

**Research Paper**

**Agro-Economic Survey on Quantitative and Qualitative Changes of  
Irrigation Water in Urmia Plain of Iran**

*Sh. Karrari Gharehbagh<sup>1</sup>, H. Najafi Alamdarloo<sup>2</sup>, S. Khalilian<sup>3</sup>, M. Delavar<sup>4</sup>*

Received: 14 May, 2023

Accepted: 25 June, 2023

**Introduction:** The level of aquifers has decreased as a result of the decrease in the water level of Urmia Lake in Iran. In addition, the infiltration of both salt water and excess salts, especially nitrates, caused by the use of chemical fertilizers have reduced the quality of groundwater in Urmia plain. Saline waste water, return water, agricultural activities, evaporation and infiltration of sea water are among the salinity factors of water resources. On the other hand, in modern agriculture, the yield and productivity of the product is improved by the use of chemical fertilizers. For this reason, agriculture is known as the most important source of non-point pollution of groundwater nitrates caused by human activities. The nitrate range of plain varies from 0 to 115 mg/l. Also, the level of EC varies from 0.3 to 2.9 ds/m. Both ranges are in warning points, which should be prevented from increasing excessively by adopting management measures. This study mainly aimed at investigating quantitative and qualitative changes of irrigation water in agro-economic terms.

**Materials and Methods:** The present study was conducted in Urmia plain located in Urmia city of Iran. The area of the plain is 962 km<sup>2</sup> and is located on the western side of the lake. The yields of irrigated wheat, forage corn, sunflower and tomato were simulated using the AquaCrop model in the cropping year of 2022-2023;

- 
1. PhD Student in Agricultural Economics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
  2. Corresponding Author and Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (hamed\_najafi@modares.ac.ir).
  3. Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
  4. Associate Professor, Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

DOI: 10.30490/AEAD.2023.362296.1517

then, the options of reduced irrigation, reduced fertilization and increased groundwater salinity were applied in all stages of crop growth. Also, four groups of climatic, crop, soil and management data were used for the simulation. In proportion to the fact that decreasing crop yield has economic effects, the effects were investigated by calculating water and nitrogen fertilizer physical and economic productivity indexes. Both consumption amount of each input per hectare and the purchase cost of each input were obtained through the interviews with 140 farmers using random classification sampling method. By adding all the costs, the cost of each product was calculated and the farmers' income was obtained according to the yield and price of the products. Then, changes in costs were examined by changing the amount of irrigation and fertilization. Changes in income were also calculated by applying each option, and net profit was obtained by changing the costs and revenues. By carrying out yield simulation and applying options, the impacts of yield reduction on farmers' productivity and profit were calculated and accordingly, the potential areas for growing each crop in each region were determined.

**Results and Discussion:** Decreased fertilization demonstrated the utmost effect and increased salinity of irrigation water and groundwater revealed the least effect on the yield of crops. Among the two indexes, the economic productivity index of water IRI rials/m<sup>3</sup> and fertilizer IRI rials/kg was chosen, based on which tomato (209580, 3005000) and sunflower (177630, 2115720) in region 5, forage corn (94900, 1323500) and irrigated wheat (5620, 454570) in regions 3 and 6 had the highest rate, respectively. Furthermore, the rate of fertilizer economic productivity index was higher than water productivity. After calculating these indicators, the value of the water and fertilizer economic productivity index was recalculated after applying the options and the changes were analyzed. With the reduction of irrigation, the water economic efficiency index for some crops decreased in some areas and increased in some other areas, but with the decrease in fertilization, the economic efficiency of fertilizer decreased in all areas and all crops. In both options, tomato and wheat had the highest and lowest amount, respectively.

**Conclusions:** Considering the obtained results and the quantitative and qualitative effects of water reduction in the region, it is necessary to reduce the effects of excessive use of chemical fertilizers before reaching a critical stage. In addition, reducing the excessive use of surface and underground water is vital. If the current trend continues, the cultivation pattern and the type of land use should be changed according to the conditions, or additional costs may be imposed on the farmers to eliminate the effects of excessive consumption, and all these cases require proper

management of water resources to maintain their quantity and quality. Given the high impacts of the fertilizer reduction option and the economic productivity index of fertilizer, the possibility of replacing organic fertilizers with nitrate ones should be technically and economically investigated and the high price for using more than the recommended amount of nitrate fertilizers should be determined. These policies are also effective for reducing salinity because the main source of groundwater salinity is excessive fertilization. It is also suggested that appropriate irrigation technologies are introduced to the farmers and the correct cultivation patterns are presented in each region of the whole area. Finally, strict management actions should be taken to moderate the destructive effects of excessive fertilization and to reduce the over-exploitation of surface and groundwater.

**Keywords:** *AquaCrop Model, Deficit Irrigation, Nitrate Pollution, Productivity, Salinity.*

**JEL Classification:** R14, Q53, Q25, Q15, C61



## اقتصاد کشاورزی و توسعه

سال ۳۱، شماره ۱۲۳، پاییز ۱۴۰۲

### مقاله پژوهشی

## بررسی زراعی - اقتصادی تغییرات کمی و کیفی آب آبیاری در دشت ارومیه

شبنم کراری قره‌باغ<sup>۱</sup>، حامد نجفی علمدارلو<sup>۲</sup>، صادق خلیلیان<sup>۳</sup>، مجید دلاور<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴

### چکیده

سطح آبخوان‌ها، در نتیجه کاهش سطح آب دریاچه ارومیه، کاهش یافته و از سوی دیگر، نفوذ آب شور و نفوذ املاح مازاد به‌ویژه نیترات ناشی از مصرف کودهای شیمیایی موجب کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی در دشت ارومیه شده است. در مطالعه حاضر، با هدف بررسی زراعی - اقتصادی تغییرات کمی و کیفی آب آبیاری، به شبیه‌سازی عملکرد محصولات گندم آبی، ذرت علوفه‌ای، آفتابگردان و گوجه‌فرنگی با استفاده از مدل آکواکراپ (AquaCrop) در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ پرداخته و سپس، گزینه‌های کم‌آبیاری، کاهش کوددهی و افزایش شوری آب زیرزمینی در تمامی مراحل رشد محصولات اعمال شد؛ همچنین، از چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک‌شناسی و مدیریتی برای انجام شبیه‌سازی استفاده شد. نتایج نشان داد که کاهش کوددهی بیشترین درصد تغییرات و افزایش شوری آب‌های آبیاری و زیرزمینی کمترین درصد تأثیر را روی عملکرد محصولات دارند. از آنجا که کاهش عملکرد محصولات با اثرات اقتصادی نیز همراه است، این اثرات با محاسبه شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب و کود نیتروژن بررسی شدند که از آن میان، شاخص بهره‌وری اقتصادی آب و کود انتخاب شد و بر اساس آن، مقادیر حداکثر شاخص بهره‌وری اقتصادی آب (بر حسب ریال بر مترمکعب) و شاخص بهره‌وری اقتصادی کود (بر حسب ریال بر کیلوگرم)، به ترتیب، برای گوجه‌فرنگی

۱- دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- نویسنده مسؤل و دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (hamed\_najafi@modares.ac.ir).

۳- دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۴- دانشیار گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲۰۹۵۸۰ و ۳۰۰۵۰۰۰ ریال و آفتابگردان ۱۷۷۶۳۰ و ۲۱۱۵۷۲۰ ریال در منطقه پنج و ذرت علوفه‌ای ۹۴۹۰۰ و ۱۳۲۳۵۰۰ ریال و گندم آبی ۵۶۶۲۰ و ۴۵۴۵۷۰ ریال در مناطق سه و شش بود. با توجه به تأثیر زیاد گزینه کاهش کوددهی و شاخص بهره‌وری اقتصادی کود، باید امکان جایگزینی کودهای ارگانیک با کودهای نیترا ته از نظر فنی و اقتصادی بررسی و قیمت بالا برای مصارف بیش از مقدار توصیه‌شده کودهای نیترا ته تعیین شود. این سیاست‌ها برای کاهش شوری نیز موثرند، زیرا منبع اصلی شوری آب زیرزمینی کوددهی بی‌رویه است. همچنین، پیشنهاد می‌شود که فناوری‌های مناسب آبیاری به کشاورزان شناسانده و الگوی کشت صحیح در منطقه ارائه شود. در نهایت، باید اقدامات سخت‌گیرانه مدیریتی صورت گیرد تا هم‌زمان، از اثرات مخرب کوددهی زیاد و برداشت بی‌رویه آب‌های سطحی و زیرزمینی جلوگیری شود.

**کلیدواژه‌ها:** آلودگی نیترا ته، بهره‌وری، شوری، کم‌آبیاری، مدل آکواکراپ (AquaCrop).

طبقه‌بندی JEL: R14, Q53, Q25, Q15, C61

## مقدمه

کاهش سطح آب دریاچه ارومیه موجب کاهش سطح آبخوان‌ها، کاهش کیفیت آب و لب‌شور و غیرقابل برداشت شدن آن در چاه‌های حاشیه دریاچه شده که در نتیجه آن، پایداری بهره‌برداری از منابع آب در معرض تهدید جدی قرار گرفته است؛ از این‌رو، یکی از شایع‌ترین و شاید مهم‌ترین فرآیندهای تأثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی نفوذ آب شور است (Mehdizadeh Mahalli and Vafaei, 2016). هرزآب‌های شور، آب‌های برگشتی، فعالیت‌های کشاورزی، تبخیر و نفوذ آب دریا از جمله عوامل شوری منابع آبی به‌شمار می‌روند (Mehdizadeh Mahalli and Vafaei, 2016). بیشترین خطر آلودگی منابع آبی به منابع زیان‌آور واردشده بر محیط‌های طبیعی و آب‌های زیرزمینی توسط انسان به‌طور عمد یا غیرعمد و در نتیجه سهل‌انگاری و ناآگاهی برمی‌گردد (Bameri et al., 2015) که در این صورت، منابع آب شیرین از پدیده شوری تأثیر می‌پذیرد (Li and Zhang, 2008). از دهه ۱۹۶۰، دسترسی به پمپ‌های برقی موجب افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی شده، که کاهش سطح این منابع آبی، فرونشست دشت‌ها، شور شدن آب و به تبع آن، شور شدن خاک را به دنبال داشته است (Alizadeh, 2015). یکی از پارامترهای اصلی هیدروشیمیایی، برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی از لحاظ شوری، هدایت الکتریکی (EC) است (Nasr and Zahran, 2014). از سوی دیگر، در کشاورزی نوین، بهبود عملکرد و بهره‌وری محصول با مصرف کودهای شیمیایی صورت می‌گیرد که در صورت نفوذ زیاد کودها در خاک، املاح مازاد در آب‌های زیرزمینی شسته می‌شود و کیفیت آنها را کاهش می‌دهد (Gregory et al., 2002; Horrigan et al., 2002; Aelion and Conte, 2004). از این‌رو، کشاورزی به‌عنوان مهم‌ترین منبع

آلودگی غیرنقطه‌ای نیترات آب‌های زیرزمینی ناشی از فعالیت‌های انسانی شناخته شده است (Livingston and Cory, 1998). منابع نقطه‌ای آلودگی نیترات نیز شامل مخازن فاضلاب و مرداب‌ها هستند، به‌گونه‌ای که در بسیاری از مطالعات، آلودگی‌های بالای نیترات در مناطقی با این منابع نشان داده شده است (MacQuarrie et al., 2001). بنابراین، در میان آلاینده‌ها، نیترات به دلیل کاربرد گسترده و نیز قابلیت ماندگاری بسیار در آب‌های زیرزمینی اهمیت دارد (Wellman and Rupert, 2016). همچنین، علاوه بر تأثیر در کیفیت آب، نیترات یک ماده غیرضروری برای انسان است و مشکلات بهداشتی و سلامتی ایجاد می‌کند (WHO, 2011).

یکی از شاخص‌های اقتصادی برای سنجش نسبت عملکرد یا سود خالص محصولات نسبت به نهاده‌ها بهره‌وری است و بهره‌وری آب نیز میزان محصول تولیدشده به ازای واحد حجم آب است (Abbasi et al., 2017). همچنین، بهره‌وری کود عبارت است از میزان محصول تولیدشده به ازای هر کیلوگرم کود مصرفی. مطالعه بهره‌وری آب کشاورزی، به دلیل وجود محدودیت‌های کمی و کیفی آب در کشورهای نظیر ایران، ضروری است (Zamani et al., 2014). از این‌رو، هدف اصلی از افزایش بهره‌وری در جهان افزایش تولید محصولات با مصرف آب کمتر است و مطالعه بهره‌وری کود می‌تواند به کشاورزان در زمینه استفاده صحیح از کودها و به‌ویژه کود نیتروژن کمک کند، زیرا مصرف بیش از اندازه آن موجب آلودگی منابع و محیط زیست می‌شود.

در سال‌های اخیر، افت سطح دریاچه ارومیه موجب ایجاد مشکلات کم‌آبی در دشت ارومیه شده، که به افزایش غلظت آلاینده‌ها در آب‌های سطحی و زیرزمینی انجامیده است. آلودگی نیتراته مهم‌ترین گونه آلودگی به‌شمار می‌رود که در نتیجه مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی در منطقه پدید آمده است. همچنین، شوری منابع آبی از دیگر مشکلات موجود دشت ارومیه است. بر اساس استانداردهای ارائه شده در زمینه کیفیت آب آبیاری، اگر میزان نیترات کمتر از ۲۳ میلی‌گرم در لیتر باشد، هیچ محدودیتی در مصرف آب برای محصولات وجود ندارد؛ اگر بین ۲۳-۱۳۶ میلی‌گرم در لیتر باشد، باید در انتخاب محصول دقت کرد و عملیات مدیریتی کنترل مصرف نیترات را شروع و آب دارای نیترات را با احتیاط مصرف کرد؛ و در واقع، این محدوده «محدوده هشدار در مصرف» است که در صورت آلوده شدن و رسیدن به مرز بیش از ۱۳۶ میلی‌گرم در لیتر، محدودیت در مصرف شدیدتر می‌شود و گاه چنین دشت‌هایی را برای کشت «ممنوعه» اعلام می‌کنند (Ayers and Westcot, 1994). همچنین، بر اساس این استانداردها، اگر میزان هدایت الکتریکی (EC) کمتر از ۰/۷ دسی‌زیمنس بر متر باشد، هیچ محدودیتی در مصرف آب برای محصولات وجود ندارد؛ اگر بین ۰/۷-۳ دسی‌زیمنس بر متر باشد، باید

برای جلوگیری از افزایش بیش از حد شوری، تدابیر مدیریتی برای منابع آب زیرزمینی را آغاز کرد و اگر به بیش از سه دسی‌زیمنس بر متر برسد، باید نسبت به اتخاذ محدودیت در مصرف آب برای آبیاری محصولات حساس به شوری اقدام شود (Ayers and Westcot, 1994). محدوده نیترات دشت ارومیه از حدود صفر تا ۱۱۵ میلی‌گرم در لیتر متغیر است (WAPWWC, 2021) و نیترات اکثر منابع بالاتر از ۲۳ میلی‌گرم در لیتر بوده و در محدوده هشدار در مصرف کود است. از این‌رو، در صورت ادامه روند آلوده شدن آب‌های زیرزمینی، علاوه بر کیفیت محصولات، سلامتی انسان‌ها نیز به خطر خواهد افتاد. میزان EC دشت ارومیه نیز از ۰/۳ تا ۲/۹ دسی‌زیمنس بر متر متغیر است و در محدوده هشدار قرار دارد که باید با اتخاذ تدابیر مدیریتی، از افزایش بیش از حد آن جلوگیری کرد (RWCWAP, 2021).

با توجه به آمار ارائه‌شده، غلظت نیترات و شوری منابع آبی در دشت ارومیه در حال افزایش است و در صورت تداوم این روند، مشکلات فراوان برای بخش کشاورزی به‌وجود خواهد آمد. بنابراین، هدف مطالعه حاضر بررسی زراعی-اقتصادی تغییرات کمی و کیفی آب آبیاری بوده و بدین منظور، اثرات تنش‌های آبی، کودی و شوری روی عملکرد و همچنین، بهره‌وری آبی و کودی چهار محصول گندم آبی، ذرت علوفه‌ای، آفتابگردان و گوجه‌فرنگی بررسی شده است. مطالعه تغییرات عملکرد و بهره‌وری بر اساس شرایط منطقه به کشاورزان در تصمیم‌گیری صحیح برای کشت محصول یاری خواهد رساند.

مطالعات بسیاری در جهان در مورد آلودگی نیترات و شوری با مدل‌ها و جنبه‌های مختلف انجام گرفته، که از آن جمله است: تحلیل‌های آماری، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، رهیافت‌های مبتنی بر GIS، مدل‌های MODFLOW و MT3، پارامترهای اندازه‌گیری و . . . هرچند، این مطالعات اهمیت بررسی آلودگی نیترات و شوری منابع آب را تأیید می‌کنند، اما در هیچ‌کدام از روش‌های یادشده، به مطالعه اثرات آلودگی نیترات و شوری به‌صورت زراعی-اقتصادی پرداخته نشده است. مدلی که قابلیت بررسی تغییرات عملکرد تحت تنش‌های پیش‌گفته را دارد، مدل آکواکراپ<sup>۱</sup> است، که توانایی آن در مورد بسیاری از محصولات در سراسر جهان توسط محققان ارزیابی شده است. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2022) به بررسی آبیاری بهینه گندم زمستانه با مدل آکواکراپ برای حدود نود، ۱۲۰ و ۱۵۰ میلی‌متر، به‌ترتیب، در سال‌های تر، نرمال و خشک پرداختند که در نتیجه، عملکرد و بهره‌وری آب بالاتری حاصل شد. در مطالعه آدبویه و همکاران (Adeboye et al., 2021) در نیجریه، توانایی مدل آکواکراپ در تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی کود نیتروژن و بهره‌وری آب در تولید سویا تأیید شد. منصور



و همکاران (Mansour et al., 2020) نیز در مصر، مدل آکواکراپ را برای بررسی بهره‌وری آب در نظام‌های مختلف آبیاری گندم به کار بردند و استفاده از مدل را برای ارقام دیگر گندم در مناطق نیمه‌خشک پیشنهاد کردند. در نیجریه، عملکرد دانه ذرت در شرایط تیمارهای مختلف نیتروژن با دقت بالا توسط آکوماگا (Akumaga, 2017) شبیه‌سازی شد، ولی به دلیل نادیده گرفتن سایر تنش‌های محیطی، نتایج کمی بیش از مقادیر واقعی برآورد شدند. اسکندری‌پور و همکاران (Eskandaripour et al., 2020) توانایی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی اثر پوشش مالچ مصنوعی بر کارایی مصرف آب گوجه‌فرنگی در منطقه کهریز ارومیه را مناسب ارزیابی کردند. خالقی (Khaleghi, 2019) عملکرد گیاه آفتابگردان و بهره‌وری آب و شوری خاک را در شرایط تنش‌های شوری و آبی با مدل آکواکراپ در ساری شبیه‌سازی کرد و قابلیت استفاده از مدل را در بررسی چنین پارامترهایی پیشنهاد داد.

با توجه به نتایج مطالعات پیشین، مدل آکواکراپ از کارایی بهتری در شبیه‌سازی عملکرد محصولات در شرایط تنش‌های مختلف آبی، کودی و شوری برخوردار است و به کمک این مدل، می‌توان تصمیمات اقتصادی و مدیریتی بهتری برای افزایش عملکرد محصولات و کاهش زیان کشاورزان اتخاذ کرد. تاکنون مطالعاتی جامع اقتصادی با مدل آکواکراپ در منطقه انجام نگرفته است. در مطالعه حاضر، علاوه بر شبیه‌سازی زراعی عملکرد محصولات، بعد اقتصادی تغییرات عملکردها نیز بررسی شده است.

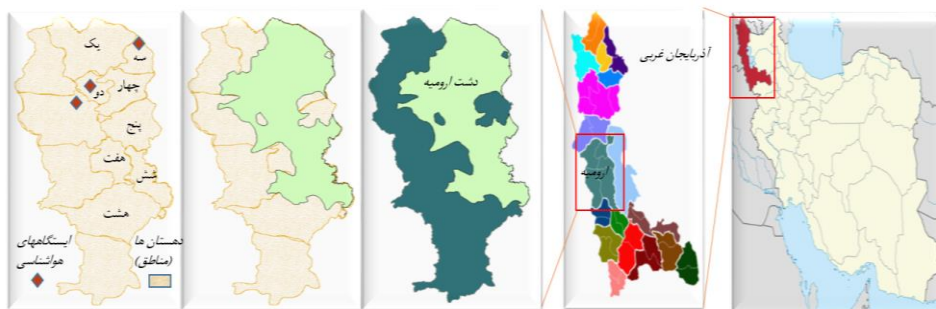
همچنین، مطالعات زیادی در زمینه بهره‌وری اقتصادی آب و کود نیتروژن با توجه به تغییرات عملکرد محصول در نتیجه اعمال گزینه‌ها انجام شده است. جمالی و همکاران (Jamali et al., 2022) بهره‌وری اقتصادی آب و کود نیتروژن در مشهد را برای کینوا در آبیاری جویچه‌ای محاسبه کردند و با اعمال دویست کیلوگرم کود، بیشترین مقدار این شاخص اقتصادی آب را به دست آوردند. موسوی‌فضل و اخیانی (Mousavifazl and Akhyani, 2020) به محاسبه بهره‌وری آب مصرفی سیب‌زمینی در سمنان با استفاده از درصدهای مختلف مصرف آب و کود نیتروژن پرداختند و در نتیجه، سطح کود هشتاد درصد و سطح آب ۷۵ درصد به‌عنوان تیمار برتر انتخاب شدند. همچنین، کریمی و جلینی (Karimi and Jolaini, 2017) شاخص‌های فیزیکی و اقتصادی آب شهر مشهد را محاسبه کردند و به ترتیب، محصولات پیاز، گوجه‌فرنگی و چغندر قند بر اساس شاخص فیزیکی و محصولات سیب‌زمینی، پیاز و گوجه‌فرنگی بر اساس شاخص اقتصادی انتخاب شدند. زمانی و همکاران (Zamani et al., 2014)، با برآورد بهره‌وری محصولات، بدین نتیجه رسیدند که سیر و یونجه، به ترتیب، بیشترین و کمترین بهره‌وری را در همدان

دارند. در هند، سینگ و همکاران (Singh et al., 2006) بهره‌وری فیزیکی آب محصولات برنج، پنبه و گندم را به ترتیب، برابر با ۰/۸۴، ۰/۲۱ و ۱/۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین کردند. با محاسبه بهره‌وری آب و کود بر اساس یافته‌های پژوهش‌های پیشین، می‌توان الگویی مناسب از کشت را در منطقه ارائه داد. بنابراین، از طریق محاسبه عملکرد محصول با استفاده از مدل آکواکراپ و برآورد بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب و کود نیز می‌توان به یک تحلیل یکپارچه دست یافت. توجه به نتایج چنین مطالعاتی در انتخاب الگوی کشت مناسب توسط کشاورزان منطقه با وجود شرایط کمی و کیفی آب ضروری به نظر می‌رسد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر در دشت ارومیه واقع در شهرستان ارومیه انجام گرفته است. مساحت این دشت ۹۶۲ کیلومتر مربع بوده و در ضلع غربی دریاچه ارومیه واقع شده است. بر اساس آمار مدیریت جهاد کشاورزی شهرستان ارومیه در سال ۱۴۰۰، مجموع سطح زیر کشت محصولات زراعی شهرستان ارومیه در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰، برابر با ۹۱۰۴۶ هکتار بوده، که ۴۴۳۷۲ هکتار آن به کشت آبی و ۴۶۶۷۴ هکتار به کشت دیم اختصاص یافته است. محصولات گندم آبی، جو، نخود، کدو، ذرت علوفه‌ای، آفتابگردان و گوجه‌فرنگی در سطح وسیع در دشت ارومیه کشت می‌شوند و سطح زیر کشت این محصولات بالای هزار هکتاری است. در مطالعه حاضر، از میان محصولات یادشده، گندم آبی، ذرت علوفه‌ای، آفتابگردان و گوجه‌فرنگی انتخاب شدند و میزان تغییرپذیری عملکرد این محصولات نسبت به اعمال گزینه‌های مدیریتی در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ بررسی شد. برای بررسی دقیق‌تر، پلیگون‌بندی منطقه مورد نظر با نرم‌افزار ArcGIS 1.6.1 به دهستان‌ها صورت گرفت. شکل ۱ موقعیت دشت ارومیه و دهستان‌ها را نشان می‌دهد. از میان دهستان‌ها، تنها هشت دهستان که بیشتر در محدوده دشت قرار گرفته بودند، انتخاب شدند. بدین ترتیب، مناطق منتخب مطالعه حاضر عبارت‌اند از نازلوچای شمالی (۱)، نازلوچای جنوبی (۲)، طلاتپه (۳)، باش‌قلعه (۴)، بکشلوچای (۵)، ترکمان (۶)، باراندوزچای شمالی (۷) و باراندوزچای جنوبی (۸).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت ارومیه و دهستان‌ها

### شبیه‌سازی زراعی

از آنجا که انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای برای مطالعه واکنش عملکرد گیاهان زراعی نسبت به تغییرات آبیاری هزینه‌بر و زمان‌بر است، در چند دهه اخیر، مدل‌هایی برای شبیه‌سازی رشد گیاه و حرکت و انتقال آب و املاح در خاک معرفی شده که در مطالعه حاضر، از مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان استفاده شده است. این مدل از پوشش کانوپی<sup>۱</sup> به‌جای شاخص سطح برگ استفاده می‌کند و برای دامنه‌ای گسترده از محصولات مانند محصولات علوفه‌ای، سبزی‌ها، غلات، میوه‌ها و محصولات روغنی و غده‌ای قابل کاربرد است (Raes et al., 2012). اساس محاسبه عملکرد در مدل آکواکراپ رابطه زیر است (Doorenbos and Kassam, 1979):

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (1)$$

که در آن، به‌ترتیب،  $Y_x$  و  $Y_a$  برابر با عملکرد حداکثر و واقعی محصول (تن بر هکتار)،  $ET_x$  و  $ET_a$  برابر با تبخیر و تعرق حداکثر و واقعی گیاه (میلی‌متر بر روز) و  $K_y$  ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به میزان کاهش تبخیر و تعرق (ضریب واکنش عملکرد گیاه به آب) است. میزان پوشش کانوپی از زمان جوانه‌زنی تا رسیدن به حداکثر پوشش و میزان تعرق گیاه بر اساس پوشش کانوپی طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند (Raes et al., 2012):

$$CC = CC_0 \times e^{CGct} \quad (2)$$

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (3)$$

1. Canopy cover

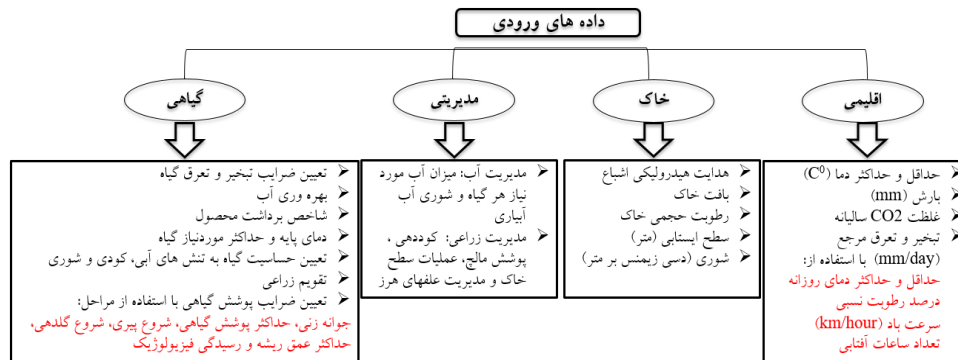
که در این روابط،  $CC$  پوشش کانوپی در مرحله توسعه گیاه (درصد)،  $CC_0$  پوشش تاج اولیه (درصد)،  $CGC$  ضریب رشد پوشش کانوپی (عکس روز)،  $t$  زمان (روز)،  $Tr$  میزان کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی (میلی متر در روز)،  $K_s$  و  $K_c$ ، به ترتیب، ضرایب تنش آبی و گیاهی و  $ET_0$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلی متر در روز) است. همچنین، بیوماس خشک ( $B$ ) و عملکرد نهایی محصول ( $Y$ ) بر اساس روابط زیر تعیین می‌شوند (Steduto et al., 2009):

$$B = WP^* \left( \frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right) \quad (4)$$

$$Y = B \times HI \quad (5)$$

که در این روابط،  $B$  بیوماس خشک (تن بر هکتار)،  $WP^*$  بهره‌وری آب نرمال شده (تن بر هکتار) و  $HI$  شاخص برداشت (درصد) است.

داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده: شبیه‌سازی عملکرد محصولات، از چهار گروه داده‌ها شامل داده‌های اقلیمی، گیاهی، مدیریتی و خاک استفاده شد. شکل ۲ داده‌های مربوط به هر گروه را نشان می‌دهد. هر گروه، با جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز بر اساس اطلاعات واقعی منطقه و با کمک کارشناسان، ضرایب مورد نظر برآورد و وارد مدل شد.



شکل ۲- داده‌های مورد استفاده در مدل آکواکراپ

استان آذربایجان غربی یکی از مناطق کوهستانی کشور و دارای اقلیم سرد و خشک است. بر اساس آمار ایستگاه سینوپتیک ارومیه، حداکثر درجه حرارت منطقه حدود ۳۹/۹ و حداقل آن حدود

۲۲/۸- درجه سانتی‌گراد بوده و متوسط درجه حرارت در ارومیه نیز ۱۱/۲ درجه سانتی‌گراد است (RWCWAP, 2021). برای تعیین میانگین بارندگی دشت ارومیه، از اطلاعات سیزده ایستگاه باران‌سنجی واقع در محدوده مطالعاتی استفاده شد. مشخصات ایستگاه‌ها به‌همراه اطلاعات میزان بارندگی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ در جدول ۱ آمده است. همان‌گونه که از آمار مشخص است، بیشترین میانگین بارندگی متعلق به ایستگاه میرآباد واقع در دهستان روضه‌چای و غرب دشت ارومیه و کمترین میانگین بارندگی متعلق به ایستگاه موش‌آباد واقع در دهستان طلاتپه و شمال دشت ارومیه است.

جدول ۱- اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی

نام ایستگاه	آب‌جالی سفلی	موش‌آباد	کریم‌آباد	نپسک	کلهر	میرآباد	گلمانخانه آب شور	گلمانخانه آب شیرین	بابارود	دیج قشقی	بند	اغیلاغ	قاسملو
حداقل بارندگی	۱۳۳	۱۰۴	۲۵۳	۱۵۷	۱۷۲	۴۱۲	۱۲۰	۱۳۷/۳	۱۵۵	۱۹۱	۲۱۲	۲۳۳	۱۷۷
حداکثر بارندگی	۴۴۴	۳۳۰	۵۷۴	۴۳۹	۴۵۱	۵۸۱	۳۰۸	۳۲۸	۴۵۶	۶۷۴	۵۰۷	۶۹۲	۴۴۸
میانگین بارندگی	۲۹۱	۲۳۰	۳۸۸	۳۱۲	۳۳۸	۴۹۹	۲۳۲	۲۵۶	۳۰۹	۳۴۲	۳۸۹	۴۴۵	۳۲۹

مأخذ: شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی (RWCWAP, 2021)

اطلاعات زراعی محصولات منطقه در جدول ۲ آمده است. برای تعیین تاریخ کشت مناسب هر محصول با استفاده از تاریخ‌های مرسوم در منطقه، عملکرد محصولات شبیه‌سازی شد و تاریخی که در آن حداکثر عملکرد حاصل می‌شود، به‌عنوان تاریخ کاشت انتخاب شد. محاسبه مقدار آب مورد نیاز هر محصول نیز بر اساس مقدار آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری، توانایی ذخیره آب توسط خاک، عمق توسعه ریشه و ضریب آب سهل‌الوصول برای سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ صورت گرفت.

## جدول ۲- اطلاعات زراعی محصولات

میزان آب مورد نیاز (مترمکعب در هکتار)	تاریخ برداشت	تاریخ کاشت	سطح زیر کشت	محصول
۲۸۰۹	اواخر خرداد تا اواخر تیر	۳۰ مهر	۳۸۵۰	گندم آبی
۵۵۷۸	اواخر شهریور تا اواخر آبان	۲۰ خرداد	۳۴۷۰	ذرت علوفه‌ای
۵۳۵۹	اواسط شهریور تا اواخر مهر	۲۰ اردیبهشت	۲۸۷۷	آفتابگردان
۶۰۹۳	شروع برداشت از اوایل تیرماه	۳۰ اردیبهشت	۳۲۳۶	گوجه‌فرنگی

مأخذ: یافته‌های پژوهش بر اساس مطالعه طایفه رضایی (Taifeh Rezaei, 2014)

جدول ۳ اطلاعات خاک و آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. در این جدول، نوع بافت خاک در لایه صفر تا سی سانتی‌متری و ویژگی‌های شیمیایی مانند نقطه پژمردگی دائم ( $PWP$ ) بر حسب درصد، ظرفیت زراعی ( $FC$ ) بر حسب درصد، میزان اشباع ( $SAT$ ) بر حسب درصد و هدایت هیدرولیکی اشباع ( $Ksat$ ) بر حسب (میلی‌متر در روز) برای هر نوع بافت خاک به‌طور جداگانه آمده است.

## جدول ۳- اطلاعات خاک و آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

نام دهستان	نوع بافت خاک و ویژگی‌های شیمیایی	تراز آب زیرزمینی (متر)	EC آب زیرزمینی (ds/m)
بکشلوچای	لوم رسی شنی (sandy clay loam) PWP:۲۰ FC:۳۲ SAT:۴۷ Ksat:۲۲۵	۴	۲/۶
باراندوزچای جنوبی	لوم رسی سیلتی (silty clay loam) PWP:۲۳ FC:۳۹ SAT:۵۰ Ksat:۱۵۰	۷	۲
باراندوزچای شمالی	رس سیلتی (silty clay) PWP:۳۲ FC:۳۸ SAT:۵۰ Ksat:۱۰۰	۴	۲/۴
باش قلعه	لوم رسی (clay loam) PWP:۲۳ FC:۳۹ SAT:۵۰ Ksat:۱۲۵	۲	۴/۳
نازلوچای شمالی		۱۱	۳/۵
نازلوچای جنوبی		۸	۲
طلاتپه	لومی (loam) PWP:۱۶ FC:۳۲ SAT:۴۷ Ksat:۵۰۰	۳	۳/۸
ترکمان		۴	۳/۳

مأخذ: شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی (RWCWAP, 2021)

در مدل آکواکراپ و در گروه داده‌های گیاهی، قسمتی از داده‌ها ثابت و قسمتی دیگر غیرثابت (ویژه کاربر) است. پارامترهای ثابت با گذشت زمان یا تغییر موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کنند و به‌عنوان پیش‌فرض در مدل وجود دارند (Steduto et al., 2009). این پارامترها با استفاده از داده‌های رشد

گیاه در شرایط مطلوب واسنجی شده‌اند و برای کاربرد آنها در شرایط وجود تنش آبی از طریق تأثیر ضریب پاسخ به تنش تعدیل می‌شوند. برخی دیگر از پارامترها مانند تاریخ کاشت، زمان رسیدن مراحل فنولوژیک گیاه، تراکم کاشت، مدیریت آبیاری و ... از جمله پارامترهایی هستند که برای هر منطقه یا شرایط مدیریتی و گونه محصول می‌تواند متغیر باشد و باید توسط کاربر تعیین شوند. این گروه از داده‌ها برای واسنجی وارد مدل شدند.

پس از جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های مورد نیاز، شبیه‌سازی عملکرد محصولات با نسخه شش نرم‌افزار آکواکراپ انجام گرفته است. با کاربرد این مدل، میزان تغییرپذیری عملکرد محصولات زراعی برای سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در شرایط تنش‌های کم‌آبی، کودهای شیمیایی و شوری بررسی شد. برای دستیابی به نتایج مفید و واقعی، نیاز است تا مدل بر اساس داده‌های منطقه‌ای واسنجی شود؛ از این‌رو، واسنجی مدل برای شرایط منطقه‌ای و بر اساس توان عملکرد چهار گیاه زراعی بر حسب وزن خشک (DYP) در دشت ارومیه و هشت دهستان انجام شد و گزینه‌ها برای مقادیر کمی آب و میزان کود دهی و شوری آب اعمال شدند.

### اعتبارسنجی مدل آکواکراپ

به منظور ارزیابی دقت مدل در پیش‌بینی عملکرد محصولات، از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ )، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده ( $NRMSE$ ) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) استفاده شد. این آماره‌ها، به ترتیب، در روابط (۶)، (۷) و (۸) نشان داده شده‌اند (Raes et al., 2012):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۶)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}_i} \quad (۷)$$

$$R^2 = \frac{(\sum (P_i - \bar{P}) - (O_i - \bar{O}))^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (۸)$$

که در روابط بالا،  $P_i$  مقدار شبیه‌سازی شده،  $O_i$  مقدار واقعی،  $\bar{P}$  میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر واقعی و  $n$  تعداد داده‌هاست. مقدار آماره  $RMSE$  همواره مثبت است و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، بهتر است. اگر مقدار  $NRMSE$  کمتر از ده درصد باشد، نشان‌دهنده دقت بالای مدل است. همچنین، مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳، به ترتیب، نشان‌دهنده

دقت خوب، متوسط و ضعیف است (Soler et al., 2007). مقدار  $R^2$  نیز از صفر تا یک تغییر می‌کند و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌هاست. مقادیر واقعی عملکرد محصولات در پژوهش حاضر برگرفته از آمارنامه‌های جهاد کشاورزی و همچنین، عملکردهای به‌دست‌آمده توسط کشاورزان منطقه است.

### بهره‌وری

در مطالعه حاضر، از شاخص‌های بهره‌وری آب کشاورزی برای گندم آبی، ذرت علوفه‌ای، آفتابگردان و گوجه‌فرنگی در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ استفاده شد. شاخص‌های عملکرد در واحد حجم آب ( $CPW$ ) و سود خالص در واحد حجم آب ( $NBPW$ ) استفاده شد. شاخص‌های  $CPW$  (فیزیکی) و  $NBPW$  (اقتصادی) بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شوند (Zamani et al., 2014):

$$CPW = \frac{TP}{TWC} \quad (9)$$

$$NBPW = \frac{NP}{TWC} \quad (10)$$

که در این روابط،  $TP$ ،  $NP$  و  $TWC$ ، به ترتیب، نشان‌دهنده میزان محصول تولیدشده یا عملکرد محصول بر حسب کیلوگرم در هکتار، میزان سود خالص بر حسب ریال در هکتار و حجم آب مصرفی بر حسب مترمکعب در هکتار است. هرچه میزان این شاخص‌ها بیشتر باشد، آب به‌درستی مصرف می‌شود. بر اساس این روابط، شاخص‌های بهره‌وری کود  $CPF$  (فیزیکی) و  $NBPF$  (اقتصادی) با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$CPF = \frac{TP}{TFC} \quad (11)$$

$$NBPF = \frac{NP}{TFC} \quad (12)$$

که در این روابط نیز  $TP$ ،  $NP$  و  $TFC$ ، به ترتیب، نشان‌دهنده میزان محصول تولیدشده یا عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار)، میزان سود خالص (ریال در هکتار) و مقدار کود مصرفی (کیلوگرم در هکتار) است.



## سود کشاورزان

در مطالعه حاضر، میزان مصرف هر نهاده در هکتار و هزینه خرید هر نهاده با پرسش از ۱۴۰ کشاورز و با بهره‌گیری از روش نمونه‌گیری طبقه‌بندی تصادفی به‌دست آمد. با جمع تمام هزینه‌ها، هزینه هر محصول محاسبه شد و درآمد کشاورزان با توجه به عملکرد و قیمت محصولات به‌دست آمد. سپس، بررسی تغییرات هزینه‌ها با تغییر میزان آبیاری و کوددهی صورت گرفت. با وجود اینکه شوری آب منطقه در محدوده اقدامات مدیریتی قرار داشت، اما هیچ اقدام عملی در راستای کاهش آن صورت نگرفته بود، بنابراین، هیچ هزینه‌ای به‌خاطر شوری وارد هزینه‌ها نشد. تغییرات درآمد نیز با اعمال هر گزینه محاسبه شد و سود خالص با تغییر هزینه‌ها و درآمدها به‌دست آمد. با انجام شبیه‌سازی عملکرد و اعمال گزینه‌ها، میزان تأثیر کاهش عملکرد در بهره‌وری و سود کشاورزان محاسبه شد و بر این اساس، مناطق مستعد برای کشت هر محصول در هر منطقه تعیین شد.

## نتایج و بحث

جدول ۴ خصوصیات فنولوژیک محاسبه‌شده در مراحل رشد گیاه و پارامترهای مهم گیاهی استفاده‌شده در مرحله واسنجی را نشان می‌دهد.

جدول ۴- پارامترهای مهم گیاهی مورد استفاده در مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی

پارامتر	واحد	گندم	ذرت	آفتابگردان	گوجه‌فرنگی	توضیحات
فاصله کاشت تا جوانه‌زنی	روز	۷	۶	۱۵	۶	واسنجی
فاصله کاشت تا حداکثر پوشش کانوبی	روز	۱۶۵	۵۷	۶۳	۸۰	واسنجی
فاصله کاشت تا شروع گلدهی (تشکیل غده یا ریشه)	روز	۲۰۵	۶۵	۸۱	۳۲	واسنجی
فاصله کاشت تا رسیدن به حداکثر عمق ریشه	روز	۲۱۰	۱۱۸	۱۰۲	۷۵	واسنجی
فاصله کاشت تا شروع پیری	روز	۲۴۰	۱۲۰	۱۰۷	۱۲۵	واسنجی
فاصله کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک تراکم کاشت	روز	۲۶۰	۱۴۵	۱۲۵	۱۵۰	واسنجی
تراکم کاشت	هزار بوته در هکتار	۴۲۵۰	۶۵	۵۸	۳۶	واسنجی
ضریب پوشش کانوبی اولیه (CC0)	%	۶/۳۸	۰/۴۲	۰/۲۹	۰/۷	واسنجی
ضریب کاهش پوشش گیاهی در پیری (CDC)	% . day <sup>-1</sup>	۱۰/۴	۱۱/۷	۱۳/۶	۸/۳	واسنجی
ضریب تعرق گیاه (K <sub>c</sub> )	-	۱/۱	۱/۰۵	۱/۱	۱/۱	پیش فرض
ضریب آستانه بالای تنش آبی برای توسعه کانوبی گیاه	-	۰/۲	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۵	پیش فرض
ضریب آستانه پایین تنش آبی برای توسعه کانوبی گیاه	-	۰/۶۵	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۵۵	پیش فرض
ضریب آستانه بالای تنش آبی بسته شدن روزنه‌ها	-	۰/۶۵	۰/۶۹	۰/۶	۰/۵	پیش فرض
ضریب آستانه بالای تنش آبی برای پیری	-	۰/۷	۰/۶۹	۰/۷	۰/۷	پیش فرض
شاخص برداشت مرجع (HI <sub>0</sub> )	%	۴۸	۴۸	۱۷	۷۰	واسنجی
بهره‌وری آب نرمال شده (WP*)	گرم بر مترمربع	۱۶	۳۴	۲۵	۲۰	واسنجی
دمای پایه	سلسیوس	۰	۸	۴	۷	پیش فرض
دمای بالا	سلسیوس	۲۶	۳۰	۳۰	۲۸	پیش فرض

مأخذ: یافته‌های پژوهش

### ارزیابی مدل آکواکراپ

نتایج معیارهای ارزیابی مدل در شبیه‌سازی عملکرد چهار محصول در هشت منطقه طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۵ آمده است. به دلیل تعداد زیاد آماره‌ها، مقادیر حداقل و حداکثر از

بین هشت دهستان برای آماره  $RMSE$  (بر حسب تن در هکتار) و میانگین مقادیر برای آماره‌های  $NRMSE$  و  $R^2$  (بر حسب درصد) وارد مدل شدند. بر اساس این آماره‌ها، مقادیر  $RMSE$  طی هر دو مرحله مثبت بوده و تقریباً نزدیک به صفر است. مقادیر  $NRMSE$  در بازه  $0/1-0/2$  قرار داشته و نشان‌دهنده ارزیابی خوب مدل است. همچنین، مقادیر آماره  $R^2$  نیز نزدیک به یک بوده و نشان‌دهنده همبستگی بالای مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده است. بنابراین، مدل از دقت کافی برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات برخوردار است و از این‌رو، می‌توان از آن برای بررسی گزینه‌های مدیریتی استفاده کرد. گاندوز و همکاران (Guendouz et al., 2014) مقدار آماره  $RMSE$  برای شبیه‌سازی عملکرد گندم دوروم در الجزایر را  $1/86$  تن بر هکتار برآورد کردند. در تحقیق هنگ و همکاران (Heng et al., 2009) برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت، مقدار  $RMSE$  بین  $0/65$  تا  $1/57$  تن در هکتار به‌دست آمد. اسکندری‌پور و همکاران (Eskandaripour et al., 2020) مقادیر آماره‌های  $R^2$  و  $NRMSE$  را در شبیه‌سازی عملکرد گوجه‌فرنگی در منطقه کهریز ارومیه، به‌ترتیب،  $99$  و  $52$  درصد محاسبه کردند. خالقی (Khaleghi, 2019) مقدار  $NRMSE$  در شبیه‌سازی دانه آفتابگردان در ساری را در سال اول کمتر از ده درصد و در سال دوم بین ده تا سی درصد به‌دست آورد. در این مطالعات نیز مدل آکواکراپ از دقت کافی برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات برخوردار بود.

جدول ۵- معیارهای ارزیابی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد محصولات

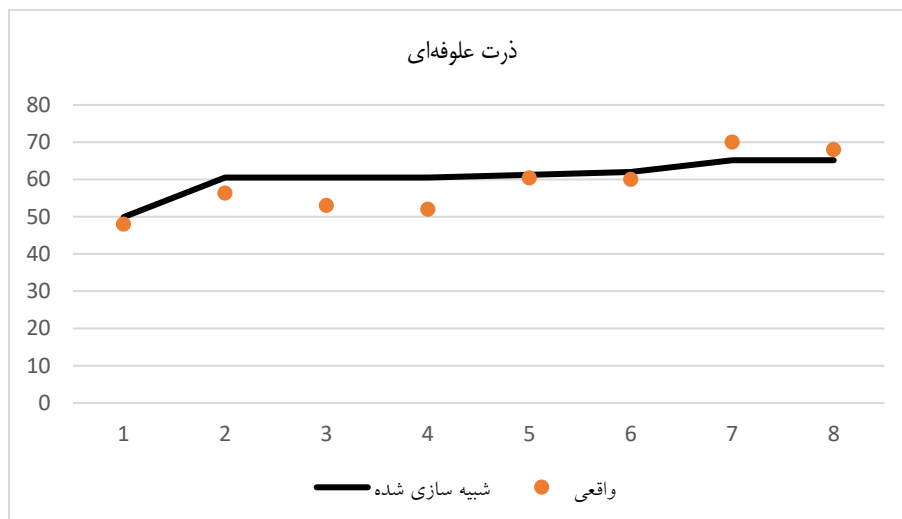
نام محصول	واسنجی	اعتبارسنجی
گندم آبی	$RMSE: 0/5-1/46$ $NRMSE: 12/3\%$ $R^2: 91\%$	$RMSE: 0/4-1/38$ $NRMSE: 10/5\%$ $R^2: 94\%$
ذرت علوفه‌ای	$RMSE: 0/87-1/6$ $NRMSE: 18\%$ $R^2: 86\%$	$RMSE: 0/92-1/54$ $NRMSE: 19/3\%$ $R^2: 88\%$
آفتابگردان	$RMSE: 0/3-0/89$ $NRMSE: 7/5\%$ $R^2: 93\%$	$RMSE: 0/42-0/8$ $NRMSE: 0/98\%$ $R^2: 92\%$
گوجه‌فرنگی	$RMSE: 0/92-1/9$ $NRMSE: 16\%$ $R^2: 89\%$	$RMSE: 0/89-1/7$ $NRMSE: 14/2\%$ $R^2: 85\%$

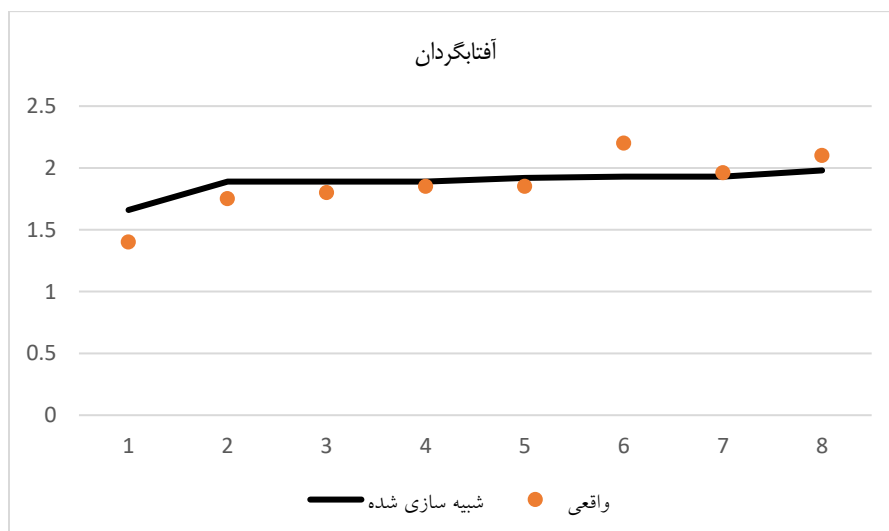
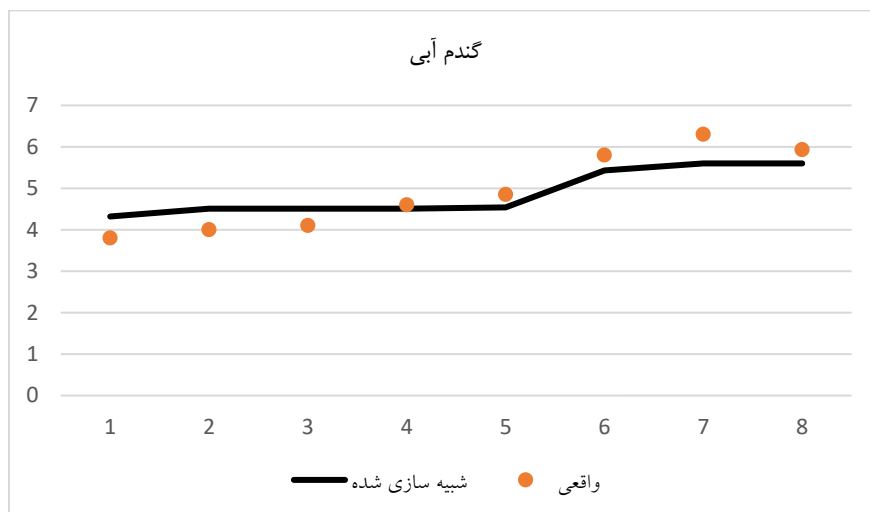
مأخذ: یافته‌های پژوهش

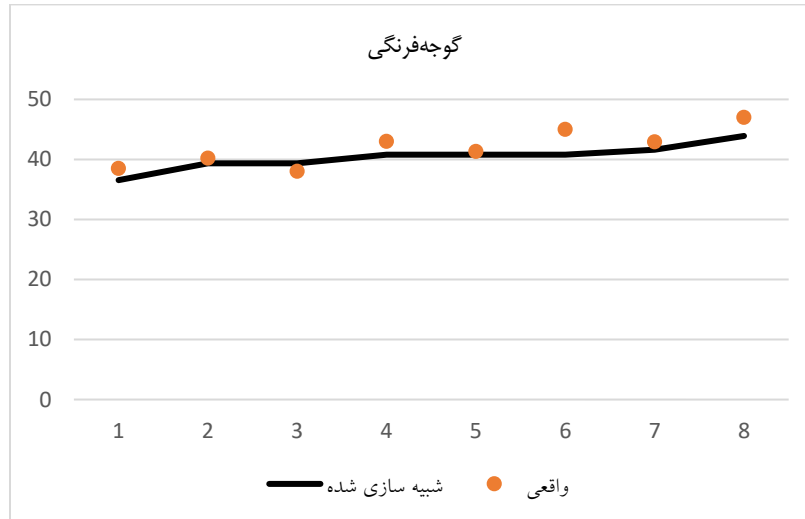
### نتایج شبیه‌سازی عملکرد محصولات و بهره‌وری آنها

واسنجی مدل آکواکراپ با استفاده از داده‌های ورودی و پارامترهای گیاهی که در قسمت مواد و روش‌ها آورده شدند، صورت گرفت و عملکرد به‌دست‌آمده برای محصولات نشان داد که عملکرد شبیه‌سازی شده با کمترین میزان خطا بر اساس آماره‌ها نسبت به عملکرد واقعی محصولات در منطقه است. از این‌رو، مدل می‌تواند برای بررسی چگونگی واکنش عملکرد نسبت به تنش‌های کمی و کیفی آب در منطقه به کار رود.

پس از انتخاب تاریخ کشت مناسب، ابتدا عملکرد چهار محصول زراعی بدون ایجاد هیچ محدودیتی شبیه‌سازی شد و سپس، با اعمال گزینه‌های مربوط به کم‌آبیاری، کاهش کوددهی و افزایش شوری (کاهش کیفیت)، تغییرات عملکرد محصولات بررسی شد. مقایسه عملکرد شبیه‌سازی شده و عملکرد واقعی محصولات در مرحله واسنجی بدون اعمال گزینه‌ها در شکل ۳ آمده است؛ محور افقی دهستان‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، مدل به‌خوبی توانسته عملکردها را شبیه‌سازی کند و با مقادیر واقعی کمترین اختلاف وجود دارد.







شکل ۳- مقایسه عملکرد شبیه‌سازی شده و عملکرد واقعی محصولات

از سوی دیگر، بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب برای محصولات کشاورزی محاسبه شد و با اعمال هر گزینه، تغییرات بهره‌وری به‌دست آمد. عملکرد و بهره‌وری شبیه‌سازی شده بدون اعمال گزینه‌ها در جدول ۶ آمده است. نتایج مناطق ۱، ۲، ۴ و همچنین، مناطق ۳ و ۶، به‌دلیل شباهت نوع بافت خاک و سایر خصوصیات گیاهی، مشابه بود. بیشترین عملکرد گندم آبی و ذرت علوفه‌ای در مناطق ۳ و ۶ به‌دست آمد که دارای بافت خاک لومی بودند. بیشترین عملکرد آفتابگردان و گوجه‌فرنگی در منطقه ۵ به‌دست آمد که دارای بافت خاک لومی شنی بود. همچنین، کمترین عملکرد در بین کل محصولات مربوط به منطقه ۷ بود که بافت رس سiltی داشت. این نتایج بسیار نزدیک به عملکرد محصولات کل منطقه بود. بنابراین، مدل آکواکراپ یک مدل قابل اعتماد برای بررسی تغییرات عملکرد با اعمال گزینه‌هاست. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2022)، آدبویه و همکاران (Adeboye et al., 2021)، استریچویچ و همکاران (Stricevic et al., 2014)، امداد و همکاران (Emdad et al., 2018) و سعیدی و همکاران (Saeidi et al., 2021) و بسیاری دیگر نیز به نتایجی قابل قبول با این مدل دست یافتند.

در تحلیل اقتصادی، همان‌گونه که داده‌های جدول ۶ نشان می‌دهد، بیشترین شاخص بهره‌وری فیزیکی آب و کود در بین محصولات زراعی مربوط به ذرت و کمترین آن مربوط به آفتابگردان بود، اما شاخص بهره‌وری اقتصادی آب و کود برای آفتابگردان بیش از ذرت بود. همچنین، شاخص بهره‌وری اقتصادی آب و کود برای گوجه‌فرنگی حداکثر و برای گندم حداقل به‌دست آمد. با مقایسه شاخص‌های یاد شده می‌شد نتیجه گرفت که شاخص بهره‌وری اقتصادی برای تحلیل اقتصادی مناسب‌تر از شاخص فیزیکی

باشد. اگرچه شاخص فیزیکی به سمت محصولات با عملکرد بالا گرایش داشت، اما شاخص اقتصادی نتیجه دقیق تری از لحاظ سود خالص ارائه کرد. در این زمینه، زمانی و همکاران (Zamani et al., 2014) نیز به نتایج مشابه دست یافتند. بنابراین، بر اساس بهره‌وری اقتصادی، باید گوجه‌فرنگی، آفتابگردان، ذرت علوفه‌ای و گندم آبی، به ترتیب، در اولویت کشت قرار گیرند. بیشترین مقادیر این شاخص برای گندم آبی و ذرت علوفه‌ای در مناطق ۳ و ۶ و برای آفتابگردان و گوجه‌فرنگی در منطقه ۵ بود. بر اساس نتایج مطالعه کریمی و جلینی (Karimi and Jolaini, 2017) در دشت مشهد نیز با توجه به محاسبه شاخص‌های بهره‌وری برای ده محصول، اولویت کشت محصولات در این دشت، به ترتیب، عبارت‌اند از: سیب‌زمینی، پیاز، گوجه‌فرنگی، خیار، خربزه، هندوانه، چغندر قند، یونجه، گندم و جو که همانند مطالعه حاضر، اولویت کشت محصولات، به ترتیب، با گوجه‌فرنگی و گندم آبی است.

جدول ۶- نتایج عملکردهای شبیه‌سازی شده و شاخص‌های بهره‌وری

دهستان	محصول	عملکرد (ton/ha)	CPW (kg/m <sup>3</sup> )	CPF	NBPW (ریال/m <sup>3</sup> )	NBPF (ریال/kg)
۱، ۲ و ۴	گندم آبی	۴/۵۱	۱/۶	۱۲/۸	۳۷۲۳۰	۲۹۸۸۵۰
	ذرت علوفه‌ای	۶۰/۵	۱۰/۸۴	۱۵۱/۲	۸۵۷۲۰	۱۱۹۵۶۲۰
	آفتابگردان	۱/۸۹	۰/۳۵	۴/۲	۱۶۸۴۰۰	۲۰۰۵۷۲۰
	گوجه‌فرنگی	۴۰/۸	۶/۶۹	۹۶	۱۹۱۷۲۰	۲۷۴۸۸۰
۳ و ۶	گندم آبی	۵/۶	۱/۹۹	۱۶	۵۶۶۲۰	۴۵۴۵۷۰
	ذرت علوفه‌ای	۶۵/۱۵	۱۱/۶۷	۱۶۲/۸	۹۴۹۰۰	۱۳۳۳۵۰۰
	آفتابگردان	۱/۹۳	۰/۳۶	۴/۲	۱۷۲۵۰۰	۲۰۰۵۴۶۱۰
	گوجه‌فرنگی	۳۹/۳۶	۶/۴۵	۹۲/۶	۱۸۳۴۵۰	۲۶۳۰۲۹۰
۵	گندم آبی	۵/۴۳	۱/۹۳	۱۵/۵	۵۳۶۰۰	۴۳۰۲۸۰
	ذرت علوفه‌ای	۶۲	۱۱/۱۱	۱۵۵	۸۸۶۹۰	۱۲۳۶۸۷۰
	آفتابگردان	۱/۹۸	۰/۳۷	۴/۴	۱۷۷۶۳۰	۲۱۱۵۷۲۰
	گوجه‌فرنگی	۴۳/۹۱	۷/۲	۱۰۳/۳	۲۰۹۵۸۰	۳۰۰۵۰۰۰
۷	گندم آبی	۴/۳۲	۱/۵۳	۱۲/۳	۳۳۸۴۰	۲۷۱۷۱۰
	ذرت علوفه‌ای	۴۹/۹	۸/۹۴	۱۲۴/۷	۶۴۸۳۰	۹۰۴۱۲۰
	آفتابگردان	۱/۶۶	۰/۳	۳/۶	۱۴۴۸۰۰	۱۷۳۴۶۱۰
	گوجه‌فرنگی	۳۶/۵۵	۵/۹۹	۸۶	۱۶۷۳۱۰	۲۳۹۸۸۸۰
۸	گندم آبی	۴/۵۴	۱/۶۱	۱۲/۹	۳۷۷۶۰	۳۰۳۱۴۰
	ذرت علوفه‌ای	۶۱/۲۵	۱۰/۹۸	۱۵۳/۱	۸۷۲۱۰	۱۲۱۶۲۵۰
	آفتابگردان	۱/۹۲	۰/۳۵	۴/۲	۱۷۱۴۸۰	۲۰۴۲۳۹۰
	گوجه‌فرنگی	۴۱/۶۳	۶/۸۳	۹۷/۹	۱۹۶۴۸۰	۲۸۱۷۳۳۰

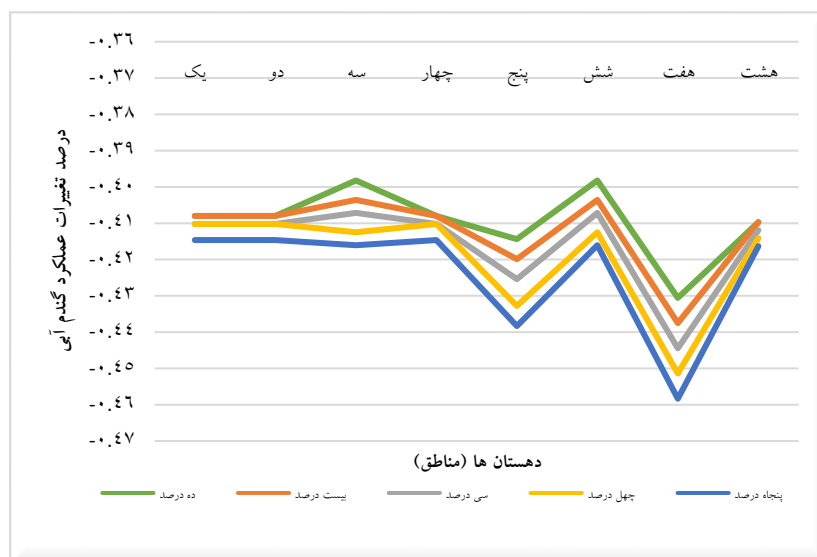
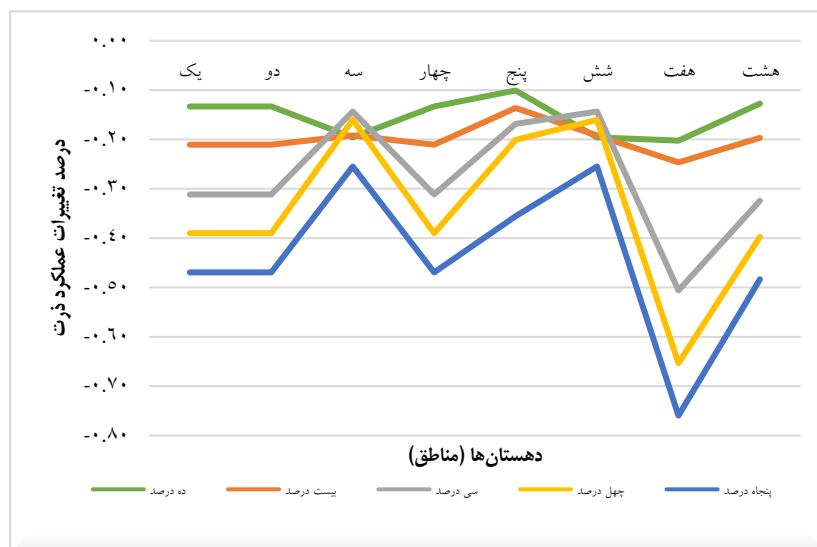
مأخذ: یافته‌های پژوهش

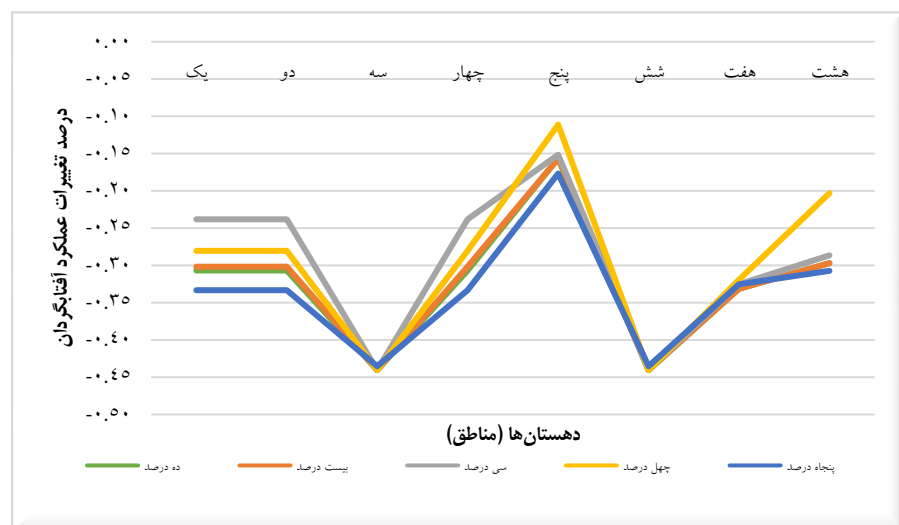
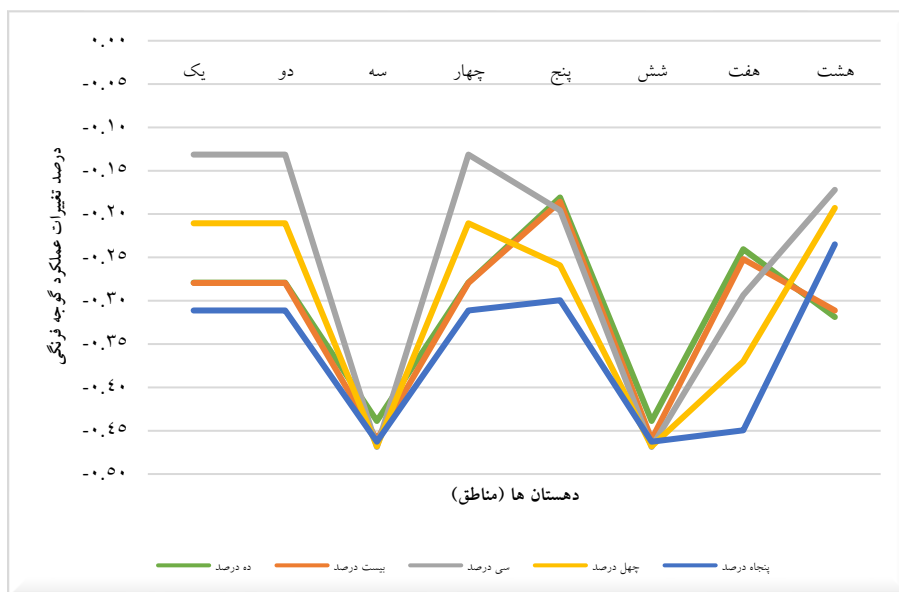
### گزینه‌ها

برای اعمال گزینه‌ها، بر اساس یافته‌های علیزاده و عباسی (Alizadeh and Abbasi, 2017)، مهرآذر و همکاران (Mehrazar et al., 2016)، هنگ و همکاران (Heng et al., 2009) و شائو و همکاران (Hsiao et al., 2009)، تنش‌های ملایم به‌منظور بررسی دقیق‌تر واکنش عملکرد محصولات به‌کار گرفته شده است.

در گزینه کم‌آبیاری، با کاهش میزان آب مورد نیاز محصولات در همه مراحل رشد، از ده تا پنجاه درصد، تغییرپذیری عملکرد بررسی شد. شکل ۴ درصد تغییرات در عملکرد چهار محصول را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، با اعمال گزینه کم‌آبیاری، بیشترین درصد تغییرات در عملکرد گندم آبی در مناطق ۵ و ۷ مشاهده شد. بیشترین کاهش عملکرد در این مناطق با کاهش ده تا پنجاه درصدی آبیاری روی داد. در مقابل، با اعمال این گزینه، کمترین درصد تغییرات و کاهش عملکرد در مناطق ۳ و ۶ مشاهده شد. بافت خاک این مناطق لومی بوده و برای کشت گندم آبی در صورت کمبود آب بسیار مناسب است. بیشترین درصد تغییرات عملکرد ذرت علوفه‌ای در منطقه ۷ و کمترین درصد در مناطق ۱، ۲، ۳، ۵، ۶ و ۸ اتفاق افتاد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که بافت خاک رس سیلتی برای کشت ذرت علوفه‌ای با کمبود آب مناسب نیست. بیشترین درصد تغییرات عملکرد آفتابگردان در مناطق ۳ و ۶ و کمترین درصد مربوط به منطقه ۵ بود. همچنین، کشت گوجه‌فرنگی در مناطق ۳ و ۶ به دلیل کاهش قابل توجه در میزان عملکرد با کاهش آبیاری، توصیه نمی‌شود. اگرچه بافت خاک لومی و رس سیلتی برای کشت این محصول مناسب نبود، اما پس از کاهش میزان آبیاری، بافت خاک لوم رسی، لوم رسی شنی، لوم رسی سیلتی و رس سیلتی بهترین خاک‌ها ارزیابی شدند. به دیگر سخن، مناطق ۱، ۲، ۴، ۵ و ۸ مستعد کشت گوجه‌فرنگی هستند.







شکل ۴- درصد تغییرات عملکرد محصولات با اعمال گزینه کم‌آبیاری

بر اساس شاخص بهره‌وری آب و با اعمال گزینه کم‌آبیاری، مقدار شاخص نیز با تغییر عملکرد تغییر کرد که نتایج آن در جدول ۷ آمده است. همان‌گونه که مشخص است، بهره‌وری اقتصادی همه محصولات در همه مناطق در مقایسه با عدم اعمال گزینه در جدول ۶ به شدت کاهش یافته است. با این حال، دوباره بیشترین میزان بهره‌وری اقتصادی مربوط به گوجه‌فرنگی و کمترین آن مربوط به گندم بود. شاخص بهره‌وری گندم در تمامی مناطق با کاهش آبیاری تا پنجاه درصد افزایش یافت؛ حداکثر بهره‌وری در مناطق ۳ و ۶ و حداقل آن در منطقه ۷ بود. روند افزایشی شاخص از طریق کاهش آبیاری می‌تواند به دلیل کاهش کمتر عملکرد در مقابل کاهش مقدار آب مصرفی باشد. بنابراین، گندم محصولی مناسب برای قرار گرفتن در الگوی کشت با وجود محدودیت آبیاری است. همان‌گونه که از شکل ۴ پیداست، علی‌رغم تغییرپذیری بالای عملکرد گندم با اعمال گزینه در منطقه ۵، شاخص بهره‌وری در این منطقه بالا بود. بیشترین مقدار شاخص برای ذرت علوفه‌ای در منطقه ۵ و کمترین آن در منطقه ۷ مشاهده شد. همچنین، در مناطق ۳ و ۶، مانند گندم، افزایشی در شاخص با کاهش آبیاری مشاهده شد؛ این یافته نشان می‌دهد که کشت ذرت علوفه‌ای در این مناطق در شرایط محدودیت و صرفه‌جویی در مصرف آب می‌تواند مقرون به‌صرفه باشد. بیشترین مقدار شاخص برای آفتابگردان و گوجه‌فرنگی در منطقه ۵ و کمترین آن در مناطق ۳ و ۶ بود. مقدار این شاخص برای آفتابگردان در تمامی مناطق با کاهش آبیاری تا چهل درصد و برای گوجه‌فرنگی تا سی درصد روند افزایشی را نشان داد. بنابراین، آفتابگردان و گوجه‌فرنگی همانند گندم در همه مناطق در شرایط محدودیت آب قابل کشت است، اما باید در نظر داشت که سودآوری در مناطق ۳ و ۶ کمتر است. در پژوهش موسوی‌فضل و اخیانی (Mousavifazl and Akhyani, 2020)، بهره‌وری آب مصرفی سیب‌زمینی در سمنان در سطح کوددهی هشتاد درصد و سطح آب آبیاری ۷۵ درصد به‌عنوان تیمار برتر انتخاب شد.

## جدول ۷- نتایج بهره‌وری اقتصادی آب با اعمال گزینه کم‌آبیاری (ریال به‌ازای هر مترمکعب)

دهستان	محصول	گزینه‌های کم‌آبیاری				
		۱۰٪	۲۰٪	۳۰٪	۴۰٪	۵۰٪
۴ و ۲، ۱	گندم آبی	۵۵۰۰	۶۵۲۰	۷۳۷۰	۸۳۹۰	۹۰۵۰
	ذرت علوفه‌ای	۷۱۲۳۰	۶۳۳۲۰	۵۲۶۶۰	۴۴۶۶۰	۳۶۵۷۰
	آفتابگردان	۱۰۹۵۲۰	۱۱۱۲۰۰	۱۲۴۱۶۰	۱۱۶۵۹۰	۱۰۶۹۷۰
	گوجه‌فرنگی	۱۲۷۷۹۰	۱۲۹۲۳۰	۱۶۵۴۲۰	۱۴۸۳۶۰	۱۲۶۲۵۰
۶ و ۳	گندم آبی	۱۷۹۶۰	۱۸۴۵۰	۱۹۱۱۰	۱۹۶۰۰	۲۰۲۷۰
	ذرت علوفه‌ای	۵۵۷۰۰	۶۴۴۹۰	۸۵۳۳۰	۹۹۶۱۰	۱۰۵۲۵۰
	آفتابگردان	۸۵۹۲۰	۸۶۵۷۰	۸۷۲۱۰	۸۷۸۶۰	۸۹۵۲۰
	گوجه‌فرنگی	۸۵۷۵۰	۸۲۴۲۰	۸۱۹۶۰	۸۳۶۳۰	۸۶۳۴۰
۵	گندم آبی	۱۴۵۸۰	۱۵۰۷۰	۱۵۵۵۰	۱۵۸۶۰	۱۶۳۵۰
	ذرت علوفه‌ای	۷۷۷۳۰	۷۴۷۶۰	۷۲۱۹۰	۶۹۶۱۰	۵۲۰۵۰
	آفتابگردان	۱۴۶۴۷۰	۱۴۷۱۱۰	۱۴۸۷۸۰	۱۵۷۶۴۰	۱۴۴۹۴۰
	گوجه‌فرنگی	۱۶۵۴۷۰	۱۶۵۷۰۰	۱۶۴۷۳۰	۱۵۰۲۰۰	۱۴۱۵۳۰
۷	گندم آبی	۱۷۶۰	۲۲۵۰	۲۷۴۰	۳۲۳۰	-۳۷۹۰
	ذرت علوفه‌ای	۴۶۲۸۰	۴۳۳۱۰	۱۹۱۴۰	۶۰۱۰	۳۰۶۰
	آفتابگردان	۸۹۰۰۰	۸۹۶۵۰	۹۲۳۲۰	۹۲۹۹۰	۹۲۶۱۰
	گوجه‌فرنگی	۱۱۸۳۲۰	۱۱۷۴۰۰	۱۱۰۱۷۰	۹۵۵۸۰	۸۰۴۲۰
۸	گندم آبی	۵۶۸۰	۶۷۰۰	۷۵۴۰	۸۳۹۰	۹۲۳۰
	ذرت علوفه‌ای	۷۳۲۰۰	۶۶۱۸۰	۵۲۱۷۰	۴۴۶۶۰	۳۵۶۸۰
	آفتابگردان	۱۱۳۶۳۰	۱۱۴۲۷۰	۱۱۶۹۷۰	۱۳۴۰۴۰	۱۱۴۱۶۰
	گوجه‌فرنگی	۱۲۱۷۶۰	۱۲۵۰۴۰	۱۵۹۸۵۰	۱۵۶۳۵۰	۱۴۷۷۹۰

مأخذ: یافته‌های پژوهش

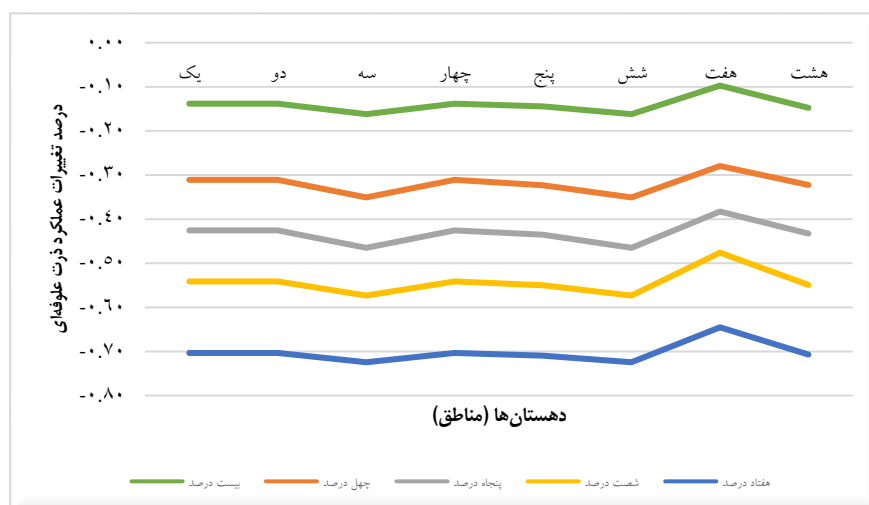
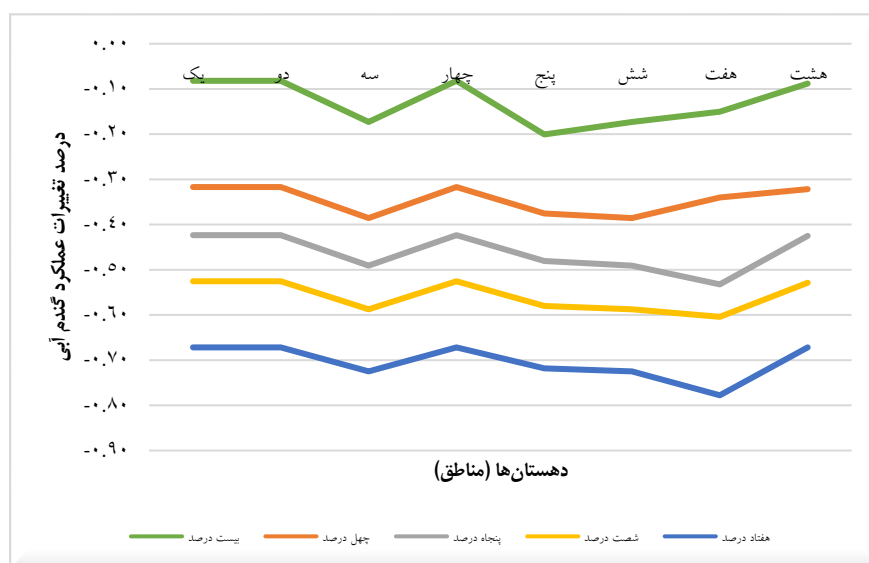
همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، نیترا ت یکی از مهم‌ترین عوامل آلودگی‌های آبی است. این آلودگی در نتیجه مصرف بیش از حد کودهای نیترا ت پدید می‌آید. به‌دلیل گرانی سایر کودها، کشاورزان منطقه برای افزایش عملکرد محصولات خود از کود اوره به‌وفور استفاده می‌کنند، تا جایی که علی‌رغم توصیه کارشناسان زراعی، مصرف سه تا ده برابر در کود اوره دارند (Khavazi et al., 2015). بنابراین، مهم‌ترین منبع آلودگی نیترا ت آب‌های منطقه منشأ کشاورزی دارد و برای بررسی این مسئله، گزینه کاهش کوددهی اعمال شده است. همچنین، سعیدی و همکاران (Saeidi et al., 2021) و امداد و همکاران (Emdad et al., 2018) از آکواکراپ برای اعمال گزینه‌های کوددهی استفاده کردند و به نتایج مناسب دست یافتند. برای اعمال این گزینه، از قابلیت خود نرم‌افزار استفاده شد، به‌گونه‌ای که

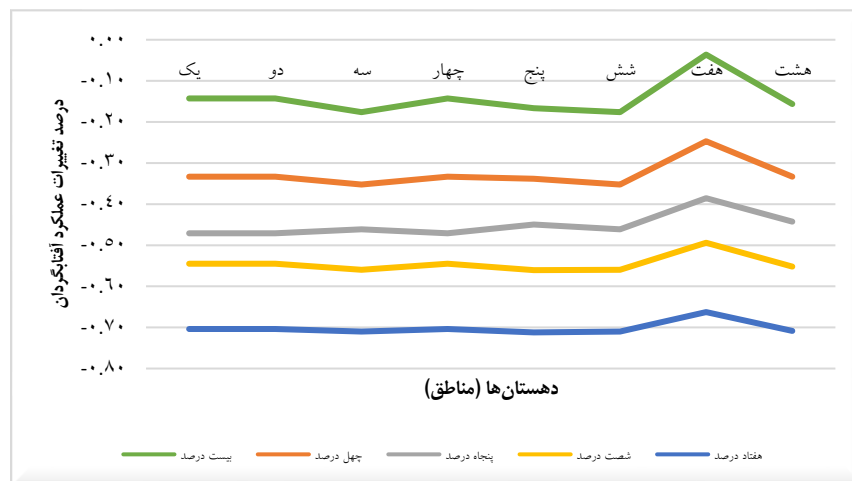
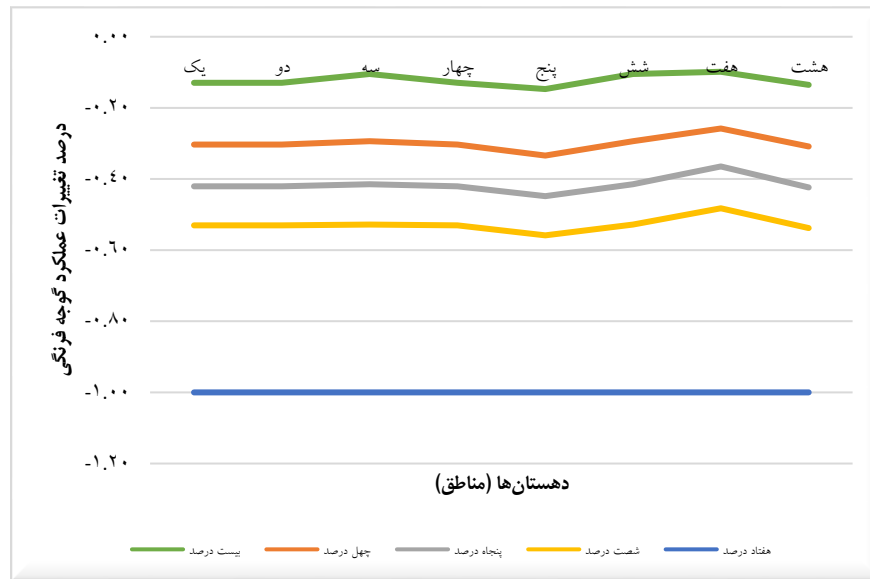
کاهش بیست درصدی (نزدیک بهینه)، چهل درصدی (متوسط)، پنجاه درصدی (تقریباً نصف)، شصت درصدی (فقیر) و هفتاد درصدی (خیلی فقیر) اعمال و نتایج درصد تغییرات عملکرد بررسی شد. این نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، کاهش کوددهی به گونه‌ای چشمگیر با کاهش عملکرد همراه بود. از این رو، با کاهش بیست درصدی، افت عملکرد اندک و با کاهش هفتاد درصدی، افت عملکرد زیاد بود. در این گزینه، تفاوتی محسوس بین درصد تغییرات عملکرد مناطق مشاهده نشده است.

**جدول ۸- نتایج بهروری اقتصادی کود با اعمال گزینه کاهش کوددهی (کیلوگرم/ریال)**

دهستان	محصول	گزینه‌های کاهش کوددهی				
		۷۰٪	۶۰٪	۵۰٪	۴۰٪	۲۰٪
۴ و ۲، ۱	گندم آبی	-۱۲۴۹۰۰	-۳۱۹۱۰	۳۲۵۰۰	۹۹۷۱۰	۲۴۸۶۰۰
	ذرت علوفه‌ای	۳۴۶۰۰	۳۰۲۸۰۰	۴۹۴۰۰۰	۶۸۳۸۲۰	۹۶۸۶۰۰
	آفتابگردان	۳۸۹۲۸۰	۷۵۴۶۴۰	۹۲۴۴۵۰	۱۲۴۰۹۰۰	۱۶۷۸۳۲۰
	گوجه‌فرنگی	-۶۰۲۰۱۰	۹۷۴۵۶۰	۱۳۴۳۰۲۰	۱۷۳۶۲۰	۲۳۱۶۶۵۰
	گندم آبی	-۱۱۶۳۳۰	-۷۶۲۰	۶۸۲۱۰	۱۵۱۲۰۰	۳۱۸۶۰۰
۶ و ۳	ذرت علوفه‌ای	۳۴۶۰۰	۳۰۴۱۷۰	۴۹۶۷۵۰	۷۰۰۳۲۰	۱۰۳۵۹۷۰
	آفتابگردان	۳۸۹۲۷۰	۷۴۲۴۱۰	۹۷۳۳۴۰	۱۲۲۸۷۰	۱۶۴۱۶۶۰
	گوجه‌فرنگی	-۶۰۲۰۱۰	۹۲۶۸۰۰	۱۲۹۱۹۷۰	۱۶۸۳۴۰	۲۲۹۲۷۷۰
	گندم آبی	-۱۱۷۷۵۰	-۱۱۹۱۰	۶۳۹۲۰	۱۴۴۰۵۰	۱۷۷۱۷۰
	ذرت علوفه‌ای	۳۵۹۷۰	۳۰۶۹۲۰	۵۰۰۸۷۰	۶۹۰۷۰۰	۹۹۳۳۵۰
۵	آفتابگردان	۴۰۱۴۹۰	۷۶۶۸۶۰	۱۰۳۴۴۵۰	۱۳۰۲۰۰	۱۷۱۴۹۹۰
	گوجه‌فرنگی	-۶۰۲۰۱۰	۹۹۳۵۰۰	۱۳۹۰۷۹۰	۱۸۰۲۰۰	۲۴۷۶۰۰
	گندم آبی	-۱۹۹۱۸۰	-۹۳۳۴۰	-۵۰۳۵۰	۶۶۹۱۰	۱۸۱۴۵۰
	ذرت علوفه‌ای	۲۷۷۲۰	۲۵۸۸۰۰	۳۸۵۳۷۰	۵۲۵۷۰۰	۷۷۳۳۵۰
	آفتابگردان	۳۸۹۲۷۰	۷۳۰۱۹۰	۹۴۸۸۹۰	۱۲۲۸۷۰	۱۶۵۳۸۸۰
۷	گوجه‌فرنگی	-۶۰۲۰۱۰	۹۵۴۸۰۰	۱۳۰۷۶۱۰	۱۶۲۷۴۰	۲۱۰۵۰۱۰
	گندم آبی	-۱۲۳۴۷۰	-۳۱۱۹۰	۳۳۹۲۰	۹۹۱۷۰	۲۴۸۶۰۰
	ذرت علوفه‌ای	۳۴۶۰۰	۲۸۸۶۷۰	۴۹۴۰۰۰	۶۷۸۳۲۰	۹۶۹۹۷۰
	آفتابگردان	۳۸۹۲۷۰	۷۵۴۶۴۰	۱۰۱۰۰۰۰	۱۲۶۵۳۰	۱۶۷۸۳۲۰
	گوجه‌فرنگی	-۶۰۲۰۱۰	۹۸۱۱۵۰	۱۳۷۱۸۵۰	۱۷۶۵۰۰	۲۳۵۵۳۶۰
۸	گوجه‌فرنگی	-۶۰۲۰۱۰	۹۸۱۱۵۰	۱۳۷۱۸۵۰	۱۷۶۵۰۰	۲۳۵۵۳۶۰

مأخذ: یافته‌های پژوهش





شکل ۵- درصد تغییرات عملکرد محصولات با اعمال گزینه کاهش کوددهی

برای شاخص بهره‌وری اقتصادی، همان‌گونه که داده‌های جدول ۸ نشان می‌دهد، تمامی مقادیر در همه مناطق روند کاهشی داشته و با کاهش میزان کود، تغییر زیادی در عملکرد و هزینه‌ها و بر این

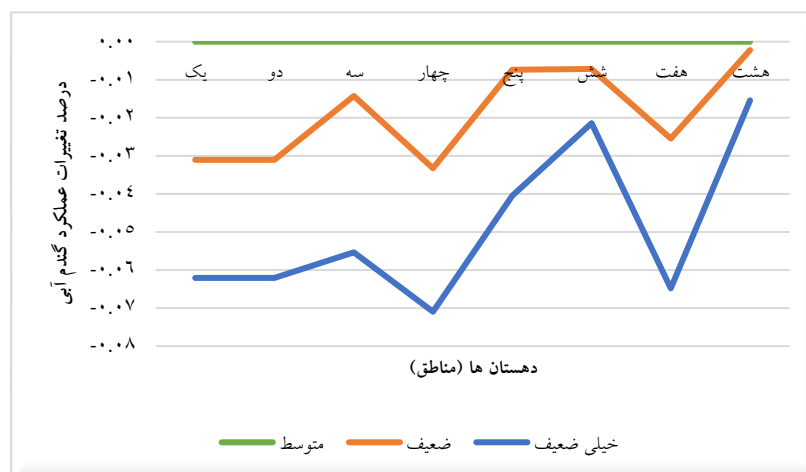
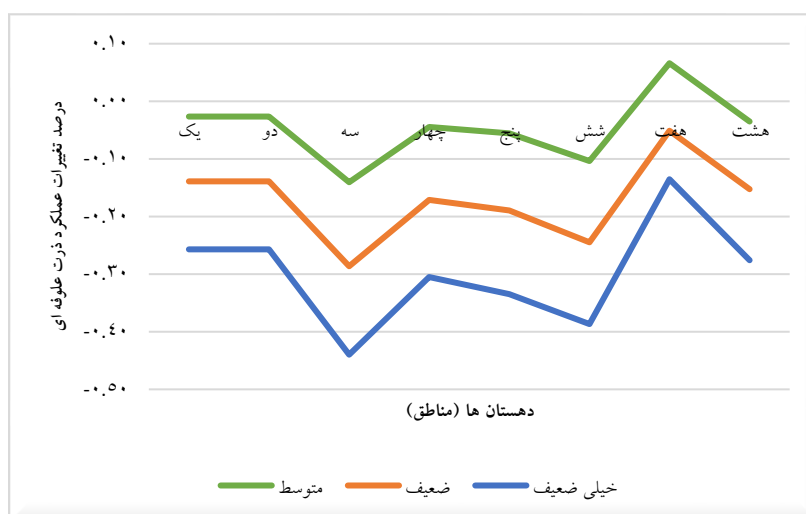
اساس، در سود خالص ایجاد شده است. می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال این گزینه، میزان کاهش عملکرد بیش از کاهش هزینه است و این موضوع می‌تواند باعث کاهش بیشتر سود و در نهایت، کاهش مقدار شاخص شود. با اعمال این گزینه، همانند گزینه کاهش آبیاری، بیشترین مقدار شاخص مربوط به گوجه‌فرنگی و کمترین آن مربوط به گندم بود. بیشترین مقدار شاخص بهره‌وری برای گندم و ذرت در مناطق ۳ و ۶ و کمترین آن در منطقه ۷ بود. بیشترین مقدار شاخص برای آفتابگردان و گوجه‌فرنگی در منطقه ۵ و کمترین آن برای آفتابگردان در منطقه ۳ و ۶ و گوجه‌فرنگی در منطقه ۷ مشاهده شد. نتایج مطالعه جمالی و همکاران (Jamali et al., 2022) در مشهد نشان داد که افزایش میزان کود نیتروژن بیشتر از مقدار توصیه‌شده موجب کاهش بهره‌وری اقتصادی آب و بهره‌وری اقتصادی کود در کشت کینوا شده است.

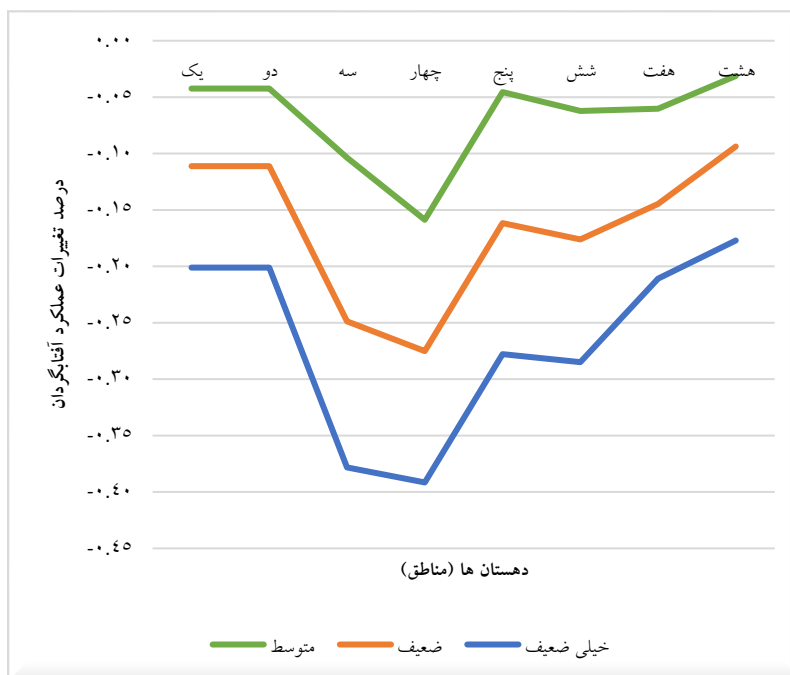
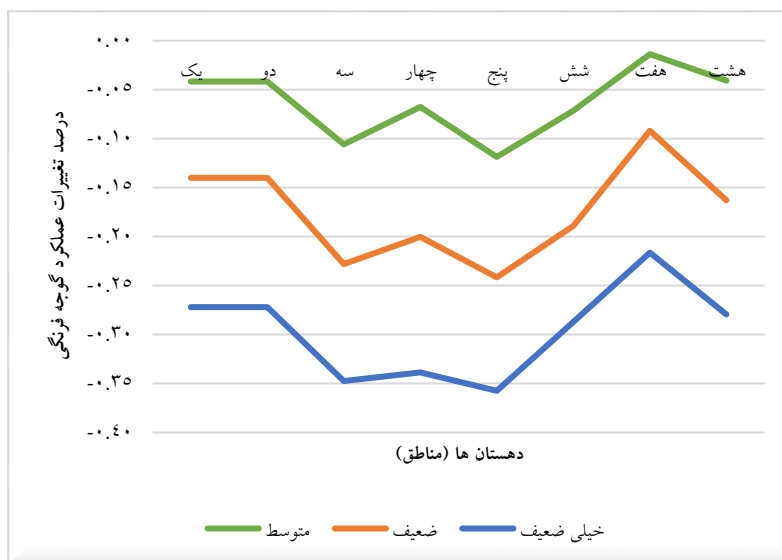
در گزینه افزایش شوری، هم شوری آب آبیاری و هم شوری آب زیرزمینی مد نظر است. تنش شوری در همه مراحل رشد بررسی شد. برای اعمال این گزینه نیز از قابلیت خود مدل استفاده شده است، به‌گونه‌ای که ابتدا عملکرد محصولات با شوری کمتر از ۰/۷ شبیه‌سازی شد که همان عملکرد بدون محدودیت بوده و نتایج آن در جدول ۶ آمده است؛ سپس، با تنظیم شوری بر اساس دستورالعمل شوری آب در محدوده کیفیت متوسط (یک تا دو دسی‌زیمنس بر متر)، ضعیف<sup>۲</sup> (۲/۱ تا سه دسی‌زیمنس بر متر) و خیلی ضعیف<sup>۳</sup> (۳/۱ تا چهار دسی‌زیمنس بر متر) تغییرات عملکرد محاسبه شدند و نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، میزان تغییر عملکرد در این گزینه کمتر از دو گزینه کم‌آبیاری و کاهش کوددهی بوده و بیشترین میزان تغییر ناشی از EC بالاتر از سه دسی‌زیمنس بر متر ارزیابی شد. گندم آبی نسبت به شوری آب آبیاری در محدوده کمتر از ۰/۷ دسی‌سی بر متر حساسیت کمتری داشت. با این حال، با افزایش شوری، عملکرد بیشتر تغییر کرد. بیشترین میزان تغییر در عملکرد گندم آبی در منطقه ۴ رخ داد که بافت خاک آن لوم رسی بود و شوری آب زیرزمینی در این منطقه بیشترین میزان را داشت. مناطق ۵، ۶ و ۸، به‌دلیل تغییرات کمتر، به‌عنوان مناطق مستعد کشت گندم در شرایط شوری شناخته شدند. عملکرد ذرت تغییرات بیشتری را در مناطق ۳ و ۶ نشان داد که مناطقی با بافت خاک لومی هستند. علاوه بر این، تغییرات کمتری در بافت رس سیلتی منطقه ۷ مشاهده شد. این منطقه مستعد کشت ذرت در شرایط شوری است. همچنین، مناطق ۳، ۴، ۶ و ۷ برای کشت آفتابگردان و همه مناطق به‌جز منطقه ۷ برای کشت گوجه‌فرنگی مناسب

1. Moderate
2. Poor
3. Very Poor



نبودند. کومار و همکاران (Kumar et al., 2014) حساسیت این چهار محصول به شوری را بررسی کردند و بدین نتیجه رسیدند که ذرت، آفتابگردان و گوجه‌فرنگی نسبت به گندم به شوری حساس‌ترند. از آنجا که در مطالعه حاضر، تنش‌های کمتری با توجه به شرایط دشت ارومیه به کار رفته، درجه تغییرپذیری تفاوتی معنی‌دار را نشان نداد. انتظار می‌رود که با افزایش شوری، کاهش مقاومت گیاه قابل مشاهده باشد و کاهش قابل توجه در عملکرد را شاهد باشیم.





شکل ۶- درصد تغییرات در عملکرد محصولات با اعمال گزینه افزایش شوری

## نتیجه گیری و پیشنهادها

در پژوهش حاضر، تغییرات عملکرد و بهره‌وری چهار محصول در هشت منطقه به‌طور جداگانه بررسی شد. بهترین تاریخ برای کشت گندم آبی، ذرت علوفه‌ای، آفتابگردان و گوجه‌فرنگی، به‌ترتیب، ۳۰ مهر، ۲۰ خرداد، ۲۰ اردیبهشت و ۳۰ اردیبهشت انتخاب شد که در این تاریخ‌ها، حداکثر عملکرد حاصل می‌شد. گزینه‌های کم‌آبیاری، کاهش کوددهی و افزایش شوری در سطوح مختلف با تنش‌های ملایم اعمال شدند. نتایج نشان داد که با افزایش هر تنش، عملکرد محصولات زراعی کاهش یافته و میزان کاهش با توجه به نوع بافت خاک هر منطقه متفاوت است. بیشترین کاهش عملکرد با اعمال گزینه کاهش کوددهی و کمترین کاهش عملکرد با اعمال گزینه افزایش شوری به‌دست آمد. بر این اساس، بیشترین عملکرد گندم آبی و ذرت علوفه‌ای، به‌ترتیب، برابر با ۵/۶ و ۶۵/۱۵ تن در هکتار در مناطق ۳ و ۶ به‌دست آمد که دارای بافت خاک لومی بودند. بیشترین عملکرد آفتابگردان و گوجه‌فرنگی، به‌ترتیب، برابر با ۱/۹۸ و ۴۳/۹۱ تن در هکتار در منطقه ۵ به‌دست آمد که بافت خاک لومی شنی داشت. همچنین، کمترین عملکرد در بین تمامی محصولات مربوط به منطقه ۷ بود که بافت خاک رس سیلتی داشت.

در بخش اقتصادی، از دو شاخص بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی برای آب و کود استفاده شد. در بین محصولات زراعی، بیشترین شاخص بهره‌وری فیزیکی آب (بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب) و کود، به‌ترتیب، برای ذرت ۱۱/۶۷ و ۱۶۲/۸ در مناطق ۳ و ۶ و کمترین آن برای آفتابگردان ۰/۳ و ۳/۶ در منطقه ۷ به‌دست آمد. حداکثر مقادیر شاخص بهره‌وری اقتصادی آب (بر حسب ریال بر مترمکعب) و کود (بر حسب ریال بر کیلوگرم)، به‌ترتیب، برای گوجه‌فرنگی (۲۰۹۵۸۰ و ۳۰۰۵۰۰) و آفتابگردان (۱۷۷۶۳۰ و ۲۱۱۵۷۲۰) در منطقه ۵ و ذرت علوفه‌ای (۹۴۹۰۰ و ۱۳۲۳۵۰۰) و گندم آبی (۵۶۶۲۰ و ۴۵۴۵۷۰) در مناطق ۳ و ۶ بود. پس از محاسبه این شاخص‌ها، مقدار شاخص بهره‌وری اقتصادی آب و کود پس از اعمال گزینه‌ها مجدداً محاسبه و تغییرات تجزیه‌وتحلیل شد. با کاهش آبیاری، میزان شاخص بهره‌وری اقتصادی آب برای برخی محصولات در برخی مناطق کاهش و در برخی مناطق نیز افزایشی بود؛ اما با کاهش کوددهی، میزان بهره‌وری اقتصادی کود در تمام مناطق و تمام محصولات کاهش یافت. در هر دو گزینه، گوجه‌فرنگی و گندم، به‌ترتیب، بیشترین و کمترین مقدار را داشتند.

بر اساس نتایج، مجموعه‌ای از سیاست‌ها به‌منظور کاهش اثرات مخرب استفاده بی‌رویه از منابع آب و کود به‌شرح زیر پیشنهاد می‌شود:

- ۱- در بین گزینه‌ها، کاهش کوددهی اثرات زراعی و اقتصادی بیشتری داشت. از این رو، شایسته است که امکان جایگزینی کودهای آلی از لحاظ فنی و اقتصادی بررسی شود تا از کاهش عملکرد محصول و زیان کشاورزان جلوگیری به عمل آید.
- ۲- تعیین قیمت‌های بالا برای کودهای نیترا ته برای مصارف بیش از مقدار توصیه شده را می‌توان با هدف کاهش آلودگی منابع آب و جلوگیری از ورود به آستانه تنش‌های شدید در دستور کار سیاست‌گذاران بخش کشاورزی قرار داد.
- ۳- از آنجا که منبع اصلی شوری آب‌های زیرزمینی کوددهی بیش از حد است، سیاست‌هایی همانند کاهش نیترات (قیمت بالا و استفاده از کودهای آلی) را می‌توان برای شوری تعیین کرد.
- ۴- کاهش آبیاری پس از کاهش کوددهی بیشترین تأثیر را در تغییرات عملکرد محصولات داشت، شناساندن فناوری‌های آبیاری به کشاورزان برای آبیاری صحیح و بدون هدررفت متناسب با نیاز گیاه می‌تواند در حفظ آبخوان‌ها و عملکرد محصولات مؤثر باشد.
- ۵- با توجه به متفاوت بودن نتایج زراعی و اقتصادی اعمال هر گزینه، بازم است که با توجه به اهمیت هر کدام از نتایج، مناطق مستعد کشت محصولات بر اساس کمترین تغییر در عملکرد محصولات و بیشترین مقدار شاخص بهره‌وری اقتصادی انتخاب و الگوی مناسب کشت برای هر منطقه ارائه شود. با توجه به نتایج به دست آمده و اثرات کمی و کیفی کاهش آب در منطقه، کاهش اثرات مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی قبل از رسیدن به مرحله بحرانی ضروری می‌نماید. علاوه بر این، کاهش بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های سطحی و زیرزمینی حیاتی است. در صورت تداوم روند فعلی، باید الگوی کشت و نوع کاربری زمین با توجه به شرایط تغییر کند و یا ممکن است هزینه‌های اضافی بر کشاورزان تحمیل شود تا اثرات مصرف بی‌رویه از بین برود، که همگی نیازمند مدیریت صحیح منابع آب برای حفظ کمیت و کیفیت آن است.

## منابع

1. Abbasi, F., Abbasi, N. & Tavakoli, A.R. (2017). Water productivity in agriculture: challenges and perspectives. *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(1), 141-144. DOI: 10.22067/jwsd.v4i1.67121. [In Persian]
2. Adeboye, O.B., Schultz, B., Adeboye, A.P., Adekalu, K.O. & Osunbitan, J.A. (2021). Application of the AquaCrop model in decision support for optimization of nitrogen fertilizer and water productivity of soybeans.

- Information Process in Agriculture*, 8(3), 419-436. DOI: 10.1016/j.inpa.2020.10.002.
3. Aelion, C.M., & Conte, B.C. (2004). Susceptibility of residential wells to VOC and nitrate contamination. *Environmental Science and Technology*, 38(6), 1648-1653. DOI: 10.1021/es030401p.
  4. Akumaga, U., Tarhule, A. & Yusuf, A. A. (2017). Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 225-234. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.08.011.
  5. Alizadeh, A. (2015). Principles of applied hydrology. Mashhad: Ferdowsi University. [In Persian]
  6. Alizadeh, H., & Abbasi, F. (2017). Investigation of grain yield response to different levels of water and fertilizer application using Aquacrop model. *Irrigation Science and Engineering*, 40(2), 119-134. DOI: 10.22055/jise.2017.13166. [In Persian]
  7. Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1994). Water quality for agriculture. *FAO Irrigation and Drainage*, 29(1), 1-130.
  8. Bameri, A., Piri, H. & Ganji, F. (2015). Assessment of groundwater pollution in Bajestan plains for agricultural purposes using indicator of kriging. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(1), 211-229. [In Persian]
  9. Doorenbos, J., & Kassam, A.H. (1979). Yield response to water. The United Nations: Food and Agriculture Organization (FAO). DOI: 10.1016/B978-0-08-025675-7.50021-2.
  10. Emdad, M.R., Tafteh, A. & Jafarnejadi, A.R. (2018). Evaluation of AquaCrop model for predicting wheat yield indifferent fertilizer management. *Research in Agriculture*, 10(2), 41-61. [In Persian]
  11. 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. *Plant Ecophysiology (Arsanjan Branch)*, 11(39), 71-85. [In Persian]

12. Gregory, P.J., Ingram, J.S.I., Anderson, R., Betts R.A., Brovkin, V. & Chase, T.N. (2002). Environmental consequences of alternative practices for intensifying crop production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 88(3), 279-290. DOI: 10.1016/S0167-8809(01)00263-8.
13. Guendouz, A., Hafsi, M., Khebbat, Z. & Achiri A. (2014). Performance evaluation of AquaCrop model for durum wheat (*Triticum durum* desf.) crop in semi-arid conditions in Eastern Algeria. *International Journal of Microbiology and Applied Sciences*, 3(2), 168-176.
14. Heng, L.K., Evett, S.R., Howell, T.A. & Hsiao, T.C. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448-459. DOI: 10.2134/agronj2008.0029xs.
15. Horrigan, L., Lawrence, R.S. & Walker, P. (2002). How sustainable agriculture can address the environmental and human health harms of industrial agriculture. *Environmental Health Perspectives*, 110(5), 445-456. DOI: 10.1289/ehp.02110445.
16. Hsiao, T.C., Heng, L.K., Steduto, P., Raes, D. & Fereres, E. (2009). AquaCrop model parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448-459. DOI: 10.2134/agronj2008.0218s.

17. Jamali, S., Ansari, H. & Salehnia, N. (2022). Economic productivity analysis of water and nitrogen in alternate furrow irrigation for quinoa. *Journal of Water Management in Agriculture*, 8(2), 1-14. [In Persian]
18. Karimi, M., & Jolaini, M. (2017). Evaluation of agricultural water productivity indices in major field crops in Mashhad plain. *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(1), 133-138. DOI: 10.22067/jwsd.v4i1.52783. [In Persian]
19. Khaleghi, M. (2019). Evaluation of the sunflower yield, water productivity and soil salinity simulation under water and salinity stresses using the AquaCrop model. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 8(2), 15-38. [In Persian]
20. Khavazi, K., Balali, M., Bazargan, K., Tehrani, M.M., Rezaei, H., Asadi Rahmani, H., Gheybi, M.N., Davoudi, M.H., Saadat, S., Moshiri, F. & Davatgar, N. (2015). Comprehensive program of soil fertility and plant nutrition (2015- 2026). Karaj, Iran: Soil and Water Research Institute. [In Persian]
21. Kumar, P., Sarangi, A., Singh, D.K. & Parihar, S.S. (2014). Evaluation of AquaCrop model in predicting wheat yield and water productivity under irrigated saline regimes. *Journal of Irrigation and Drainage*, 63(4), 474-487. DOI: 10.1002/ird.1841.
22. Li, S., & Zhang, Q. (2008). Geochemistry of upper Han River basin, China, 1: Spatial distribution of major ion compositions and their controlling factors. *Applied Geochemistry*, 23(12), 3535-3544. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2008.08.012.
23. Livingston, M.L., & Cory, D.C. (1998). Agricultural nitrate contamination of groundwater: an evaluation of environmental policy. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 34(6), 1311-1317. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05433.x.
24. MacQuarrie, K.T.B., Sudicky, E. & Robertson, W.D. (2001). Numerical simulation of a fine-grained denitrification layer for removing septic system

- nitrate from shallow groundwater. *Journal of Contaminant Hydrology*, 52(1-4), 29-55. DOI: 10.1016/S0169-7722(01)00152-8.
25. Mansour, H.A., Gaballah, M.S. & Nofal, O.A. (2020). Evaluating the water productivity by AquaCrop model of wheat under irrigation systems and algae. *Open Agriculture*, 5(1), 262-270. DOI: 10.1515/opag-2020-0029.
26. Mehdizadeh Mahalli, S.S., & Vafaei, F. (2016). Experimental and numerical investigation on saltwater intrusion into unconfined coastal aquifers. *Journal of Oceanography*, 7(25), 67-76. [In Persian]
27. Mehrazar, A., Soltani, J. & Rahmati, O. (2016). Evaluation of the AquaCrop model to simulate maize yield response under salinity stress. *Journal of Water and Soil*, 30(5), 1426-1439. DOI: 10.22067/jsw.v0i0.43858. [In Persian]
28. Mousavifazl, S.H., & Akhyani, A. (2020). Effect of irrigation water and nitrogen fertilizer on the yield, quality and water productivity of potato crop in drip irrigation (tape) method. *Irrigation and Drainage Journal*, 14(4), 1227-1239. [In Persian]
29. Nasr, M., & Zahran, H.F. (2014). Using of PH as a tool to predict salinity of groundwater for irrigation purpose using artificial neural network. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 40(2), 111-115. DOI: 10.1016/j.ejar.2014.06.005.
30. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. & Fereres, E. (2012). Reference manual, AquaCrop (Chapter 3). Rome, Italy: FAO, Land and Water Division.



31. RWCWAP (2021). Level of EC in Urmia plain. Urmia: Regional Water Company of West Azerbaijan Province (RWCWAP). Available at [www.agrw.ir](http://www.agrw.ir). [In Persian]
32. Saeidi, R., Ramezani Etedali, H., Sotoodehnia, A., Nazari, B. & Kaviani, A. (2021). Evaluation of AquaCrop model for estimating of changes process of soil moisture, evapotranspiration and yield of maize under salinity and fertility stresses. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14(1), 195-210. DOI: 10.22077/escs.2020.2473.1652. [In Persian]
33. Singh, R., Van Dam, J.C. & Feddes, R.A. (2006). Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district. *Indian Agricultural Water Management*, 82(3), 253-278. DOI: 10.1016/j.agwat.2005.07.027.
34. Soler, C.M.T., Sentelhas, P.C. & Hoogenboom, G. (2007). Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal Agronomy*, 27(2-4), 165-177. DOI: 10.1016/j.eja.2007.03.002.
35. 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(3), 426-437. DOI: 10.2134/agronj2008.0139s.
36. Stricevic, R., Dzeletovic, Z., Djurovic, N. & Cosic, M. (2014). Application of the AquaCrop model to simulate the biomass of *Miscanthus x giganteus* under different nutrient supply conditions. *Global Change Biology Bioenergy (CGB-Bioenergy)*. DOI: 10.1111/gcbb.12206.
37. Taifeh Rezaei, H. (2014). Irrigation planning of agricultural and garden crops. Urmia, Iran: Agriculture-Jahad Organization of West Azerbaijan Province. [In Persian]
38. WAPWWC (2021). Nitrate range of Urmia plain. Urmia, Iran: West Azerbaijan Province Water and Wastewater Company (WAPWWC). Available at <https://www.abfaazgharbi.ir>. [In Persian]
39. Wellman, T.P., & Rupert, M.G. (2016). Groundwater quality, age, and susceptibility and vulnerability to nitrate contamination with linkages to land

- use and groundwater flow, upper black squirrel Creek basin, Colorado, 2013. *Scientific Investigations Report*. DOI: 10.3133/sir20165020.
40. WHO (2011). Guidelines for drinking-water quality. Geneva, Switzerland: World Health Organization (WHO). Available at [https://www.who.int/docs/default-source/food-safety/arsenic/9789241549950-eng.pdf?sfvrsn=bad6319a\\_2](https://www.who.int/docs/default-source/food-safety/arsenic/9789241549950-eng.pdf?sfvrsn=bad6319a_2).
41. Zamani, O., Mortazavi, S.A. & Balali, H. (2014). Economical water productivity of agricultural products in Bahar plain, Hamadan. *Journal of Water Research in Agriculture*, 28(1), 51-62. DOI: 10.22092/jwra.2015.101065. [In Persian]
42. Zhang, C., Xie, Z., Wang, Q., Tang, M., Feng, S. & Cai, H. (2022). AquaCrop modeling to explore optimal irrigation of winter wheat for improving grain yield and water productivity. *Agricultural Water Management*, 266, 107580. DOI: 10.1016/j.agwat.2022.107580.