپس با استفاده یک مدل بهینه‌سازی در مقیاس مزرعه، آب مصرفی محصولات منتخب را بهینه کردند. نتایج این محققان نشان داد که استفاده از گیاهان با آب مصرفی پایین‌تر باعث آزاد شدن آب برای تولید گیاهان با آب مصرفی بیشتر و دارای ارزش اقتصادی بالاتر می‌شود. همچنین تغییر الگوی کشت می‌تواند همزمان باعث صرفه‌جویی در آب و افزایش سود اقتصادی شود (García-Vilaa & Fereresa, 2012). در این پژوهش از یک مدل بهینه‌ساز در مقیاس مزرعه‌ای و محلی استفاده شد.

Kanooni & Monem (2014) برای حل مشکل تخصیص بهینه آب در یک کانال آبیاری، یک رویکرد یکپارچه که هر دو مدل بهینه‌سازی در سطح مزرعه و کانال‌های توزیع را توام در نظر می‌گیرد، بر روی کانال K شبکه آبیاری مغان در شمال غرب ایران ارائه کردند. اهداف مختلفی برای این منظور بصورت همزمان در نظر گرفته شد و با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) متغیرهای تصمیم بهینه شدند. نتایج حاکی از آن بود که زمانی که آب محدود باشد، آب بیشتری به محصولاتی اختصاص می‌یابد که نسبت به کمبود آب حساس‌تر هستند. بنابراین با استفاده از یک رویکرد یکپارچه، حداکثر سود در سطح مزرعه و حداکثر کفایت با حداقل تلفات آب در سطح کانال به طور همزمان برآورده شد. در این پژوهش برای محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل محصولات از روش پنمن-مونتیت استفاده شد؛ همچنین برای ارزیابی پاسخ عملکرد گیاه به آب از تابع تولید تجربی دورنباس و کسام (Doorenbos & Kassam, 1979) استفاده شد.

Rabie et al., (2015) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی تخصیص آب را برای کانال اردیبهشت منطقه درودزن فارس انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که علاوه بر کاهش مصرف آب در شرایط تخصیص بهینه، می‌توان سطح کشت را نیز تا ۱۲ ٪ کاهش داد. برای منطقه ماندوقات در هندوستان Rath et al., (2017) نشان دادند که بهینه‌سازی تخصیص آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک، سود اقتصادی را تا میزان ۶۸٪ افزایش می‌دهد. Rath et al., (2018) در پژوهشی دیگر به بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای شبکه آبیاری هیراکود هند پرداختند. الگوی کشت پیشنهادی آنها میزان سود اقتصادی را تا ۴۸٪ افزایش داد. در این پژوهش‌ها برای بهینه‌سازی برنامه آبیاری از مدل‌های گیاهی استفاده نشده است.

در پژوهشی در چین، پژوهشگران از مدل AquaCrop برای بهینه‌سازی برنامه آبیاری گندم زمستانه تحت سناریوهای هیدرولوژیکی خشک، نرمال و مرطوب استفاده کردند. اهداف بهینه‌سازی در این پژوهش شامل عملکرد محصول، کارایی مصرف آب آبیاری (WUE) و سود اقتصادی بود. نتایج نشان داد برنامه آبیاری بهینه، بهتر از برنامه آبیاری اعمال‌شده توسط کشاورزان عمل می‌کند، همچنین منجر به افزایش عملکرد محصول، افزایش سود اقتصادی و افزایش کارایی مصرف آب (WUE) می‌شود (Guo et al., 2021).

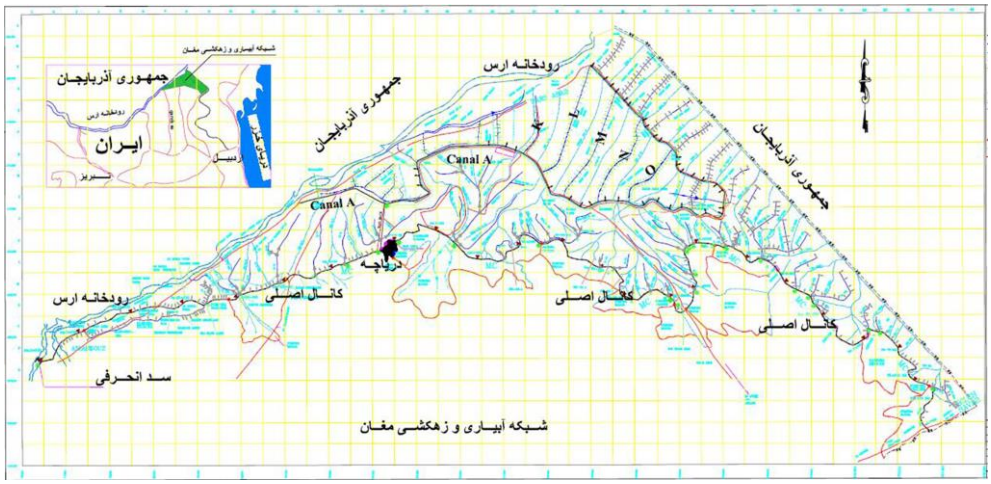
روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

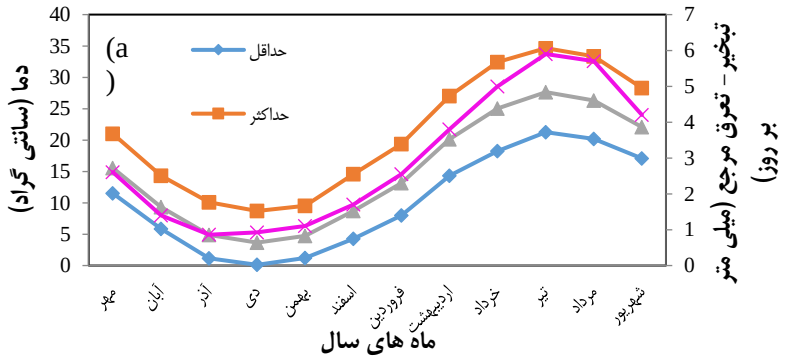
دشت مغان در حد فاصل طول جغرافیایی شرقی ۴۷ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۵ دقیقه و عرض جغرافیایی شمالی ۳۹ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه واقع در شمال غرب ایران است. شبکه آبیاری و زهکشی مغان با بهره‌برداری از منابع آب رودخانه ارس و به‌منظور آبیاری ۷۲ هزار هکتار از اراضی دشت مغان احداث شده است. ناحیه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش، در منطقه‌ی آبیاری پارس‌آباد قرار دارد. کانال A، کانال اصلی این منطقه است که ۲۱۸۴۰ هکتار از اراضی دشت مغان را شامل می‌شود. این کانال در محل سه‌پل با دبی ۲۴ مترمکعب در ثانیه تغذیه می‌شود و در امتداد غرب به شرق زمین‌های تحت پوشش خود را آبیاری می‌کند و بعد از طی مسافت ۳۹ کیلومتر، در جهت جنوب‌شرق به شمال غرب تغییر مسیر داده و با طول ۲۲ کیلومتر با نام کانال A برگشتی ادامه می‌یابد. کانال M که از

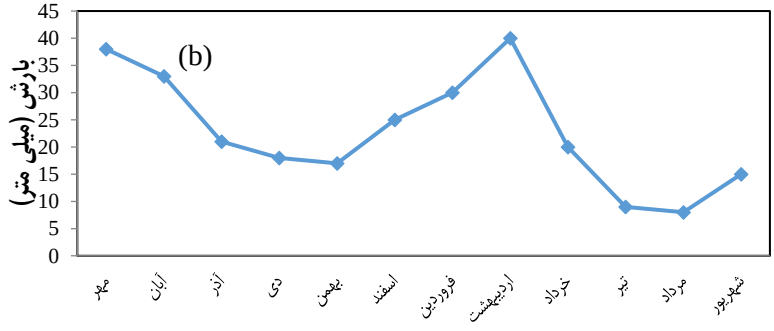
کانال A منشعب می‌شود با سطح تحت پوشش حدود ۲۰۰۰ هکتار و ظرفیت حدود ۳ مترمکعب بر ثانیه در این پژوهش به‌عنوان واحد تحلیل آبیاری، درنظر گرفته شده است (شکل ۱). در سال زراعی ۹۹-۹۸ محصولات عمده کشت شده در کانال M، گندم، ذرت دانه‌ای (کشت اول و دوم)، سویا و یونجه بوده است. در جدول ۱ برخی از اطلاعات مربوط به گیاهان منتخب ارائه شده است.

در این پژوهش جهت تهیه اطلاعات هواشناسی، از میانگین آمار بلند مدت (۲۰ ساله) ایستگاه هواشناسی پارس‌آباد استفاده شد (شکل ۲). در جدول ۲ اطلاعات خاک غالب منطقه پارس‌آباد ارائه شده است. اطلاعات مربوط به محصولات کشت شده در منطقه از قبیل عملکرد (متوسط و حداکثر)، تاریخ کاشت و برداشت، مقادیر هزینه تولید در واحد سطح (شامل هزینه مراحل آماده‌سازی زمین، کاشت، داشت و برداشت)، هزینه سالیانه آب آبیاری برای شبکه مورد بررسی و سایر اطلاعات محلی از سازمان جهاد کشاورزی استان اردبیل تهیه شد. لازم به ذکر است که بر اساس تعرفه‌های شرکت آب‌منطقه‌ای استان اردبیل، هزینه آب‌بها در شبکه آبیاری مدرن مغان به‌طور متوسط سه درصد عملکرد محصول برداشت شده است. قیمت واحد فروش محصولات نیز از گزارشات مرکز آمار ایران گردآوری و استفاده شد.



شکل ۱. موقعیت شبکه‌ی آبیاری مغان





شکل ۲. متوسط مقادیر بلند مدت تبخیر- تعرق گیاه مرجع و دمای حداقل، حداکثر، میانگین (a) و میانگین مقادیر بارندگی بلند مدت (b) در شبکه آبیاری مغان

جدول ۱. ویژگی‌های محصولات عمده شبکه آبیاری مغان بر اساس داده‌های ۱۳۹۸

محصول	مساحت کشت (هکتار)	حداکثر عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	متوسط عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	تاریخ کاشت	تاریخ برداشت	هزینه تولید در هکتار (هزار ریال)	فروش واحد (ریال در کیلوگرم)	آب‌بها (ریال در هکتار)
گندم	۱۴۴۴	۶۵۰۰	۴۲۰۰	دهه دوم آبان	دهه آخر خرداد	۳۲۰۰۰	۳۶۴۰۰	۴۵۸۶۴۰۰
ذرت دانه‌ای کشت اول	۵۷۰	۹۸۰۰	۷۴۰۰	دهه دوم اردیبهشت	دهه آخر شهریور	۴۰۵۰۰	۳۶۰۰۰	۷۹۹۲۰۰۰
ذرت دانه‌ای کشت دوم	۸۸۰	۷۲۰۰	۵۰۰۰	دهه اول تیر	دهه اول آبان	۳۷۵۰۰	۳۶۰۰۰	۵۴۰۰۰۰۰
سویا	۲۸۰	۳۸۰۰	۲۵۰۰	دهه اول تیر	دهه اول آبان	۳۴۴۰۰	۵۶۰۰۰	۴۲۰۰۰۰۰
یونجه	۱۴۸	۱۵۰۰۰	۱۲۰۰۰	دهه اول فروردین	–	۳۵۷۰۰	۲۵۰۰۰	۸۹۷۵۵۲۰

جدول ۲. اطلاعات خاک غالب منطقه پارس‌آباد

چگالی ظاهری	نقطه پژمردگی	ظرفیت مزرعه	هدایت الکتریکی	رس	سیلت	شن	بافت خاک
gr cm^{-3}	%	%	dS/m	%	%	%	
۱/۴۲	۲۰	۳۰	۱/۸	۳۶	۴۰	۲۴	لومی رسی

مدل AquaCrop

مدل آگروهیدرولوژی AquaCrop برنامه‌ای است پیشرفته که تاکنون نسخه‌های گوناگونی از آن توسط سازمان خوار و بار جهانی (FAO) منتشر شده است. این مدل با وجود داده‌های ورودی نسبتاً ساده، بر مبنای فرآیندهای پیچیده بیوفیزیکی بنا نهاده شده است (Steduto et al., 2009). اولین نسخه از این مدل که دارای رابط کاربری بود در سال ۲۰۰۷ منتشر شد؛ همچنین اولین نسخه بدون رابط کاربری آن نیز در سال ۲۰۱۵ با نام AquaCrop plug-in منتشر شد. مدل AquaCrop رویکرد جدیدی نسبت به رابطه Doorenbos & Kassam (۱۹۷۹) ارائه می‌کند. محاسبه تبخیر- تعرق در این برنامه بر اساس روش ضریب گیاهی دوگانه انجام می‌شود (Steduto et al., 2012). تفکیک تبخیر- تعرق به تعرق گیاه و تبخیر از سطح خاک باعث می‌شود که تبخیر که همان بخش غیر مؤثر آب در تولید محصول است، در نظر گرفته نشود. این مهم به‌خصوص زمانی که پوشش گیاهی، کامل نیست، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. تفکیک عملکرد محصول (Y) به زیست توده (B) و شاخص برداشت (HI) نیز باعث می‌شود که روابط بین شاخص برداشت و محیط، از روابط بین زیست توده و محیط متمایز شود. لذا اثر تنش آبی بر HI و B به‌طور جداگانه ارزیابی می‌شود. در نتیجه تغییرات ذکر شده منجر به توسعه روابط زیر در هسته رشد مدل گیاهی AquaCrop می‌شود.

$$ET = E + T_r \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$Y = HI \times B \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$B = WP \sum Tr \quad \text{(رابطه ۳)}$$

در این رابطه WP مؤلفه بهره‌وری آب یا همان کیلوگرم زیست‌توده در هر مترمربع به ازای مجموع تعرق محصول در زمان شکل گرفتن زیست‌توده و T_r تعرق گیاه (میلی‌متر) است. مقدار WP در شرایط اقلیمی مشابه و برای گیاه مشخص ثابت در نظر گرفته می‌شود (Hanks, 1983). همچنین با نرمال کردن مناسب WP، مقدار آن برای گیاه مشخص و برای شرایط اقلیمی مختلف نیز به یک پارامتر ثابت تبدیل می‌شود (Steduto et al., 2009).

برنامه AquaCrop plug-in

FAO، برنامه AquaCrop plug-in را که روش‌های محاسباتی آن مشابه برنامه استاندارد AquaCrop می‌باشد ارائه کرده است (Raes et al., 2012). برنامه plug-in گنجاندن AquaCrop را در دیگر برنامه‌ها تسهیل می‌کند. همچنین می‌توان اجرای شبیه‌سازی را بدون رابط کاربری انجام داد. برنامه plug-in پروژه‌های متوالی را اجرا می‌کند و نتایج شبیه‌سازی (روزانه، ۱۰ روزه، ماهانه و فصلی) هر پروژه را در یک فایل خروجی ذخیره می‌کند که شامل اطلاعات مربوط به دوره‌ی شبیه‌سازی، اقلیم، بیلان آب و خاک، عملکرد محصول و ... است

(Raes et al., 2012). در این پژوهش از نسخه‌ی ۶,۰ برنامه‌ی AquaCrop plug-in استفاده شده است.

در این پژوهش به این دلیل که عملکرد پتانسیل و مقدار آب متناظر آن مورد نظر است، در ابتدا مدل AquaCrop برای هر محصول، در حالت آبیاری خودکار (Net Irrigation Water Requirement) اجرا شد. جهت تخصیص آب به الگوی کشت، سال زراعی به ۳۶ دوره ۱۰ روزه تقسیم شد. عملکرد پتانسیل و مقدار آب متناظر محاسبه شده از اجرای مدل نیز، به‌عنوان ورودی‌های مدل بهینه‌ساز در نظر گرفته شدند. سپس در کد بهینه‌ساز، برنامه‌ریزی آبیاری مدل AquaCrop plug-in، در حالت عمق و زمان تعیین شده با معیار مشخص (Generation of irrigation schedule) و با در نظر گرفتن معیار زمان آبیاری براساس دور آبیاری و معیار عمق آبیاری برپایه رطوبت در حد ظرفیت زراعی پیاده‌سازی شد. در این پژوهش نرم‌افزار AquaCrop نقش توابع تولید در شرایط مختلف آبیاری را ایفا می‌کند.

اولین مرحله در استفاده از مدل‌های همانندساز، واسنجی آن برای محصولات زراعی مورد پژوهش و شرایط منطقه‌ی مورد مطالعه است. با توجه به اینکه هدف این پژوهش استفاده و کاربرد مدل AquaCrop در برنامه‌ریزی و مدیریت آب است (واسنجی و کالیبره کردن مدل جزو اهداف پژوهش پیش‌رو نیست) و از طرفی در منطقه دشت مغان مطالعات زیادی برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل AquaCrop برای محصولات زراعی مهم انجام شده است (ایزدفرد و همکاران، ۱۳۹۶; ادبی و همکاران، ۱۳۹۸; Izadfard et al., 2021)، لذا در این پژوهش جهت تعیین مؤلفه‌های واسنجی شده برای گیاهان مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه، از نتایج Izadfard et al. (2021) استفاده شد. مؤلفه‌های مورد استفاده در مدل AquaCrop برای پنج گیاه عمده شبکه آبیاری مغان در جدول ۳ ارائه شده است. در برخی شرایط برای گیاهان علوفه‌ای مانند یونجه، میانگین اثر چند چین در کل فصل رشد مورد نظر است. در این حالت، یک منحنی ضریب گیاهی عادی رسم می‌شود که در آن تنها یک مرحله میانی رشد کلی برای محصول نشان داده می‌شود (Allen et al., 1998). لازم به ذکر است که در این پژوهش برای گیاه یونجه، میانگین اثر چند چین در کل فصل رشد مورد نظر است؛ لذا برای این گیاه از ضرایب گیاهی و همچنین طول فصل رشد، برای حالت میانگین اثر چند چین استفاده شد (Allen et al., 1998).

جدول ۳. مؤلفه‌های واسنجی مدل AquaCrop برای پنج گیاهی عمده در منطقه دشت مغان (Izadfard et al., 2021)

پارامترهای محصول	Crop parameters	واحد	گندم	ذرت دانه‌ای کشت اول	ذرت دانه‌ای کشت دوم	سویا	یونجه
مؤلفه‌های گیاهی	Growth factors						
دمای پایه (Tbase)	Base temperature	˚C	۰	۸	۸	۵	۰
دمای حداکثر (Tcut-off)	Cut-off temperature	˚C	۲۶	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
بهره‌وری آب نرمال شده برای اقلیم و CO_2	Crop water productivity	g/m^2	۱۵	۳۳/۷	۳۳/۷	۱۵	۱۷
آستانه بالای تخلیه رطوبتی خاک برای گسترش کانوپی (Pupper)	Expansion upper threshold	-	۰/۲	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۲
آستانه پایین تخلیه رطوبتی خاک برای گسترش کانوپی (Plower)	Expansion lower threshold	-	۰/۶۵	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۷
مؤلفه‌های مورفولوژیک	Morphologic factors						
پوشش کانوپی اولیه در زمان تکمیل ٪ ۹۰ سبز شدن (CC_0)	Initial canopy cover	%	۶/۷۵	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۱	۱/۸
حداکثر کانوپی گیاهی (CC_x)	Maximum canopy cover	%	۸۸	۸۹	۸۹	۷۸	۸۷
ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)	Canopy growth coefficient	%/day	۳/۹	۱۲/۷	۱۲/۷	۱۳/۶	۲۱/۹
ضریب کاهش کانوپی (CDC)	Canopy decline coefficient	%/GDD	۰/۳۸	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۱۵	۰/۸
حداکثر عمق مؤثر ریشه	Maximum root depth	m	۱/۵	۲/۳	۲/۳	۲	۱/۵
مؤلفه‌های فنولوژیک	Phenology factors						
زمان از کاشت تا سبز شدن	Time to emergence	GDD	۱۵۰	۹۶	۱۲۰	۱۶۲	-
زمان از کاشت تا حداکثر کانوپی	Time to reach full canopy	GDD	۱۲۰۳	۹۰۱	۷۶۶	۹۹۸	۷۵
زمان از کاشت تا شروع پیری	Time to reach senescence	GDD	۱۷۰۴	۱۶۶۴	۱۴۴۳	۱۶۰۹	۳۶۲
زمان از کاشت تا بلوغ فیزیولوژیکی	Time to reach harvest	GDD	۲۴۱۴	۲۱۶۵	۱۷۲۳	۲۰۰۱	۳۷۶
مؤلفه‌های کاشت	Planting and harvest factors						
شاخص برداشت	Harvest index	%	۴۸	۴۸	۴۸	۴۰	۸۵

مدل تخصیص بهینه آب

در پژوهش‌های زیادی از الگوریتم ژنتیک برای تولید داده‌های آبیاری و مساحت محصولات استفاده شده است (Rabie et al., 2015; Guo et al., 2021). لذا در این پژوهش جهت تخصیص آب به محصولات شبکه‌ی آبیاری مغان از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده شد. برای این منظور کدنویسی سی شارپ (#C) در فضای ویژوال استودیو انجام شد. الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های هوشمند در مسائل بهینه‌سازی است. این الگوریتم مبتنی بر تکرار است. در این روش مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم یا کروموزوم‌ها که بر تابع هدف مؤثر هستند جمعیت اولیه (راه حل‌های ممکن) را تشکیل می‌دهند. در ادامه اجرای عملگرهای ژنتیک مثل انتخاب، تلاقی و جهش روی متغیرهای تصمیم جمعیت اولیه، منجر به تولید نسل جدیدی می‌شوند که شایستگی بیشتری دارند. این روند در نسل‌های مختلف تکرار می‌شود (Goldberg, 1989). به‌این ترتیب اعضا یا راه‌حل‌های بهتر در طول نسل‌ها به تکامل می‌رسند. سپس بر اساس مقدار تابع هدف، بهترین جواب‌ها را از میان جواب‌های موجود در قالب نسل جدید دسته‌بندی می‌کند. این روند تا جایی تکرار می‌شود که نسل جدیدی تولید نشود. مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک در پژوهش حاضر برای رسیدن به بهترین جواب در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ٤. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک

تعداد تکرار نسل	اندازه جمعیت	احتمال جهش	احتمال تقاطع
۵۰۰	۲۰۰	۰/۱	۰/۷

به‌طور کلی مدل‌های تخصیص آب و زمین از دو بخش تابع هدف و محدودیت‌ها تشکیل می‌شوند. تابع سود اقتصادی به عنوان تابع هدف اصلی در بیشتر پژوهش‌های مربوط به برنامه‌ریزی آبیاری در نظر گرفته می‌شود (Rath et al., 2018; Kumar & Yadav., 2019). محدودیت زمین و منابع آب نیز از محدودیت‌هایی هستند که در مسایل تخصیص بهینه منابع آب حائز اهمیت می‌باشند (Kuo, et al., 2000)، لذا این دو عامل به‌عنوان محور تصمیم و برنامه‌ریزی قرار می‌گیرد. بنابراین در این مدل متغیرهای تصمیم، ارتفاع آب آبیاری (IR) و سطح زیر کشت (A) برای هر یک از گیاهان منتخب هستند. تخصیص آب در این مدل با هدف حداکثرسازی سود اقتصادی (EB[1]) انجام شد. در معادله ۴ تابع سود اقتصادی برای الگوی کشت نشان داده شده است:

$$EB = \sum_{i=1}^{n} A_i \times (Y_i \times P_i - C_i - P_w \times IR) \quad \text{(رابطه ۴)}$$

در این روابط Y_i عملکرد هر محصول (کیلوگرم بر هکتار)، P_i قیمت فروش هر محصول (ریال بر کیلوگرم)، C_i قیمت تولید هر محصول (ریال بر هکتار)، P_{wi} هزینه آب برای هر گیاه (ریال بر مترمکعب)، IR ارتفاع آب آبیاری (ارتفاع آب آبیاری عبارت است از: راندمان/عمق خالص آبیاری) برای هر گیاه (میلی‌متر)، E راندمان آبیاری، A_i مساحت سطح زیر کشت هر گیاه (هکتار) و i شماره هر محصول است. لازم به ذکر است که بر اساس اطلاعات سازمان جهاد کشاورزی استان اردبیل راندمان آبیاری در شبکه آبیاری مغان ۵۰ درصد در نظر گرفته شد. مدل پژوهش پیش‌رو با محدودیت‌هایی همراه است. شرایط حاکم بر مدل بهینه‌ساز به شرح زیر است:

مطابق با رابطه ۵ مجموع سطح زیر کشت محصولات زراعی مختلف در هر دوره نباید از سطح اراضی قابل کشت منطقه بیشتر شود.

$$\sum_{i=1}^{i} A_{i,d} \leq AT \quad \text{(رابطه ۵)}$$

که $A_{i,d}$ و AT به‌ترتیب سطح زیر کشت گیاه i در دوره‌ی d و کل سطح اراضی قابل کشت در منطقه هستند.

با اعمال کم‌آبیاری می‌توان میزان مصرف آب را کاهش و یا سطح زیر کشت محصولات را افزایش داد. اگرچه که اعمال کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد محصول باعث تغییر در مقدار عملکرد آن می‌شود. در این پژوهش درصد کم‌آبیاری کمتر از ۲۵٪ و همچنین در صورت نیاز ۲۵٪ پرآبیاری برای تأمین نیاز آبشویی (با در نظر گرفتن راندمان) در نظر گرفته شد. لذا دامنه‌ی تغییر عمق آبیاری خالص در هر دهه به صورت زیر است:

$$0.75 \times NetIrri_{i,d} \leq NIR_{i,d} \leq 1.25 \times NetIrri_{i,d} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

در این رابطه $NetIrri_{i,d}$ و $NIR_{i,d}$ به‌ترتیب نیاز آبیاری گیاه و عمق آبیاری گیاه i در دوره‌ی d هستند.

1 Economic Benefit

مجموع حجم آب آبیاری مورد استفاده برای محصولات در هر دوره نباید بیشتر از حجم موجودی آب در همان دوره باشد (رابطه‌ی ۷ و ۸).

$$V_d = \sum_{i=1}^{i} IR_{i,d} \times A_i \quad \text{(رابطه ۷)}$$

$$V_d \leq W_d \quad \text{(رابطه ۸)}$$

در این رابطه $IR_{i,d}$ و V_d به‌ترتیب ارتفاع آب آبیاری ناخالص برای گیاه i در دوره d و مجموع حجم آب مورد استفاده برای همه محصولات در دوره‌ی d است. W_d نیز حجم موجودی آب آبیاری در دوره‌ی d است.

ارزیابی الگوریتم

برای ارزیابی نتایج بهینه‌سازی کافی است الگوریتم برای داده‌هایی که نتایج آن قابل پیش‌بینی است، آزمون شود. لذا الگوریتم در حالت‌های زیر بررسی شد:

آب هزینه‌ای ندارد و سایر هزینه‌ها و قیمت همه محصولات یکسان است، در این حالت الگوریتم محصولی را انتخاب می‌کند که بیشترین عملکرد را دارد.

آب هزینه‌ای ندارد و با در نظر گرفتن هزینه یکسان برای کشت محصولات، در حالتی که عملکرد دو یا چند محصول یکسان باشد، الگوریتم محصولی را انتخاب می‌کند که قیمت فروش بیشتری دارد. درحالتی که عملکردها یکسان نباشد، محصولی انتخاب می‌شود که حاصلضرب عملکرد در قیمت آن بالاتر باشد.

با در نظر گرفتن هزینه و قیمت یکسان برای کشت محصولات، در حالتی که عملکرد دو یا چند محصول یکسان باشد، الگوریتم محصولی را انتخاب می‌کند که کمترین نیاز آبیاری را دارد. در حالتی که عملکردها یکسان نباشد، محصولی انتخاب می‌شود که بیشترین عملکرد به ازای کمترین آب مصرفی را داشته باشد.

نتایج و بحث

تخصیص بهینه آب و زمین

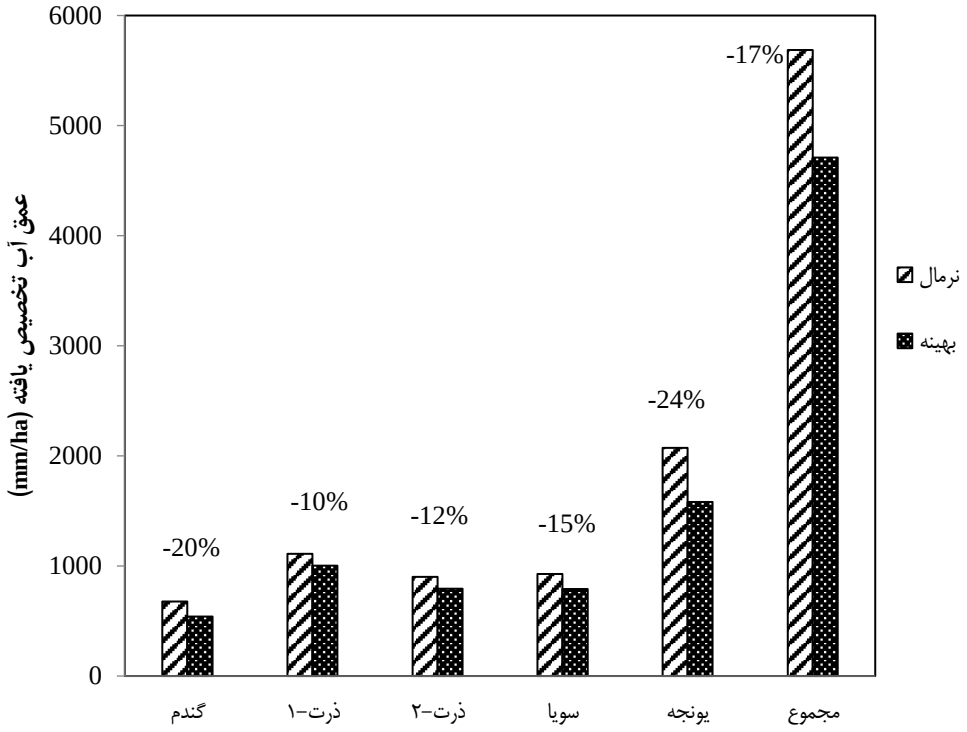
با اجرای برنامه بهینه‌ساز، سطح کشت بهینه محصولات مورد بررسی بدست آمد. جدول ۵ سطح کشت محصولات واحد تحلیل آبیاری را در وضعیت فعلی در مقایسه با وضعیت تخصیص بهینه نشان می‌دهد. شرایط تخصیص بهینه سطح زیر کشت به صورتی است که مدل با هدف افزایش سود اقتصادی، کاهش هزینه‌ها و رعایت محدودیت‌ها، محصولی را در اولویت قرار می‌دهد که سود اقتصادی بیشتر و نیازآبی کمتری نسبت به سایر محصولات داشته باشد. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که در الگوی کشت بهینه، مساحت زیر کشت محصولات گندم، ذرت دانه‌ای کشت اول و یونجه به‌ترتیب ۲/۵، ۳/۲ و ۳/۴ درصد نسبت به سطح اولیه افزایش داشته است. در بین محصولات، گندم نیاز آبی کمتری نسبت به سایر محصولات دارد اما محصولات ذرت دانه‌ای کشت اول و یونجه با وجود اینکه نیاز آبی بالاتری دارند، به دلیل عملکرد بالاتر و در نتیجه ارزش اقتصادی بیشتر نسبت به سایر محصولات، افزایش سطح بیشتری داشته‌اند. میزان سطح کشت محصولات ذرت دانه‌ای کشت دوم و سویا به ترتیب ۲/۳ و ۱/۸ درصد کاهش داشته است که احتمالاً این کاهش مربوط به بازدهی هر مترمکعب آب مصرفی و کمبود آب در تابستان است.

جدول ۵. مقایسه سطح کشت فعلی و بهینه محصولات زراعی شبکه‌ی آبیاری مغان

محصول	سطح زیر کشت موجود (ha)	سطح زیر کشت بهینه (ha)	درصد تغییرات (%)
گندم	۱۴۴۴	۱۴۸۰	۲/۵
ذرت دانه‌ای کشت اول	۵۷۰	۵۸۸	۳/۲
ذرت دانه‌ای کشت دوم	۸۸۰	۸۶۰	-۲/۳
سویا	۲۸۰	۲۷۵	-۱/۸
یونجه	۱۴۸	۱۵۳	۳/۴

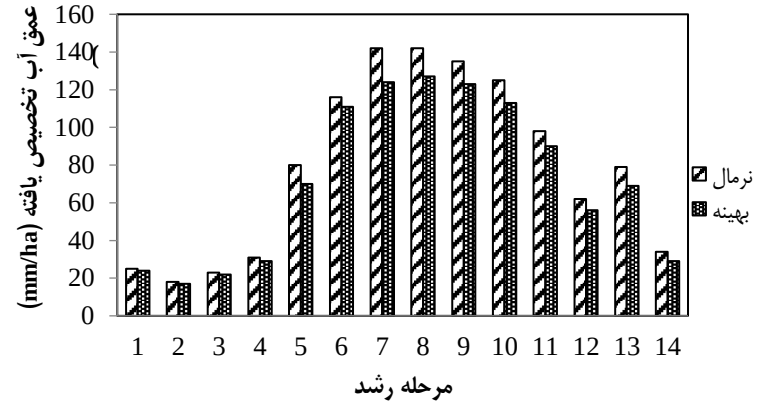
مطابق با توضیحات ارائه شده در قسمت مواد و روش‌ها، ابتدا مدل AquaCrop برای هر محصول، در حالت Net Irrigation

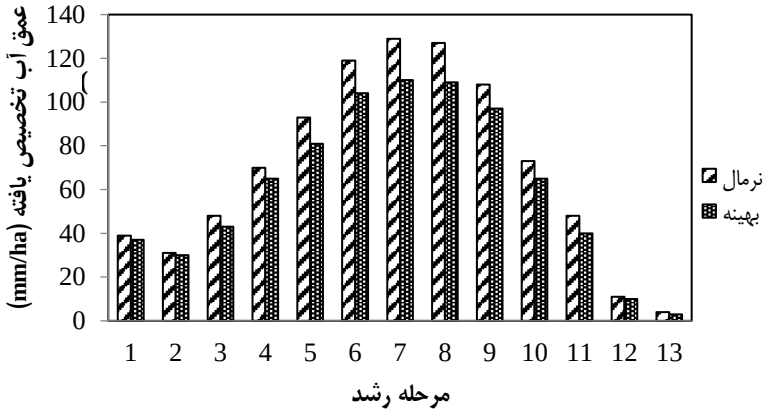
Water Requirement اجرا شد. لذا عملکرد پتانسیل و مقدار عمق آب محاسبه شده از اجرای این برنامه به‌عنوان وضعیت نرمال در نظر گرفته شد. شکل ۳ مقایسه عمق آب تخصیص یافته محصولات زراعی را در دو وضعیت نرمال و بهینه نشان می‌دهد. مطابق با نتایج این شکل عمق آب تخصیص یافته در حالت بهینه برای تمام محصولات کمتر از عمق آب تخصیص یافته در حالت نرمال است. بیشترین درصد کاهش عمق آب تخصیص یافته مربوط به گیاه یونجه و به میزان ۲۴ درصد و کمترین آن نیز مربوط به گیاه ذرت دانه‌ای کشت اول و به میزان ۱۰ درصد است. مقداری از آب مورد نیاز ذرت‌دانه‌ای کشت اول در طول فصل رشد از طریق بارش تأمین می‌شود. در مورد یونجه نیز می‌توان گفت که یونجه محصولی است که در تمام طول سال رشد و نمو می‌کند بنابراین توانسته است نسبت به سایر محصولات آب کمتری دریافت نماید. برای کل محصولات مورد بررسی، عمق آب تخصیص در حالت بهینه نسبت به حالت نرمال باعث صرفه‌جویی در مصرف آب به‌میزان ۱۷ درصد شده است.

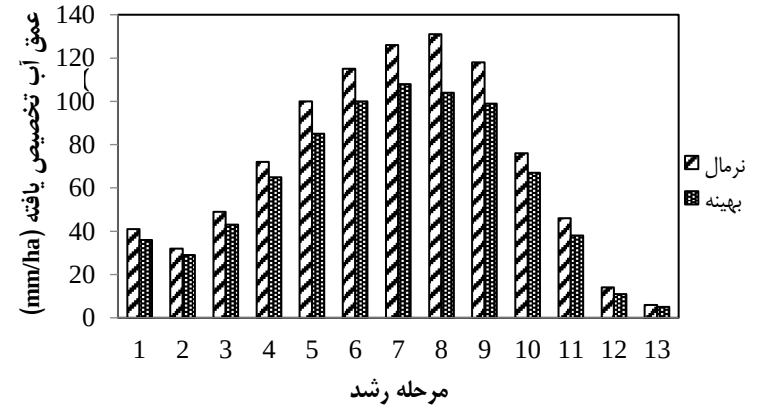


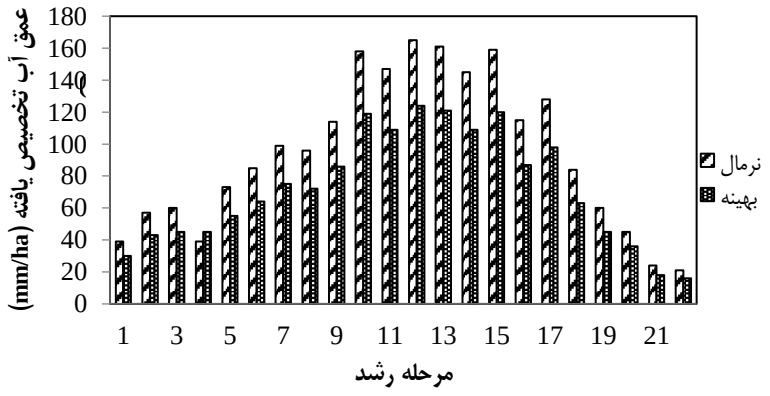
شکل ۳. مقایسه عمق آب تخصیص یافته محصولات زراعی در وضعیت نرمال و بهینه

مدل قادر به اجرا کردن کم‌آبیاری کمتر از ۲۵ درصد و همچنین بیش‌آبیاری تا ۲۵ درصد است. در شکل ۴ توزیع عمق آب بهینه و نرمال در طول دوره رشد، برای چهار گیاهی که در تابستان و بهار کشت می‌شوند و در شکل ۵ برای گیاهی که در پاییز کشت می‌شود نشان داده شده است. برای گیاه ذرت دانه‌ای کشت اول (شکل ۴(a))، ذرت دانه‌ای کشت دوم (شکل ۴(b)) و سویا (شکل ۴(c)) توزیع عمق آب بهینه در کل دوره‌های رشد کمتر از عمق آب نرمال بوده است. اما برای گیاه یونجه (شکل ۴(d)) در دوره چهارم رشد (دهه اول اردیبهشت) به‌میزان ۱۵ درصد بیش‌آبیاری انجام شده است. برای گیاه گندم (شکل ۵) در دوره ۳۴ و ۳۵ رشد (دهه اول و دوم اسفند ماه) به‌ترتیب ۷ و ۱۷ درصد بیش‌آبیاری در نظر گرفته شده است. این میزان بیش‌آبیاری به این دلیل است که در دوره‌های آبیاری قبلی مقدار عمق آب مصرفی بهینه کمتر از میزان عمق آب نرمال بوده است و در آن دوره خاص باعث کاهش محتوای رطوبت خاک در ناحیه ریشه شده است؛ لذا مدل برای جبران این کمبود، بیش‌آبیاری را انتخاب نموده است که علاوه بر جبران کمبود محتوای رطوبتی خاک به آبشویی آن نیز کمک می‌کند. در بقیه دوره رشد گیاه گندم و یونجه، توزیع عمق آب بهینه در کل دوره‌های رشد کمتر از عمق آب نرمال بوده است.

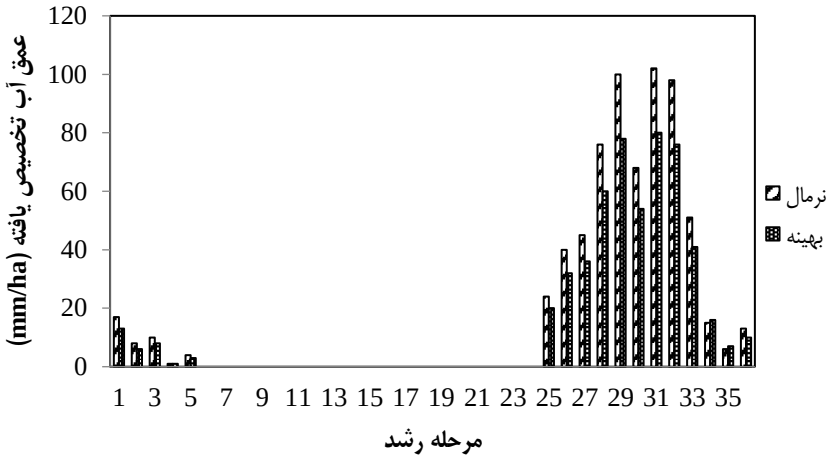








شکل ٤. مقایسه توزیع عمق آب نرمال و بهینه در دوره‌های رشد گیاه ذرت دانه‌ای کشت اول (a)، ذرت دانه‌ای کشت دوم (b)، سویا (c) و یونجه (d)



شکل ۵. مقایسه توزیع عمق آب نرمال و بهینه در دوره‌های رشد گیاه گندم

جدول ٦. مقایسه میزان سود اقتصادی و آب مصرفی در وضعیت نرمال و بهینه

محصول	مدیریت نرمال			مدیریت بهینه			درصد افزایش سود	درصد کاهش آب مصرفی
	عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	سود (میلیون ریال)	حجم آب مصرفی (میلیون مترمکعب)	عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	سود (میلیون ریال)	حجم آب مصرفی (میلیون مترمکعب)		
گندم	۶۴۰۰	۲۹۰۱۸۰	۹/۷۹	۶۶۴۰	۳۱۰۳۴۵	۸/۰۱	۷	۱۸/۲
ذرت دانه‌ای کشت اول	۹۶۹۰	۱۷۵۷۴۹	۶/۳۲	۱۰۱۶۶	۱۹۱۳۷۶	۵/۹۰	۹	۶/۶
ذرت دانه‌ای کشت دوم	۶۹۰۰	۱۸۵۵۸۷	۷/۹۳	۷۱۳۰	۱۸۸۴۹۱	۶/۸۳	۱/۶	۱۳/۹
سویا	۳۶۰۰	۴۶۸۱۵	۲/۵۹	۳۷۰۰	۴۷۵۱۹	۲/۱۷	۱/۵	۱۶/۲
یونجه	۱۴۸۴۰	۴۹۴۷۴	۳/۰۷	۱۵۳۵۰	۵۳۰۹۱	۲/۴۲	۷/۳	۲۱/۲
مجموع		۷۴۷۸۰۵	۲۹/۷۰		۷۹۰۸۲۲	۲۵/۳۳	۵/۷	۱۴/۷

برای تمامی محصولات مورد بررسی حجم آب مصرفی و میزان سود اقتصادی برای دو وضعیت نرمال و بهینه در جدول ۶ آورده شده است. بیشترین درصد افزایش میزان سود اقتصادی مربوط به گیاه ذرت دانه‌ای کشت اول، یونجه و گندم به‌ترتیب ۹، ۷/۳ و ۷ درصد است. کمترین افزایش میزان سود اقتصادی نیز مربوط به گیاه ذرت دانه‌ای کشت دوم و سویا است. این در حالی است که بیشترین و کمترین درصد کاهش حجم آب تخصیص یافته به‌ترتیب برای دو محصول یونجه (۱۸/۲) و ذرت دانه‌ای کشت اول (۶/۶ درصد) است. کانونی (۱۳۹۲) نیز نشان داد که برای منطقه دشت مغان در میان محصولات مورد مطالعه، بیشترین و کمترین درصد کاهش حجم آب تخصیص یافته بهینه به‌ترتیب مربوط به یونجه و ذرت دانه‌ای کشت اول می‌باشند. هرچند که سود اقتصادی طولانی مدت این محصولات موضوعی است که باید با در نظر گرفتن عواملی مانند افزایش شوری خاک، کیفیت آب زهکشی که وارد رودخانه می‌شود، تناوب زراعی مناسب و سایر عواملی که در طولانی مدت تاثیرگذار هستند، مورد بررسی قرار گیرد. در حالت تخصیص بهینه آب، حجم آب تخصیص یافته به میزان ۱۴/۷ درصد کاهش می‌یابد این در حالی است که سود اقتصادی تنها به میزان ۵/۷ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین تخصیص بهینه آب در این منطقه بیش از افزایش سود، صرفه‌جویی در مصرف آب را تشویق می‌کند. صرفه‌جویی در مصرف آب باعث افزایش ناچیزی در سود اقتصادی می‌شود که دلیل این امر هزینه ناچیز آب‌بها در شبکه مغان است؛ لذا بهره‌برداران آب را مانند کالایی بی‌ارزش به‌حساب آورده و با هر روشی که ترجیح می‌دهند از آن استفاده می‌کنند. این در حالی است که اگر قیمت صحیحی برای آب تعیین شود مقدار سود اقتصادی به میزان بیشتری افزایش خواهد یافت. یافته‌های پژوهشگران نشان داده است که قیمت‌گذاری آب به‌عنوان گزینه‌ای مهم در صرفه‌جویی آب توسط زارعین است (Chu and Grafton., 2020). همچنین اگر قیمت آب به‌درستی تعیین شود، زارعین نیز نسبت به آن کاملاً حساس خواهند بود (Huang et al., 2006). کاظم‌عطار و همکاران (۱۳۹۸) نشان دادند که قیمت فروش آب در شبکه آبیاری دشت قزوین بسیار پایین‌تر از قیمت تمام شده آن است و قیمت‌گذاری صحیح آب در این شبکه، به علت افزایش هزینه‌های زارعین باعث تشویق آنان به استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری شده که خود منجر به کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری خواهد شد.

نتیجه‌گیری

با به‌کارگیری مدل شبیه‌سازی AquaCrop plug-in و استفاده از مدل بهینه سازی الگوریتم ژنتیک می‌توان ضمن افزایش سود، مدیریت تخصیص آب و زمین در شبکه‌های آبیاری و زهکشی را بهبود بخشید. نتایج این پژوهش نشان داد برای منطقه مورد مطالعه، محصولاتی که در تابستان کشت می‌شوند کمترین درصد افزایش سود را دارند؛ این در حالی است که میزان سود اقتصادی ذرت دانه‌ای کشت اول، یونجه و گندم بیشترین درصد افزایش را به‌دنبال دارد که می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که کاشت این محصولات در کوتاه مدت سود اقتصادی بیشتری را به‌دنبال خواهد داشت. بیشترین کاهش حجم آب مصرفی نیز مربوط به گیاه یونجه است که بیانگر این موضوع است که این محصول به دلیل چندساله بودن با توسعه ریشه بیشتری همراه است و این خود عاملی است که می‌تواند باعث مصرف آب کمتر این محصول شود. در حالت کلی برای زمین‌های زراعی تحت پوشش کانال مورد بررسی، حجم آب تخصیص یافته در حالت بهینه به‌میزان ۱۴/۷ درصد کاهش یافته و علاوه بر این موضوع میزان سود اقتصادی نیز ۵/۷ درصد افزایش یافته است. این بدین معناست که تخصیص بهینه آب در شبکه آبیاری مغان بیش از افزایش سود، باعث صرفه‌جویی در مصرف آب می‌شود. دلیل آن نیز هزینه ناچیز آب‌بها در شبکه مغان است. لذا پیشنهاد می‌شود که سیاست قیمت‌گذاری صحیح آب در شبکه آبیاری مغان به صورت تدریجی اصلاح و اجرا شده و به‌منظور بسترسازی اجتماعی در بین بهره‌برداران بر مسئله بحران آب و قیمت‌گذاری آن تاکید گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

ادبی، وحید.، عزیزیان، اصغر.، رمضانی اعتدالی، هادی.، کاویانی، عباس.، آبابایی، بهنام. ۱۳۹۸. حساسیت موضعی مدل AquaCrop برای دو محصول گندم و ذرت در دو منطقه دشت قزوین و پارس‌آباد مغان. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۶(۱۳). ۱۵۷۹-۱۵۵۶.

ایزدفرد، امیر.، سرمدیان، فریدون.، جهانسوز، محمدرضا.، پیکانی، غلامرضا.، چایی‌چی، محمدرضا. ۱۳۹۶. مقایسه مدل AquaCrop و مدل پتانسیل حرارتی- تابشی تولید در برآورد عملکرد پتانسیل در بخشی از اراضی دشت مغان در استان اردبیل. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۸(۴). ۸۶۴-۸۵۳.

قوچانیان، مرجان.، فشائی، محمد. ۱۴۰۱. شاخص‌های مدیریت منابع آب با تمرکز بر حکمرانی. *نشریه آب و توسعه پایدار*. ۹(۱)، ۱۰-۱.

کاشفی‌نژاد، پیمان.، هوشمند، عبدالرحیم. ۱۳۹۹. تخصیص بهینه‌ی منابع آبی شبکه‌ی آبیاری مارون با هدف بیشینه‌سازی سود اقتصادی. *مجله پژوهش آب ایران*. ۱۴(۱)، ۴۹-۴۱.

کاظم‌عطار، هستی.، نوری، حمیده.، ابراهیمیان، حامد. ۱۳۹۸. تأثیر بهای واقعی آب بر گسترش سطح روش های آبیاری تحت فشار و بهبود بهره وری اقتصادی آب آبیاری (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین). *نشریه آبیاری زهکشی ایران*. ۱۴(۲)، ۶۲۵-۶۱۶.

کانونی، امین. ۱۳۹۲. توسعه مدل یکپارچه تخصیص و توزیع بهینه آب در بخش‌های مختلف شبکه‌های آبیاری. *رساله دکتری تخصصی رشته مهندسی سازه‌های آبی به راهنمایی محمدجواد منعم*. تهران: دانشگاه تربیت مدرس، گروه مهندسی سازه‌های آبی. ۱۷۷ صفحه.

محمدی، مسعود.، داوری، کامران.، قهرمان، بیژن. ۱۳۹۸. بهینه‌سازی مقدار آب آبیاری و آبشویی براساس تیمارهای مختلف مدیریت و شوری آب با استفاده از مدل AquaCrop. *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*. ۳۳(۲)، ۳۱۵-۲۹۹.

مرکز آمار ایران، سازمان برنامه و بودجه ریاست جمهوری. (۱۳۹۹). *قیمت فروش محصولات و هزینه خدمات کشاورزی در مناطق روستایی کشور*.

ولیزادگان، ابراهیم.، دیندارسوها، اسداله. ۱۴۰۰. مدل تخصیص بهینه آب و زمین به محصولات زراعی در شرایط قطعی و تصادفی. نشریه *حفاظت منابع آب و خاک*، ۱۰(۳)، ۴۶-۳۱.

REFERENCE

Adabi, V., Azizian, A., Ramezani Etedali, H., Kaviani, A., & Ababaei, B. (2020). Local sensitivity analysis of AquaCrop model for wheat and maize in qazvin plain and Moghan Pars-Abad in Iran. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 6(13), 1565-1579. (In Persian)

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, No 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Bastiaanssen, W. G. M., Allen, R. G., Droogers, P., D'Urso, G., & Steduto, P. (2007). Twenty five years modeling irrigated and drained soils: State of the art. *Agricultural Water Management*, 92(3), 111–125.

Chu, L., & Grafton, R. Q. (2020). Water pricing and the value-add of irrigation water in Vietnam: Insights

from a crop choice model fitted to a national household survey. *Agricultural Water Management*, 183, 453- 459.

Cortignani, R., & Severini, S. (2009). Modeling farmlevel adoption deficit irrigation using positive mathematical programming. *Agricultural water management*, 96, 1785-1791.

Doorenbos, J., Kassam, A. H., Bentvelsen, C. L. M., & Branscheid, V. (1979). Yieid response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper*. FAO Library AN: 206617.

García-Vilaa, M., & Fereresa, E. (2012). Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy*, 36, 21– 31.

Ghochanian, M., & Fashaee, M. (2021). Water resources management indicators focusing on governance. *Journal of Water and Sustainable Development*, 9(1), 1-10.

Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. *Addison-Wesley-Longman*, Reading, Massachusetts, USA.

Guo, D., Eivind Olesen, J., Manevski, K., & Ma, X. (2021). Optimizing irrigation schedule in a large agricultural region under different hydrologic scenarios. *Agricultural Water Management*, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106575.

Hanks, R. J. (1983). Yield and water-use relationships. in: Lange, O. L., Kappen, L. and Schulze, E. D. (Eds.) ecological studies. nalysis and synthesis. Vol. 19. *Water and Plant Life*. Springer-Verlag. Berlin.

Huang, Q., Rozelle, S., & Howitt, R. (2006). Irrigation water pricing policy in china. *American agricultural economics association annual meeting*. Long Beach, CA.

Izadfard, A., Sarmadian, F., Jahansooz, M. R., Peykani, GH. R., & Chaichi, M. R. (2017). Comparison of AquaCrop model and heat-radiation production potential model in estimating yield potential in a part of Mughan plain lands in Ardabil province. *Iran water and soil research*, 48(4), 853-864. (In Persian)

Izadfard, A., Sarmadian, F., Jahansooz, M. R., & Asadi Oskouei, E. (2021). Optimum cropping pattern based on irrigation water productivity using AquaCrop simulation model. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23(5), 1163-1178.

Kanooni, A. (2013). Development of an integrated optimal water allocation and distribution model at different levels of irrigation networks. *Ph.D. thesisin the field water structures engineering under the guidance Mohammad Javad Monem*. Tehran: Tarbiat Modares University, Department of water structures engineering. 177 p.. (In Persian)

Kanooni, A., & Monem, M. J. (2014). Integrated stepwise approach for optimal water allocation in irrigation canal. *Irrigation and Drainage*, 63, 12–21.

Kashefi Nezhad, P., & Hooshmand, A. R. (2020). Optimal allocation of water resources of Maroon irrigation network to maximize net benefit. *Iranian Water Research Journal*, 14 (1), 41-49. (In Persian)

Katerji, N., Pasquale, C., & Marcello. M. (2013). Productivity, evapotranspiration and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by Aquacrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 130, 14-26.

Kazem Attar, H., Noory, H., & Ebrahimian, H. (2020). Effect of water pricing on persuading farmers to use modern irrigation systems and increasing the economic productivity of irrigation water (Case Study: Qazvin plain irrigation network). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2(4), 616-625. (In Persian)

Kumar, V., and Yadav, S. M. (2019). Optimization of cropping patterns using elitist-Jaya and elitist- TLBO algorithms. *Water Resources Management*, 33(5), 1817-1833.

Kuo, S.F, Merkley, G.P., & Liu, C.W. (2000). Decision support for irrigation project planning using a genetic algorithm. *Agricultural Water Management*, 45, 243-266.

Li, J., Song, J., Li, M., Shang, S., Mao, X., Yang, J., & Adeloye, A. J. (2018). Optimization of irrigation scheduling for spring wheat based on simulation-optimization model under uncertainty. *Agricultural Water Management*, 208, 245–260..

Linker, R., Ioslovich, I., Sylaios, G., Plauborg, F., & Battilani, A. (2016). Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: a simulation study with cotton, potato and tomato. *Agricultural Water Management*, 163, 236–243.

Mohammadi, M., Davary, K., & Ghahraman, B. (2019). Optimizing irrigation water depth and leaching based on different water management and salinity treatments using AquaCrop model. *Journal of Water Research in Agriculture*, 33(2), 299-315. (In Persian)

Rabie Z. Honar T. & Bateni M. (2015). Determination of optimal and water allocation under limited water resources using soil water balance in Ordibehesht canal of Doroodzan water district. *Iran Agricultural*

Research, 34(2), 21-28.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2012). Reference Manual: AquaCrop Plugin Program (Version 4.0). *FAO Irrigation and Drainage Paper*, FAO, Rome.

Rath A. Prakash S. & Swain C. (2017). Optimal irrigation management at Mundoghat Command area of Hirakud canal system using genetic algorithm. *International journal of Recent Advances in Multidisciplinary Research*, 4(8), 2175- 2719.

Rath A. Samantary S. Biswal S. & Swain P. C. (2018). Application of genetic algorithm to derive an optimal cropping pattern in part of Hirakud Command. Advances in intelligence and computing. *Singapore*. 845 p..

Statistical center of Iran. Presidential program and budget organization. (2021). *Seling prices of products and cost of agricultural services in rural areas of the country*. (In Persian)

Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, vol. 66. FAO, Rome.

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. *Agronomy Journal*, 101, 426-437.

Tomohari, H., Okamoto, K., yoshihiro, M., & Nohara, D. (2015). An optimization scheme of cropping pattern under the variation of water and climate condition. *Proceeding of the 36th IAHR World Congress*, The Hague, the Netherlands.

Valizadegan. E., & Dindar Sooha, A. (2020). Model of optimal allocation of water and land to agricultural crops in deterministic and stochastic conditions. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 10(3), 31-46. (In Persian)

Wang, H. R., Dong, Y. Y., Wang, Y., & Liu, Q. (2008). Water right institution and strategies of the Yellow River valley. *Water Resource. Management*, 22, 1499–1519.

Zargan J. & Waez-Mousavi S. M. (2016). Water crisis in Iran: its intensity, causes and confronting strategies. *Indian journal of science and technology*, 9(44), 2-6.