



The effect of supplementary irrigation on yield and water use efficiency of Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) in greenhouse and farm investigation

Houshang Ghamarnia¹ , Zahra Jalili² , Farhang Sargordi³ 

¹ Corresponding Author, Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: hghamarnia@razi.ac.ir

² Ph. D student of Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: z_jalili1988@yahoo.com

³ Assistant professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: fsargordi@razi.ac.ir

ABSTRACT

Introduction

Today, limited water resources are one of the most problems of agriculture in Iran country. On the other hand, the growing population necessitates the production of more food. Therefore, finding solutions to overcome water shortages in different regions has always been one of the studies and research priorities (Khairabi et al., 2017). On the other hand, sweeteners among the important foods are used as a flavoring and sweetener in a wide range of food products. The most common sweetener that is widely used by humans to create the desired taste in a variety of foods is sugar. Sugar is, one of the most important sources of energy in the human diet. It has a daily consumption and is relatively cheap compared to the amount of calories produced. Sugar has always been considered and supported by governments as a strategic commodity (Azarpour et al., 2017). According to different researches, there are many natural sweeteners to replace sucrose in food, and the side effects of artificial sweeteners, especially on the characteristics of the final product, have been significant. Therefore, the use of natural sweeteners instead of sucrose has received special attention (Alizadeh et al., 2014). Stevia, as a plant with medicinal and anti-diabetic effects, is native to the mountainous region of Amoeba, located on the border of Brazil and Paraguay, which is widely cultivated in Shiraz and Isfahan in Iran. This plant has medicinal and nutritional properties that contain sweet compounds and it contains (steviosides and ribadiosides) which are approximately 200 to 300 times sweeter than sucrose (Hanson et al., 1993). Stevia is used as a sweetener in the production of jams, drinks, juices, soft drinks and ice cream suitable for diabetics (Raisi et al., 2014).

Because of water resources of suitable quality for irrigation of crops in our country are limited, the use of auxiliary methods, such as supplementary irrigation (to meet the water needs of the plant during the growing season and increase yield) is essential. In this study, research on stevia plant under different treatments such as: (without supplementary irrigation, single irrigation at flowering and two irrigations at flowering and seedling) and study of different treatments on stevia yield in both greenhouse and farm environment have been carried out.

Material and methods

This research was carried out in the greenhouse and research farm of the Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University (located at 47 degrees and 9 minutes east longitude and 34 degrees and 21 minutes north latitude with 1319.8 meters above sea level) during 2016 and 2017. In this study, three treatments of supplementary irrigation were considered to investigate the effect of supplementary irrigation on stevia crop yield. The considered levels were included as no supplementary irrigation, single irrigation at flowering time and two irrigations at seedling and flowering times respectively. During the research, water requirement using daily data extracted from lysimetric data of grass cultivation and considering plant coefficients equal to 0.76, 1.15, 1.49 and 1.17 for four stages of stevia plant growth in both the study area (greenhouse and research farm) was calculated and provided to the plant using surface irrigation (Jalili et al. 2019). The experiment was performed in three replications and a total of 18 pots in each places (greenhouse and research farm) with an outer diameter of 40 cm and 4 plants were planted in each pot. The pots were prepared for stevia cultivation on May 1st. On May 25, fertilizing the soil inside the pots was carried out based on the fertilizer recommendation. The amount of 120 kg/ha of triple superphosphate, 120 kg/ha of urea fertilizer, 120 kg/ha of potassium sulfate and 5 tons/ha of rotted manure were considered for plant growth period. The fertilizers were mixed with soil before planting. After the initial fertilization, the surface soil of the pot was shaken to mix the fertilizer with the soil.

Measured indicators

Plant indices measured in this study were included root length, leaf weight (total amount of leaves harvested for each treatment), plant height (length of aerial part of the plant from soil surface to the end of the tallest leaf), weight of 100 leaves, number of branches, the number of leaves per plant and the sugar content of the stevia plant. The phenol-sulfuric acid method was used to measure the sugar content of stevia, which is a soluble sugar (Nielsen, 2017). Leaf samples powdered with liquid nitrogen were used to determine soluble sugars. Required solutions were included 80% ethanol, 0.5% phenol solution (0.5 g of phenol dissolved in 100 ml of distilled water) and 98% sulfuric acid. In this study, water use efficiency was determined based on leaf yield and sugar production in each treatment by dividing each of the mentioned functions by the amount of water consumption per hectare, respectively.

Results and discussion

The total water requirement during the growth period of stevia for all treatments in the first and second year of cultivation in the greenhouse environment were zero mm of rainfall and 2023.7 and 1747.5 mm of water requirement, respectively. In the research farm, were 267.4 and 155.4 mm of rainfall and 1824.4 and 1685.5 mm.

The average two-year results of the study showed that the highest and lowest leaf yields, in the greenhouse and research farm environment were (367.80 and 260.80) and sugar yield in the greenhouse were (337.2 and 235.4) kg/ha, respectively. The average yield of sugar in greenhouse and research farm were (81.3 and 41.9), (70.2 and 30.8) kg/ha for dual irrigation treatments at the time of flowering and seedling and without supplementary irrigation respectively. The highest and lowest water use efficiencies in the greenhouse and research farm environment for dual irrigation treatments at the time of flowering and seedling and without supplementary irrigation based on leaf yield were (0.98 and 0.69), (0.96) and 0.67) and sugar yield (0.65, 0.33), (0.60 and 0.26) kg/ha/mm, respectively.

In this study, the application of different treatments on water use efficiency at the probability level ($P < 0.01$) was investigated. The results indicated a significant difference between the applied treatments. According to the obtained results, the lowest water use efficiency based on leaf and sugar yield was related to the treatment without supplementary irrigation. This has led to a reduction in surface water consumption by the plant without the effect of increasing leaf and sugar yield. Therefore, water use efficiency based on leaf and sugar yield were decreased. The results showed that the treatment with two supplementary irrigations at the time of flowering and seedling had the highest water use efficiency in terms of leaf and sugar yield compared to the other treatments. The results obtained in the greenhouse showed that single irrigation treatment at flowering time and treatment without supplementary irrigation compared to double irrigation treatment at flowering and seedling (control treatment) caused a decrease of (20.9% and 33.6%) and (29.3% and 48.5%) in leaf and sugar yield respectively. In the research farm environment, the results showed that single irrigation treatment at flowering time and treatment without supplementary irrigation compared to double irrigation treatment at flowering and seedling (control treatment) caused a decrease of (22.9% and 36.8%) and (30.2% and 56.2%) in leaf and sugar yield respectively.

Based on the Benhmimou et al. (2017) study, the dry stevia leaf yield was 24.79, 20.36, and 11.44 gram per plant at irrigation levels of 100%, 80% and 50%. This indicated that dry leaf yield decreased by irrigation reduction. In addition, leaf stevia yield was investigated by Parris et al. (2016) for different irrigation treatments, which confirmed the results of the current study. In that study, dry leaf yield was measured at irrigation levels of 10, 20, 40, 60, 80 kPa of stevia, which were reported to be 5.68, 5.25, 4.63, 4.76 and 4.25 t/ha, respectively. In this study, except of 60 kPa irrigation suction treatment, which showed a small increase in dry leaf yield, the rest of the results showed a direct relationship between irrigation rate and dry leaf yield, which confirms the results of this study. Also, based on the results presented by Parris et al. (2017), the relationship between the total amount of steviol glycoside and different levels of irrigation was direct. Based on different irrigation treatments of 10, 20, 40, 60, 80 kPa, its amount was reported to be 898, 855, 700, 634 and 579 kg/ha, respectively, which is consistent and confirms the research results obtained in this study. Meanwhile, the results of Ghamarnia et al. (2016) were showed that different levels of irrigation under 40, 60, 80 and 100 percent on water use efficiency of stevia had a significant difference at the level of one percent. Irrigation levels of 40 and 100 percent had the lowest and highest water use efficiency in terms of leaf and sugar yield compared to other treatments, respectively. Also, their published results showed that all the various parameters of the stevia plant were significantly decreased with increasing the percentage of low irrigation.

Conclusions

The present study was conducted to investigate the effect of supplementary irrigation on stevia yield in research farm and greenhouse environment. The experiment was carried out in different treatments such as: without supplementary irrigation, single irrigation at flowering time and two irrigations at flowering and seedling time. The results of this study indicated that supplementary irrigation has an effective role in increasing leaf and sugar yield of stevia. Among the different treatments that were considered for supplementary irrigation, two supplementary irrigations at the time of flowering and seedling of the plant had the best yield results, which indicates the need for more water for the plant due to its physiological characteristics at the time of flowering and seedling. This amount had around 53.6% increase in leaf and sugar yield in the field and 54.4% increase in yield in the greenhouse compared to the control treatment respectively.

In this study, the effect of different irrigation treatments on the morphological characteristics of stevia was evaluated and it was found that different levels of irrigation had a significant effect on those characteristics. The results showed that dual irrigation treatment at the time of flowering and seedling had the most effective results in increasing root length, plant height, leaf weight, number of branches and number of leaves. For example, the root length in the two supplementary irrigation treatments in the field environment was 132 cm, while without supplementary irrigation was only 94.5 cm. Also, the number of leaves per stevia plant in the treatment of two supplementary irrigations was 47 versus 32.5 in the treatment without supplementary irrigation. This means that supplementary irrigation was played an important role in the development and completion of growth of various parts of the stevia plant. According to the results obtained in this study for stevia, two supplementary irrigations at the time of flowering and seeding were recommended to increase all yields.

Keywords: Lysimeter, (*Stevia Rebaudiana* B.), supplement irrigation, greenhouse, farm

Article Type: Research Article

Article history: Received: 08 September 2021 Revised: 17 October 2021 Accepted: 08 November 2021 ePublished: 29 May 2022

Cite this article: Ghamarnia, H., Jalili, Z., & Sargordi, F. (2022). The effect of supplementary irrigation on yield and water use efficiency of *Stevia* (*Stevia rebaudiana* Bertoni) in greenhouse and farm investigation, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(1), 1-15. DOI: 10.22126/ATWE.2021.6917.1006

Publisher: Razi University

© The Author(s).





بررسی تاثیر آبیاری تکمیلی بر عملکرد و کارایی مصرف آب گیاه استویا (*Stevia rebaudiana* Bertoni) در محیط های گلخانه و مزرعه

هوشنگ قمرنیا^۱✉، زهرا جلیلی^۲، فرهنگ سرگردی^۳

^۱ نویسنده مسئول، استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: hghamarnia@razi.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: z_jalili1988@yahoo.com

^۳ استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: fsargordi@razi.ac.ir

چکیده

ایران با متوسط ریزش های آسمانی ۲۲۰ میلیمتر در سال، در زمره مناطق خشک و نیمه خشک جهان طبقه بندی می شود که با بحران آب روبرو است. از آن جا که منابع آبی با کیفیت مطلوب برای آبیاری محصولات در جهان محدود است، لذا استفاده از روش های کمک کننده نظیر آبیاری تکمیلی (جهت تامین نیاز آبی گیاه در طول دوره رشد و افزایش عملکرد) امری ضروری است. گیاه استویا به عنوان گیاهی با اثرات دارویی و ضد دیابت، بومی منطقه کوهستانی آمامبی واقع در مرز برزیل و پاراگوئه است که در ایران در شیراز و اصفهان به صورت انبوه کشت می شود. گلیکوزیدهای دیترنی موجود در این گیاه (عامل اصلی ایجاد طعم بسیار شیرین در عصاره های گیاه) تا ۳۰۰ برابر شیرین تر از شکر می باشند که در صنایع دارویی و غذایی کاربرد دارند. در این پژوهش، آزمایشی به منظور بررسی تاثیر آبیاری تکمیلی (بدون آبیاری تکمیلی، تک آبیاری در زمان گل دهی و دو آبیاری در زمان های گل دهی و دانه دهی) بر عملکرد محصول استویا در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی انجام شد. نتایج نشان داد آبیاری تکمیلی برای جلوگیری از کاهش عملکرد قند در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی به ترتیب حدود (۱۸/۷ و ۲۰/۷ و ۲۱/۴) برابر آبیاری در سال اول و دوم کشت می باشد. با توجه به این نتایج، آبیاری گیاه استویا با دو آبیاری تکمیلی در زمان گل دهی و دانه دهی برای افزایش عملکرد گیاه توصیه می شود.

واژه های کلیدی: لیسیمتر، استویا، آبیاری تکمیلی، گلخانه، مزرعه تحقیقاتی

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۷ شهریور ۱۴۰۰ اصلاح: ۲۵ مهر ۱۴۰۰ پذیرش: ۱۷ آبان ۱۴۰۰ چاپ الکترونیکی: ۰۸ خرداد ۱۴۰۱

استناد: قمرنیا، ه.، جلیلی، ز.، و سرگردی، ف. (۱۴۰۱). بررسی تاثیر آبیاری تکمیلی بر عملکرد و کارایی مصرف آب گیاه استویا (*Stevia rebaudiana* Bertoni) در محیط های گلخانه و مزرعه، *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۱۲(۱)، ۱-۱۵. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2021.6917.1006



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

امروزه محدودیت منابع آب مناسب از عمده‌ترین تنگناها و مشکلات کشاورزی در ایران است. از طرف دیگر، افزایش روز افزون جمعیت نیاز به تولید مواد غذایی بیشتر را ایجاد می‌کند. بنابراین یافتن راه کارهایی برای غلبه بر کمبود آب در مناطق مختلف، همواره از اولویت‌های مطالعاتی و پژوهشی بوده است (خیرابی و همکاران، ۱۳۹۶).

از طرفی شیرین‌کننده‌ها از جمله مواد غذایی مهمی هستند که در دامنه وسیعی از محصولات غذایی به عنوان طعم دهنده و شیرین‌کننده به کار برده می‌شوند. شکر رایج‌ترین ماده شیرین‌کننده‌ای که توسط بشر برای ایجاد طعم مطلوب در انواع مواد غذایی کاربرد فراوانی دارد. شکر به عنوان یکی از منابع مهم تامین انرژی در رژیم غذایی انسان، دارای مصرف روزمره بوده و در مقایسه با میزان کالری تولیدی نسبتاً ارزان است. شکر همواره به عنوان یک کالای استراتژیک مورد توجه و حمایت دولت‌ها بوده است (آذریور و همکاران، ۱۳۹۶). بر اساس تحقیقات انجام شده شیرین‌کننده‌های طبیعی بسیاری، جهت جایگزینی قند ساکارز در مواد غذایی وجود داشته و اثرات سوء شیرین‌کننده‌های مصنوعی به‌ویژه بر روی ویژگی‌های محصول نهائی نیز قابل توجه بوده است. لذا، امروزه استفاده از شیرین‌کننده‌های طبیعی جایگزین ساکارز، مورد توجه ویژه قرار گرفته است (علیزاده و همکاران، ۲۰۱۴).

گیاه استویا به عنوان گیاهی با اثرات دارویی و ضد دیابت، بومی منطقه کوهستانی آمازی واقع در مرز برزیل و پاراگوئه است که در ایران در شیراز و اصفهان به صورت انبوه کشت می‌شود. این گیاه دارای مشخصات دارویی و غذایی بوده که ترکیبات شیرین موجود در آن شامل (استویوزید و ریبادیوزید) تقریباً ۲۰۰ الی ۳۰۰ برابر شیرین‌تر از ساکارز هستند (هانسون و همکاران، ۱۹۹۳). از استویا به عنوان شیرین‌کننده در تولید انواع مربا، نوشیدنی‌ها، آبمیوه‌ها، نوشابه و بستنی‌های مناسب افراد دیابتی استفاده می‌شود (رئیس و همکاران، ۲۰۱۴).

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

تاکنون بر روی میزان آب مورد نیاز و اثرات رژیم‌های مختلف آبیاری بر روی میزان محصول استویا تحقیقات مختلفی انجام شده است. جلیلی و همکاران (۱۳۹۷) در آزمایشی که در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار به صورت فاکتوریل در طی دو سال بر روی گیاه استویا انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که استفاده از آب‌های زیرزمینی کم عمق با شوری کمتر از ۲ دسی‌زیمنس بر متر برای آبیاری این گیاه می‌تواند به صورت قابل توجهی نیاز آبی گیاه را برطرف نموده و به تبخیر و تعرق آن کمک کند. قمرنیا و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی با هدف بررسی تاثیر کم آبیاری بر عملکرد محصول استویا، تیمارهای آبیاری شامل ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ (تیمار شاهد) درصد نیاز آبی گیاه را در نظر گرفته و آزمایش را در سه تکرار در محیط‌های مزرعه و گلخانه انجام دادند. یافته‌های تحقیق آن‌ها نشان داد که آستانه تحمل استویا برای جلوگیری از کاهش عملکرد برگ و قند نسبت به کم‌آبیاری، در محیط مزرعه به ترتیب (۳، ۱۳، ۳) و (۱، ۱۲، ۰، ۹۸) و در محیط گلخانه در حدود (۳، ۲ و ۳، ۱) و (۰، ۹۴ و ۰، ۸۳) برابر درصد کم آبیاری در سال اول و دوم کشت است.

کریمی و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای که بر روی استویا و اثرات عوامل بازدارنده رشد گیاه ناشی از تنش کم آبی در موسسه تحقیقات بیوتکنولوژی کشاورزی اصفهان در شرایط گلخانه‌ای، نشان دادند که عوامل بازدارنده رشد گیاه استویا نقش مهمی در تعدیل پاسخ گیاهان به تنش کم آبی از طریق فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی دارند. اصلان و همکاران (۲۰۱۷) در طی مطالعه‌ای، میزان هدایت روزنه‌ای ۲ گیاه استویا در تیمارهای مختلف آبیاری در ۱۵ روز پی در پی را بررسی نمودند. مقادیر اندازه‌گیری شده آبیاری جهت این تحقیق ۱۲۰، ۸۰، ۴۰، ۶۰ و ۲۰ درصد میزان نیاز آبی گیاه نسبت به مقدار شاهد ۱۰۰ درصد آبیاری در نظر گرفته شد. نتیجه این پژوهش نشان داد که میزان هدایت روزنه‌ای استویا همراه با افزایش تنش آبی، کاهش پیدا می‌کند. بنهمیمو و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی که در مرکز تحقیقات زراعی رباط مراکش انجام دادند، در سه تیمار آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۵۰ درصد، تاثیر رژیم‌های مختلف آبیاری را بر روی عملکرد و رشد گیاه استویا اندازه گرفتند. بر اساس نتایج بدست آمده، پارامترهای ارتفاع گیاه، قطر ساقه، تعداد برگ‌ها و شاخص سطح برگ در رژیم آبیاری ۵۰ درصد به ترتیب ۲۲، ۴۴٪، ۳۶، ۵۴٪، ۴۵، ۱۰٪

1 Aslan et al

2 Stomatal Conductance

3 Benhmimou et al

و ۵۸,۱۵٪ کاهش داشته‌اند. همچنین در رژیم آبیاری ۵۰ درصد میزان عملکرد ۳۷,۶۶ درصد کاهش پیدا کرده بود. ماهجان و همکاران (۲۰۲۱)، در پژوهشی اثرات رژیم‌های مختلف آب موجود در خاک و همچنین نیتروژن را در پانزده تیمار متفاوت بر روی گیاه استویا انجام دادند. سه سطح مختلف پتانسیل آب خاک شامل ۲۰، ۵۰ و ۷۵ کیلوپاسکال در پنج مقدار نیتروژن از صفر تا ۱۴۰ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده نشانگر آن بود که آبیاری در سطح پتانسیل آب خاک ۵۰ کیلو پاسکال، ۳،۶-۱۸,۹٪ و ۷،۲-۲۰,۲٪ ماده خشک بیشتری نسبت دو سطح دیگر آبیاری در ۲۰ و ۷۵ درصد تولید کرده است. نتایج نهائی تحقیق بر این موضوع دلالت داشت که آبیاری در ۵۰ کیلو پاسکال پتانسیل آب خاک به همراه کاربرد ۱۰۵ کیلو گرم نیتروژن در هکتار ترکیب مناسبی برای کشت پایدار گیاه استویا است.

حال از آنجائی که منابع آبی با کیفیت مناسب برای آبیاری محصولات در کشور ما ایران محدود است، لذا استفاده از روش‌های کمک کننده، نظیر آبیاری تکمیلی (جهت تامین نیاز آبی گیاه در طول دوره رشد و افزایش عملکرد) امری ضروری است. در این پژوهش، تحقیقاتی بر روی گیاه استویا، تحت تیمارهای (بدون آبیاری تکمیلی، تک آبیاری در زمان گل‌دهی و دو آبیاری در زمان‌های گل‌دهی و دانه‌دهی) و بررسی تیمارهای مختلف بر عملکرد محصول استویا در دو محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی به انجام رسیده است.

روش پژوهش

این طرح در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی (واقع در ۴۷ درجه و ۹ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی با ۱۳۱۹/۸ متر ارتفاع از سطح دریا) در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ انجام شد. با نمونه‌گیری از خاک منطقه مورد مطالعه، طبقه‌بندی خاک مزرعه و گلخانه از نظر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به شرح جداول الف و ب (۱) است. همچنین متوسط آنالیز خصوصیات شیمیائی آب آبیاری مورد استفاده در جدول (۲) آمده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه

الف) خصوصیات فیزیکی خاک

عمق نمونه‌گیری (سانتیمتر)	بافت خاک	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm ³)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
۳۰-۰	سیلتی رسی	۱/۳۰	۴/۲	۴۴/۲	۵۱/۶
۶۰-۳۰	سیلتی رسی	۱/۳۱	۳/۹	۴۵/۵	۵۰/۶
۱۰۰-۶۰	سیلتی رسی	۱/۲۹	۳/۲	۴۳/۱	۵۳/۷

ب) خصوصیات شیمیایی خاک

pH	EC	فسفر قابل جذب (p.p.m)	پتاسیم قابل جذب (p.p.m)	کربن آلی (%)	Mn (Meq/l)	Fe (Meq/l)	Zn (Meq/l)
۷/۳	۱/۲	۲۶	۴۴۰	۱/۳۸	۷/۸	۱۱/۹	۱/۲۶

جدول ۲. خصوصیات شیمیایی آب منطقه مورد مطالعه

SAR	درصد سدیم محلول	مجموع کاتیونها	K ⁺ (Meq/l)	Na ⁺ (Meq/l)	Mg ⁺⁺ + Ca ⁺⁺ (Meq/l)	مجموع آنیونها	SO ₄ ⁻ (Meq/l)	CL ⁻ (Meq/l)	HCO ₃ ⁻ (Meq/l)	CO ₃ ⁻ (Meq/l)	pH	TDS (mg/lit)	شوری آب (ds/m)
۰/۵۴	۱۱/۷	۱۱/۴۲	۲/۱۵	۱/۰۹	۸/۱۸	۹/۱۶	۱/۱۵	۱/۸	۶/۲۰	۰/۰۱	۶/۹	۶۳۱	۱

آمار و اطلاعات هواشناسی در طی دو سال تحقیق از ایستگاه هواشناسی واقع در ۱۰۰ متری محل انجام تحقیقات اخذ گردید. ضمناً، در محیط گلخانه برای محاسبه پارامترهای حداکثر و حداقل دما و رطوبت نسبی از سنسورهای داخل گلخانه استفاده شد. آمار استخراج شده از این ایستگاه‌ها جهت برآورد مشخصات آب و هوایی طرح در طول دو سال تحقیق در جداول ۳ (الف و ب) آورده شده‌اند.

جدول ۳. الف- میانگین پارامترهای هواشناسی در طی مدت کشت در محیط ایستگاه لایسمتری (مزرعه)

سال	ماه	حداقل دما (سانتی گراد)	حداکثر دما (سانتی گراد)	سرعت باد (متر بر ثانیه)	رطوبت نسبی حداکثر (درصد)	رطوبت نسبی حداقل (درصد)	ساعات آفتابی (ساعت)	مجموع بارندگی (میلیمتر)
۱۳۹۵	اردیبهشت	۱۷/۰۰	۲۵/۴۳	۲/۵۷	۵۰/۰۶	۹/۸۲	۸/۹۸	
	خرداد	۱۱/۵۱	۳۱/۰۵	۲/۶۱	۲۹/۵۸	۵/۱۰	۱۰/۷۰	
	تیر	۱۷/۲۱	۳۸/۶۹	۲/۳۸	۲۵/۰۶	۴/۵۸	۱۰/۳۹	
	مرداد	۱۷/۱۱	۳۹/۳۶	۲/۵۵	۲۲/۴۸	۳/۹۴	۱۰/۲۰	
	شهریور	۱۴/۷۹	۳۶/۰۴	۲/۴۵	۳۱/۸۴	۸/۱۶	۹/۷۰	
	مهر	۸/۱۱	۲۸/۴۶	۲/۳۸	۳۷/۹۰	۱۲/۴۳	۸/۱۹	۲۶۷/۴
	آبان	۵/۲۵	۲۲/۸۴	۲/۲۱	۸۸/۲۰	۴۲/۳۳	۵/۹۹	
	آذر	-۱/۸۳	۱۱/۷۶	۲/۲۱	۸۷/۴۰	۴۱/۰۳	۶/۴۶	
	دی	-۰/۸۹	۱۱/۰۰	۲/۰۳	۸۰/۶۳	۳۸/۴۷	۵/۴۱	
۱۳۹۶	بهمن	-۳/۴۲	۷/۲۰	۲/۱۸	۸۲/۶۷	۳۴/۸۳	۶/۳۰	
	اسفند	-۰/۴۱	۱۴/۵۴	۱/۷۹	۷۹/۲۰	۲۸/۹۷	۶/۷۵	
	فروردین	۶/۲۵	۱۷/۷۲	۲/۲۳	۸۱/۱۶	۳۱/۲۶	۵/۶۶	
	اردیبهشت	۹/۴۶	۲۶/۵۱	۲/۴۶	۷۳/۴۵	۱۸/۲۶	۶/۱۴	
	خرداد	۱۱/۶۶	۳۲/۵۶	۲/۷۵	۴۴/۲۶	۵/۹۷	۷/۰۹	
	تیر	۱۷/۶۷	۳۸/۱۱	۲/۲۶	۲۶/۴۵	۴/۴۵	۵/۹۸	۱۵۵/۴
۱۳۹۶	مرداد	۱۸/۷۴	۳۹/۲۴	۲/۲۹	۲۱/۳۵	۳/۲۳	۷/۳۱	
	شهریور	۱۸/۲۱	۳۸/۴۱	۲/۱۴	۲۰/۱۴	۳/۸۱	۸/۲۶	
	مهر	۱۷/۵۲	۳۶/۲۳	۲/۱۱	۲۱/۳۱	۴/۱۲	۷/۱۷	

جدول ۳. ب- میانگین پارامترهای هواشناسی در طی مدت کشت در محیط گلخانه

سال	ماه	حدداقل دما (سانتی گراد)	حداکثر دما (سانتی گراد)	سرعت باد (متر بر ثانیه)	رطوبت نسبی		مجموع بارندگی (میلیمتر)
					حداکثر (درصد)	حدداقل (درصد)	
۱۳۹۵	اردیبهشت	۲۲/۲۰	۲۹/۷۱	۰	۵۳/۵۸	۱۱/۴۳	۰
	خرداد	۲۴/۲۳	۳۵/۵۶	۰	۳۴/۳۹	۱۵/۰۳	
	تیر	۲۶/۱۲	۳۹/۴۲	۰	۳۵/۱۶	۲۱/۷۵	
	مرداد	۲۸/۱۷	۴۱/۷۷	۰	۳۷/۵۳	۲۵/۲۲	
	شهریور	۳۱/۱۱	۴۲/۰۱	۰	۴۳/۲۸	۱۸/۴۶	
	مهر	۲۵/۸۶	۳۵/۵۲	۰	۵۳/۱۲	۲۵/۵۱	
	آبان	۱۴/۸۵	۳۰/۰۰	۰	۶۵/۴۱	۳۲/۲۰	
	آذر	۱۰/۲۹	۲۵/۷۰	۰	۷۲/۷۸	۳۹/۷۰	
	دی	۷/۱۲	۲۰/۶۴	۰	۷۵/۳۲	۲۹/۲۳	
	بهمن	۲/۵۲	۱۸/۳۳	۰	۷۹/۲۰	۲۲/۲۹	
اسفند	۷/۲۱	۱۷/۱۲	۰	۷۵/۲۴	۲۱/۵۱		
۱۳۹۶	فروردین	۹/۵۱	۲۲/۲۲	۰	۷۱/۱۹	۱۸/۰۶	۰
	اردیبهشت	۱۹/۱۱	۲۹/۱۹	۰	۶۲/۱۸	۱۴/۲۶	
	خرداد	۲۱/۵۱	۳۵/۰۶	۰	۴۸/۷۲	۱۰/۱۱	
	تیر	۲۶/۲۴	۳۹/۱۰	۰	۴۰/۸۳	۸/۱۲	
	مرداد	۲۷/۲۲	۴۲/۰۳	۰	۳۲/۵۶	۵/۰۴	
	شهریور	۲۹/۳۱	۴۰/۴۳	۰	۲۵/۴۹	۳/۴۳	
	مهر	۲/۰۵	۳۸/۷۶	۰	۱۹/۷۷	۲/۳۹	

در این پژوهش برای بررسی تاثیر آبیاری تکمیلی بر عملکرد محصول استویا سه حالت از آبیاری تکمیلی در نظر گرفته شد. سطوح در نظر گرفته شده شامل بدون آبیاری تکمیلی، تک آبیاری در زمان گل‌دهی و دو آبیاری در زمان‌های دانه‌دهی و گل‌دهی بودند. نیاز آبی با استفاده از داده‌های روزانه استخراج شده توسط داده‌های لایسیمیتری کشت گیاه چمن و در نظر گرفتن ضرایب گیاهی معادل ۰/۷۶، ۱/۱۵، ۱/۴۹ و ۱/۱۷ برای چهار مرحله رشد گیاه استویا در منطقه مورد مطالعه (گلخانه و مزرعه تحقیقاتی) محاسبه شد و با استفاده از آبیاری سطحی در اختیار گیاه قرار گرفت (جلیلی و همکاران ۲۰۱۹). آزمایش در سه تکرار انجام شده و مجموعاً از ۱۸ گلدان در هر محیط به قطر خارجی ۴۰ سانتی‌متر و کاشت ۴ گیاه در هر کدام از گلدان‌ها به انجام رسید. گلدان‌های مورد نظر در ۱ اردیبهشت جهت کشت استویا آماده شدند. در تاریخ ۵ اردیبهشت کود دهی خاک داخل گلدان‌ها بر اساس توصیه کودی انجام شد. مقدار ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل، ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره و ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم و ۵ تن در هکتار کود دامی پوسیده برای دوره رشد گیاه در نظر گرفته شد. کودهای مورد نظر قبل از کاشت با خاک مخلوط شدند. بعد از کود پاشی اولیه، خاک سطحی گلدان به هم زده شد تا کود با خاک مخلوط گردد.

کاشت نشاء استویا در این گلدان‌ها در تاریخ ۱۵ اردیبهشت ماه صورت پذیرفت. قبل از اعمال تیمار آبیاری تکمیلی همه گلدان‌ها با آبی با شوری ۱ دسی زیمنس بر متر آبیاری شدند. در مزرعه تحقیقاتی، تیمار آبیاری تکمیلی در زمان گل‌دهی با ظاهر شدن اولین گل در گیاهان کشت شده یعنی حدود ۱۵۸ روز پس از کاشت (۱۹ مهر) در سال اول انجام شد. در سال دوم نیز در حدود ۴۶۲ روز (۱۹ مرداد) از مرحله کاشت، تیمار دو بار

آبیاری تکمیلی در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی یعنی در حدود ۱۵۹ روز (۲۰ مهر) پس از کاشت و دومین آبیاری تکمیلی در زمان دانه‌دهی با تبدیل شدن اولین گل به بذر گیاه استویا یعنی حدود ۱۹۱ روز (۲۲ آبان) پس از کاشت به انجام رسید. در سال دوم انجام آزمایش تیمار دو بار آبیاری تکمیلی در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی در حدود ۴۶۴ روز (۲۱ مرداد) پس از کاشت و دومین آبیاری تکمیلی در زمان دانه‌دهی با تبدیل شدن اولین گل در گیاهان کشت شده به بذر گیاه استویا یعنی حدود ۴۸۶ روز (۱۲ شهریور) پس از کاشت اعمال گردید.

همچنین در سال اول در گلخانه تیمار آبیاری تکمیلی در زمان گل‌دهی در حدود ۱۵۴ روز پس از کاشت (۱۵ مهر) و در حدود ۴۵۸ روز (۱۵ مرداد) در سال دوم انجام آزمایش به انجام رسید. ضمناً تیمار دو بار آبیاری تکمیلی در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی که در آن در حدود ۱۵۴ روز (۱۵ مهر) پس از کاشت به انجام رسید. دومین آبیاری تکمیلی در زمان دانه‌دهی با تبدیل شدن اولین گل در گیاهان کشت شده به بذر گیاه استویا یعنی حدود ۱۸۴ روز (۱۵ آبان) پس از کاشت در سال اول و تیمار دو بار آبیاری تکمیلی در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی که در حدود ۴۵۸ روز (۱۵ مرداد) پس از کاشت و دومین آبیاری تکمیلی در زمان دانه‌دهی در حدود ۴۸۳ روز (۹ شهریور) پس از کاشت در سال دوم انجام آزمایش اعمال گردید. کل مقدار آب مصرفی توسط گیاهان در طول دوره اعمال تیمار عبارت بود از مجموع آب آبیاری سطحی و آب باران (که در گلخانه صفر است). برای اندازه‌گیری قند و سایر شاخص‌های گیاهی، برگ‌ها و سایر پارامترهای گیاه استویا در سال اول و دوم کشت به ترتیب در تاریخ‌های ۱۶ مهر سال ۱۳۹۵ و ۳۰ مهر سال ۱۳۹۶ برداشت شدند. برداشت محصول به صورت دستی انجام گرفت.

شاخص‌های اندازه‌گیری شده

شاخص‌های گیاهی اندازه‌گیری شده در این تحقیق شامل طول ریشه، وزن برگ (مقدار کل برگ برداشت شده برای هر تیمار)، ارتفاع بوته (طول قسمت هوایی گیاه از سطح خاک تا انتهای بلندترین برگ روئیده)، وزن ۱۰۰ عدد برگ، تعداد شاخه‌های فرعی، تعداد برگ در یک بوته و قند گیاه استویا بودند. برای اندازه‌گیری قند گیاه استویا که به صورت قند محلول است از روش فنل - اسید سولفوریک با کمی تغییر استفاده شد (نیلسن، ۲۰۱۷). نمونه‌های برگ پودر شده با ازت مایع، برای تعیین قندهای محلول مورد استفاده قرار گرفتند. محلول‌های مورد نیاز شامل اتانول ۸۰ درصد، محلول ۰/۵ درصد فنول (۰/۵ گرم فنول در ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر حل شد) و اسید سولفوریک ۹۸ درصد بودند.

تعیین کارائی مصرف آب بر اساس عملکرد برگ و قند تولیدی

در این تحقیق کارائی مصرف آب بر اساس عملکرد برگ و قند تولیدی در هر تیمار به ترتیب با تقسیم هر کدام از عملکردهای ذکر شده بر میزان آب مصرفی در هکتار تعیین گردید.

یافته‌ها

کارایی مصرف آب در تیمار آبیاری تکمیلی

کل آب مورد نیاز در طول دوره رشد گیاه استویا برای همه تیمارها در سال اول و دوم کشت در محیط گلخانه به ترتیب شامل صفر میلی متر بارندگی و ۲۰۲۳/۷ و ۱۷۴۷/۵ میلی متر نیاز آبی بود. در محیط مزرعه تحقیقاتی نیز به ترتیب شامل ۲۶۷/۴ و ۱۵۵/۴ میلی‌متر بارندگی و ۱۸۲۴/۴ و ۱۶۸۵/۵ میلی‌متر نیاز آبی بود. نتایج عملکرد برگ و قند و کارایی مصرف آب (بر اساس عملکرد برگ و قند) برای سطوح مختلف اعمال تیمار (بدون آبیاری تکمیلی، تک آبیاری در زمان گل‌دهی، دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی) بر اساس آزمون دانکن در جدول (۴) آمده است. متوسط نتایج دو ساله طرح نشان می‌دهد که بیش‌ترین و کم‌ترین عملکرد برگ در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی به ترتیب (۲۶۰/۸ ۳۶۷/۸) و (۳۳۷/۲ و ۲۳۵/۴) کیلوگرم بر هکتار و عملکرد قند در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی به ترتیب (۸۱/۳ و ۴۱/۹) و (۷۰/۲ و ۳۰/۸) و کیلوگرم بر هکتار به ترتیب برای تیمارهای دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی و بدون آبیاری تکمیلی بودند. با توجه به دو سال کشت استویا بیش‌ترین و کم‌ترین کارایی مصرف آب در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی برای تیمارهای دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی و بدون آبیاری تکمیلی بر اساس عملکرد برگ (۰/۹۸ و ۰/۶۹) و (۰/۹۶ و ۰/۶۷) و عملکرد قند به ترتیب (۰/۶۵ و ۰/۳۳) و (۰/۶۰ و ۰/۲۶) کیلوگرم بر هکتار بر میلی‌متر ، بدست آمد (جدول ۴).

در این تحقیق، اعمال تیمارهای مختلف بر روی کارایی مصرف آب در سطح احتمال ($P < 0/01$) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده، دلالت بر تفاوت‌های معنی داری در بین تیمارهای اعمال شده داشت. با توجه به نتایج بدست آمده کم‌ترین کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد

برگ و قند مربوط به تیماری بدون آبیاری تکمیلی بود. این امر منجر به کاهش مصرف آب سطحی توسط گیاه بدون اثر افزایش در عملکرد برگ و قند گردیده است. بنابراین کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد برگ و قند کاهش پیدا کرده است. نتایج بدست آمده نشانگر آن است که تیمار با دو آبیاری تکمیلی در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی دارای بیش‌ترین کارایی مصرف آب از لحاظ عملکرد برگ و قند نسبت به سایر تیمارها بوده است.

نتایج بدست آمده در گلخانه نشان می‌دهند که تیمار تک آبیاری در زمان گل‌دهی و تیمار بدون آبیاری تکمیلی نسبت به تیمار دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی (تیمار شاهد) به ترتیب باعث کاهشی به میزان (۲۰/۹ و ۳۳/۶) درصد و (۲۹/۳ و ۴۸/۵) درصد در مقدار عملکرد برگ و قند گردیده اند. در محیط مزرعه تحقیقاتی نیز نتایج نشانگر آن است که تیمار تک آبیاری در زمان گل‌دهی و تیمار بدون آبیاری تکمیلی نسبت به تیمار دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی (تیمار شاهد) به ترتیب باعث کاهشی به میزان (۲۲/۹ و ۳۶/۸) درصد و (۳۰/۲ و ۵۶/۲) درصد در مقدار عملکرد برگ و قند شده اند.

جدول ۴. تاثیر تیمارهای آزمایش بر روی عملکرد برگ و قند و کارایی مصرف آب

محیط کشت	سال	تیمار	عملکرد	عملکرد	کل آب	کارایی مصرف آب بر	کارایی مصرف آب بر
			برگ	قند	مصرفی	اساس عملکرد برگ	اساس عملکرد قند
			(Kg/ha)	(Kg/ha)	(mm)	(Kg/ha/mm)	(Kg/ha/mm)
گلخانه	۱۳۹۵	دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی	۳۵۱/۲ab	۷۳/۸b		۰/۹۳ab	۰/۵۹b
		یک آبیاری در زمان گل‌دهی	۲۷۶/۶bc	۴۹/۸c	۲۰۲۳/۷	۰/۷۳c	۰/۴۰c
		بدون آبیاری تکمیلی	۲۴۲/۴d	۳۶/۴d		۰/۶۴d	۰/۲۹e
	۱۳۹۶	دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی	۳۸۴/۴a	۸۸/۹a		۱/۰۲a	۰/۷۱a
		یک آبیاری در زمان گل‌دهی	۳۰۶/۵b	۵۸/۲bc	۱۷۴۷/۵	۰/۸۱b	۰/۴۶bc
		بدون آبیاری تکمیلی	۲۷۹/۲c	۴۷/۵cd		۰/۷۴cd	۰/۳۸d
مزرعه	۱۳۹۵	دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی	۳۱۹/۰b	۶۲/۲ab		۰/۹۱ab	۰/۵۳ab
		یک آبیاری در زمان گل‌دهی	۲۴۲/۵c	۳۸/۸bc	۱۸۲۴/۴	۰/۶۹c	۰/۳۳bc
		بدون آبیاری تکمیلی	۲۱۶/۸d	۲۶/۱d		۰/۶۲d	۰/۲۲d
	۱۳۹۶	دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی	۳۵۵/۵a	۷۸/۲a		۱/۰۱a	۰/۶۷a
		یک آبیاری در زمان گل‌دهی	۲۷۷/۸bc	۵۰/۱b	۱۶۸۵/۵	۰/۷۹b	۰/۴۳b
		بدون آبیاری تکمیلی	۲۵۴/۱cd	۳۵/۶c		۰/۷۲cd	۰/۳۰c

اجزای عملکرد استویا در تیمار آبیاری تکمیلی

برای سطوح مختلف تیمارهای آبیاری در نظر گرفته شده، همه پارامترهای اصلی گیاه استویا در پایان فصل رشد اندازه‌گیری شد و توسط آزمون دانکن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت که نتایج در جدول (۵) آمده است. نتایج این تحقیق برای تاثیر سطوح مختلف تیمارهای آبیاری در سطح احتمال (P < ۰/۰۱) بر روی خصوصیات مورفولوژیکی اصلی گیاه نظیر عمق ریشه، ارتفاع بوته، وزن ۱۰۰ عدد برگ، تعداد برگ‌ها در یک بوته، تعداد شاخه‌های فرعی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج مندرج در جدول (۵) اثر سطوح مختلف تیمارهای آبیاری بر روی طول ریشه گیاه در سطح ۱٪ اثر معنی دار بوده است. نتایج دو ساله طرح در جدول (۵) نشانگر آن است که بیش‌ترین و کم‌ترین متوسط طول ریشه مربوط به تیمارهای دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی و بدون آبیاری تکمیلی است که در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی به ترتیب برابر با (۱۴۰ و ۱۰۳/۵) سانتیمتر است. با توجه به نتایج دو ساله مندرج در جدول (۵)، اثر سطوح مختلف تیمارهای آبیاری بر روی ارتفاع بوته در سطح ۱٪ اثر معنی داری داشته است. به طور متوسط و در طی دو سال کشت استویا بیش‌ترین و کم‌ترین متوسط ارتفاع گیاه مربوط به تیمار دو

آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی و بدون آبیاری تکمیلی بوده که در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی به ترتیب برابر (۱۱۳ و ۶۵/۵) و (۱۰۲/۵ و ۵۶) سانتیمتر بدست آمده است.

نتایج مندرج در جدول (۵) همچنین نشان‌دهنده آن است که اثر سطوح مختلف تیمارهای آبیاری بر روی وزن ۱۰۰ عدد برگ برداشتی از گیاه در سطح ۱٪ معنی‌دار بوده است. اندازه‌گیری‌ها در طول دو سال کشت نشان می‌دهند که کم‌ترین و بیش‌ترین وزن ۱۰۰ عدد برگ برداشتی مربوط به تیمارهای بدون آبیاری تکمیلی و دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی است که در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی به ترتیب برابر (۱۸۳/۹ و ۱۳۲/۹) و (۱۱۷/۷ و ۱۶۸/۶) گرم بوده است. ضمناً اثر سطوح مختلف آبیاری بر روی تعداد برگ‌ها در یک بوته نیز در سطح ۱٪ معنی‌دار بوده است. با توجه به داده‌های دو ساله بیش‌ترین و کم‌ترین تعداد برگ‌ها در یک بوته مربوط به تیمارهای دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی و بدون آبیاری تکمیلی است که در گلخانه و مزرعه تحقیقاتی به ترتیب برابر با (۵۹ و ۳۹/۵) و (۴۷ و ۳۲/۵) بدست آمده است. با توجه به داده‌های دو ساله بیش‌ترین و کم‌ترین تعداد شاخه‌های فرعی در یک بوته نیز مربوط به تیمارهای دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی و بدون آبیاری تکمیلی است که در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی به ترتیب برابر با (۱۶ و ۱۰) و (۱۱ و ۶/۵) است.

جدول ۵. تاثیر تیمارهای مختلف بر روی پارامترهای گیاهی

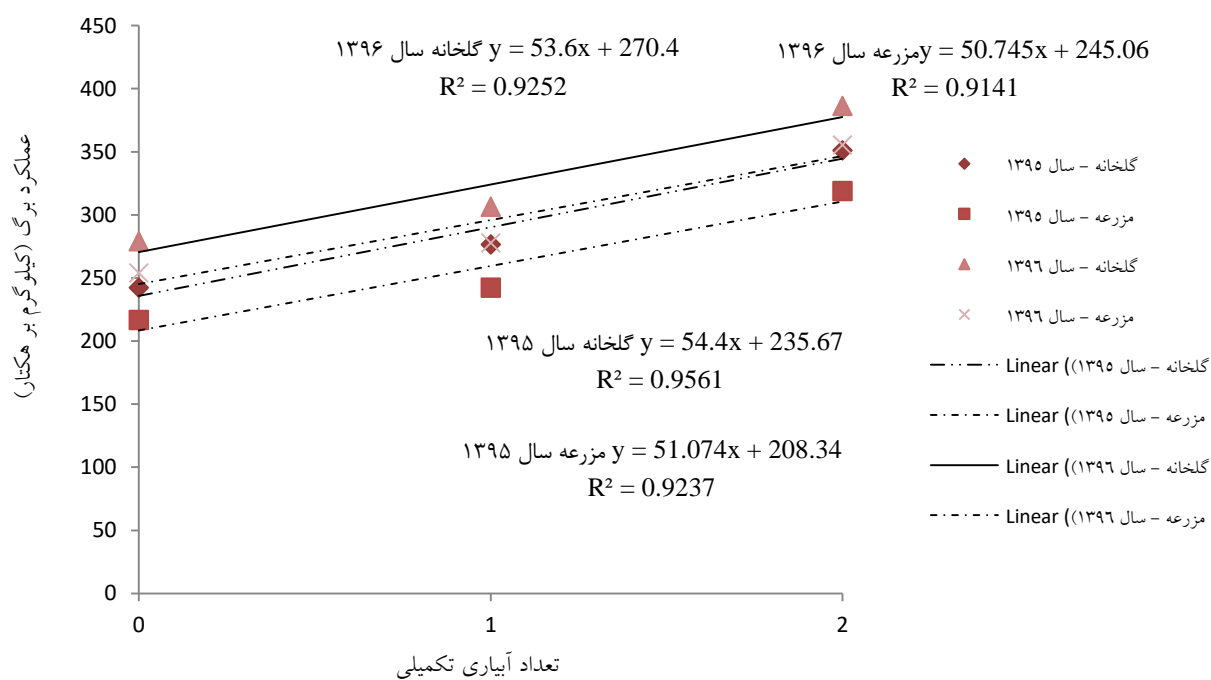
محیط کشت	سال	تیمار	طول ریشه (cm)	ارتفاع بوته (cm)	وزن ۱۰۰ برگ (gram)	تعداد شاخه‌های فرعی	تعداد برگ‌ها در یک بوته
گلخانه	۱۳۹۵	دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی	۱۳۷ ab	۱۰۱ b	۱۷۲/۵ b	۱۵ ab	۵۳ ab
		یک آبیاری در زمان گل‌دهی	۱۱۷ c	۷۲ c	۱۴۰/۲ c	۱۲ c	۴۲ c
		بدون آبیاری تکمیلی	۹۵ d	۶۱ e	۱۲۳/۵ e	۹ d	۳۶ e
	۱۳۹۶	دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی	۱۴۳ a	۱۲۵ a	۱۹۵/۲ a	۱۷ a	۶۵ a
		یک آبیاری در زمان گل‌دهی	۱۳۲ b	۹۶ bc	۱۵۳/۶ bc	۱۴ b	۵۱ b
		بدون آبیاری تکمیلی	۱۱۲ cd	۷۰ d	۱۴۲/۳ d	۱۱ cd	۴۳ d
مزرعه	۱۳۹۵	دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی	۱۲۹ ab	۹۰ ab	۱۵۹/۵ ab	۱۰ ab	۴۲ b
		یک آبیاری در زمان گل‌دهی	۱۰۳ c	۶۳ c	۱۲۱/۲ c	۹ b	۳۳ c
		بدون آبیاری تکمیلی	۸۹ e	۴۹ d	۱۰۸/۴ d	۷ c	۲۶ d
	۱۳۹۶	دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی	۱۳۵ a	۱۱۵ a	۱۷۷/۸ a	۱۲ a	۵۲ a
		یک آبیاری در زمان گل‌دهی	۱۲۵ b	۹۰ b	۱۳۸/۹ b	۱۰ ab	۴۵ ab
		بدون آبیاری تکمیلی	۱۰۰ de	۶۳ c	۱۲۷/۰ cd	۶ bc	۳۹ bc

آستانه تحمل گیاه استویا در آبیاری تکمیلی

برای بدست آوردن آستانه تحمل گیاه استویا به تیمارهای آبیاری تکمیلی (بدون آبیاری تکمیلی، تک آبیاری در زمان گل‌دهی، دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی) ابتدا درصد عملکرد برگ و قند را در تیمارهای مورد بررسی در این پژوهش نسبت به تیمار شاهد (تیماری با دو آبیاری تکمیلی در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی) اندازه‌گیری و محاسبه شد. نتایج این مقایسات در جدول (۶) ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در جدول (۶) و شکل ۱ داده‌های حاصل از دو سال تحقیق بیش‌ترین و کم‌ترین درصد عملکرد برگ در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی نسبت به تیمار شاهد به ترتیب (۵۴/۴ و ۵۱/۱) و (۵۳/۶ و ۵۰/۸) است که متعلق به تیمارهایی با دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی و بدون آبیاری تکمیلی است.

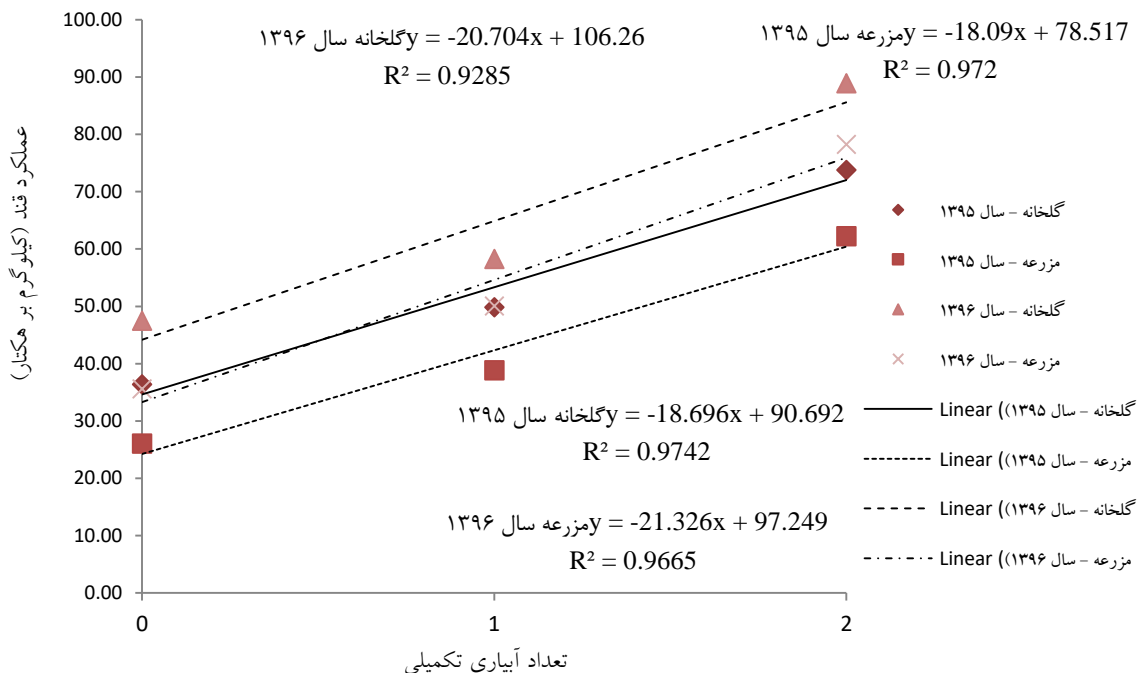
جدول ۶. درصد عملکرد برگ و قند نسبت به تیمار شاهد

محیط کشت	سال	تیمار	عملکرد	درصد عملکرد برگ	عملکرد قند	درصد عملکرد قند
			برگ (Kg/ha)	نسبت به تیمار شاهد (%)	(Kg/ha)	نسبت به تیمار شاهد (%)
گلخانه	۱۳۹۵	دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی	۳۵۱/۲	۱۰۰	۷۳/۸	۱۰۰
		یک آبیاری در زمان گل‌دهی	۲۷۶/۶	۷۸/۸	۴۹/۸	۶۷/۵
		بدون آبیاری تکمیلی	۲۴۲/۴	۶۹/۱	۳۶/۴	۴۹/۳
	۱۳۹۶	دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی	۳۸۴/۴	۱۰۰	۸۸/۹	۱۰۰
		یک آبیاری در زمان گل‌دهی	۳۰۶/۵	۷۹/۳	۵۸/۲	۶۵/۵
		بدون آبیاری تکمیلی	۲۷۹/۲	۷۲/۳	۴۷/۵	۵۳/۴
مزرعه	۱۳۹۵	دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی	۳۱۹/۰	۱۰۰	۶۲/۲	۱۰۰
		یک آبیاری در زمان گل‌دهی	۲۴۲/۵	۷۶/۱	۳۸/۸	۶۲/۴
		بدون آبیاری تکمیلی	۲۱۶/۸	۶۸/۰	۲۶/۱	۴۱/۹
	۱۳۹۶	دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی	۳۵۵/۵	۱۰۰	۷۸/۲	۱۰۰
		یک آبیاری در زمان گل‌دهی	۲۷۷/۸	۷۸/۲	۵۰/۱	۶۴/۰
		بدون آبیاری تکمیلی	۲۵۴/۱	۷۱/۵	۳۵/۶	۴۵/۵



شکل ۱. ارتباط بین عملکرد برگ و تیمار آبیاری تکمیلی در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی

با توجه به شکل (۲) آستانه تحمل گیاه استویا به آبیاری تکمیلی یا عدم آبیاری تکمیلی برای جلوگیری از کاهش عملکرد قند در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی به ترتیب حدود (۱۸/۷ و ۱۸/۱) و (۲۱/۴ و ۲۰/۷) برابر آبیاری تکمیلی در سال اول و دوم کشت است.



شکل ۲. ارتباط بین عملکرد قند و تیمار آبیاری تکمیلی در محیط گلخانه و مزرعه تحقیقاتی

بررسی‌های مختلف نشانگر آن است که در مطالعه بنه‌میمومو همکاران (۲۰۱۷) نیز عملکرد برگ خشک برابر ۲۴،۷۹، ۲۰،۳۶ و ۱۱،۴۴ گرم در هر بوته گیاه در سطوح آبیاری ۱۰۰٪، ۸۰٪ و ۵۰٪ بوده است، یعنی عملکرد برگ خشک با کاهش آبیاری کاهش پیدا نموده است. ضمناً عملکرد برگ در تحقیقات پارایس و همکاران (۲۰۱۶) نسبت به تیمارهای بیشتری از آبیاری بررسی شده است که موید نتایج مطالعه کنونی است. در آن مطالعه عملکرد خشک برگ در سطوح آبیاری ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ کیلوپاسکال گیاه استویا اندازه‌گیری شد که به ترتیب برابر ۵،۶۸، ۵،۲۵، ۴،۶۳، ۴،۷۶ و ۴،۲۵ تن در هکتار گزارش شده است. در این مطالعه به غیر از تیمار ۶۰ کیلوپاسکال مکش آبیاری که نشان دهنده مقدار کمی افزایش در عملکرد برگ خشک بوده است بقیه نتایج نمایانگر رابطه مستقیم میزان آبیاری و عملکرد برگ خشک بوده که تایید کننده نتایج این پژوهش است. همچنین بر اساس نتایج ارائه شده توسط پارایس و همکاران (۲۰۱۷)، رابطه بین میزان کل گلیکوزید استویول با سطوح مختلف آبیاری نیز مستقیم است. به طوری که در تیمارهای آبیاری ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ کیلوپاسکال، مقدار آن به ترتیب برابر با ۸۹۸، ۸۵۵، ۷۰۰، ۶۳۴ و ۵۷۹ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است که هماهنگ و موید نتایج تحقیق بدست آمده در این تحقیق است.

ضمناً نتایج تحقیق قمرنیا و همکاران (۱۳۹۹) نشان داده است که سطوح مختلف کم‌آبیاری ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد بر روی کارایی مصرف آب تفاوت معنی داری در سطح یک درصد داشته است. بطوری که سطوح آبیاری ۴۰ و ۱۰۰ درصد به ترتیب دارای کم‌ترین و بیش‌ترین کارایی مصرف آب از لحاظ عملکرد برگ و قند نسبت به سایر تیمارها بوده‌اند. همچنین نتایج منتشر شده آن‌ها نشانگر آن است که تمامی پارامترهای مختلف گیاه استویا با افزایش درصد کم‌آبیاری به صورت معنی داری کاهش پیدا نموده‌اند.

¹ Parris et al

نتایج تحقیقات کریمی و همکاران (۲۰۱۵) در رابطه با اثرات تنش خشکی بر روی گیاه استویا نشانگر این موضوع بود که کاهش آب خاک به میزان ۶۰ درصد ظرفیت زراعی بر روی رشد گیاه و وزن خشک برگ استویا آنچنان اثرات منفی معنی داری نداشته است. اما کاهش چشم‌گیری بر روی پارامترهای ذکر شده در ۴۵ درصد سطح رطوبت زراعی نمایان گردید.

بحث

ایران با متوسط ریزش‌های آسمانی ۲۲۰ میلی‌متر در سال، در زمره مناطق خشک و نیمه خشک جهان طبقه بندی می‌شود که با بحران آب روبرو است. از آن جا که منابع آبی با کیفیت مطلوب برای آبیاری محصولات در جهان محدود است، لذا استفاده از روش‌های کمک کننده نظیر آبیاری تکمیلی (جهت تامین نیاز آبی گیاه در طول دوره رشد و افزایش عملکرد) امری ضروری است. گیاه استویا به عنوان گیاهی با اثرات دارویی و ضد دیابت، بومی منطقه کوهستانی آمامبی واقع در مرز برزیل و پاراگوئه است که در ایران در شیراز و اصفهان به صورت انبوه کشت می‌شود. گلیکوزیدهای دیترنی موجود در این گیاه (عامل اصلی ایجاد طعم بسیار شیرین در عصاره‌های گیاه) تا ۳۰۰ برابر شیرین تر از شکر می‌باشند که در صنایع دارویی و غذایی کاربرد دارند. پژوهش حاضر به منظور بررسی تاثیر آبیاری تکمیلی بر عملکرد محصول استویا در مزرعه تحقیقاتی و محیط گلخانه صورت گرفت. برای نیل به این هدف، آزمایش در حالت‌های بدون آبیاری تکمیلی، تک آبیاری در زمان گل‌دهی و دو آبیاری در زمان‌های گل‌دهی و دانه‌دهی انجام پذیرفت.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر آن است که آبیاری تکمیلی نقش موثری در افزایش میزان عملکرد برگ و قند گیاه استویا دارد. در بین تیمارهای مختلفی که برای آبیاری تکمیلی در نظر گرفته شد، دو آبیاری تکمیلی در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی گیاه دارای بهترین نتایج عملکرد بوده است که بیانگر نیاز آبی بیشتر گیاه با توجه به خصوصیات فیزیولوژیکی آن در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی است. این میزان حدود ۵۳/۶ درصد افزایش عملکرد برگ و قند در محیط مزرعه و ۵۴/۴ درصد افزایش عملکرد در محیط گلخانه نسبت به تیمار شاهد داشت. برآیند آزمایشات نشان داد که آستانه تحمل استویا نسبت به آبیاری تکمیلی و یا عدم آن برای جلوگیری از کاهش عملکرد قند در محیط گلخانه مزرعه و تحقیقاتی و به ترتیب حدود (۲۰/۷ و ۲۱/۴) و (۱۸/۷ و ۱۸/۱) برابر آبیاری تکمیلی در سال اول و دوم کشت می‌باشد.

در این تحقیق همچنین اثر تیمارهای مختلف آبیاری بیان شده، بر روی خصوصیات مورفولوژیک گیاه استویا نیز ارزیابی شد و مشخص گردید که سطوح مختلف آبیاری تاثیر معنی داری بر روی این خصوصیات داشته است. یافته‌ها حاکی از آن بود که تیمار دو آبیاری در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی گیاه موثرترین نتیجه در افزایش طول ریشه، ارتفاع گیاه، وزن برگ، تعداد شاخه‌های فرعی و تعداد برگ را داشته است. به عنوان مثال طول ریشه در تیمار دو آبیاری تکمیلی در محیط مزرعه ۱۳۲ سانتی‌متر است، در حالیکه بدون آبیاری تکمیلی فقط ۹۴/۵ سانتی‌متر بوده است. همچنین تعداد برگ در یک بوته استویا در تیمار دو آبیاری تکمیلی ۴۷ عدد در مقابل ۳۲/۵ عدد در حالت بدون آبیاری تکمیلی به دست آمده است. این بدین معنی است که آبیاری تکمیلی نقش به سزائی در توسعه و تکمیل رشد قسمت‌های مختلف اندام‌های گیاه استویا داشته است. با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق برای گیاه استویا، دو آبیاری تکمیلی در زمان گل‌دهی و دانه‌دهی برای افزایش کلیه عملکردها توصیه می‌شود.

منابع

- آذریور، ابراهیم، معتمد، محمدکریم، و بزرگی، حمیدرضا. (۱۳۹۲). زراعت و ترویج استویا (گیاهشناسی، کاشت، داشت، برداشت، شیمی، صنعت و فرآوری). تالیف دانشگاه آزاد اسلامی لاهیجان.
- جلیلی، زهرا، قمرنیا، هوشنگ، و کهریزی، دانیال. (۱۳۹۷). بررسی تاثیر آب زیرزمینی کم عمق و شور بر عملکرد گیاه استویا. مجله مدیریت آب و آبیاری، ۸(۲)، ۱۹۳-۲۰۹. <https://dx.doi.org/10.22059/jwim.2018.264526.630>
- جلیلی، زهرا، قمرنیا، هوشنگ، و کهریزی، دانیال. (۱۳۹۸). برآورد آب مورد نیاز و ضرایب گیاهی استویا (*Stevia rebaudiana Bertoni*) در اقلیم نیمه‌خشک در شرایط لایسیمتری. مجله علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۳۳(۳)، ۵۲-۳۷. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.24763594.1398.23.3.1.1>
- خیرابی، جمشید، توکلی، علیرضا، انتصاری، محمدرضا، و سلامت، علیرضا. (۱۳۹۶). معرفی جهات نظری و کاربردی روش پنمن مانیتینگ و ارائه تبخیر تعرق مرجع استاندارد برای ایران. گروه کار آب مورد نیاز گیاهان و مدیریت محصولات زراعی، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۱۶-۷۶. <https://www.sid.ir/paper/448553/fa>
- قمرنیا، هوشنگ، جلیلی، ز، و رضوانی، سید وحیدالدین. (۱۳۹۹). بررسی سطوح مختلف کم‌آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب گیاه استویا (*Stevia rebaudiana Bertoni*) در محیط‌های گلخانه و مزرعه. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۱۲)، ۳۱۱۵-۳۱۲۵. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2020.308735.668716>

References

- Alizadeh, M., Azizi-Lalabadi, M., Ansari, H., & Kheirouri, S. (2014). Effect of stevia as a substitute for sugar on physicochemical and sensory properties of fruit-based milk shake. *Journal of Research and Reports*, 3(11), 1421-1429. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2014/8623>
- Aslan, G.E., Karaca, C., Kurunc, A., & Kaman, H. (2017). Effects on water stress on daily stomatal conductivity of *Stevia rebaudiana*. *International Journal of Plant & Soil Science*, 19(4), 1-8. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2017/36999>
- Azarpour, I., Motamed, M.K., & Bozorgi, H.R. (2018). Cultivation and promotion of stevia (botany, planting, holding, harvesting, chemistry, industry and processing). Compiled by Lahijan Islamic Azad University. [Persian]
- Benhmimou, A., Mohammed, I., Chaouki, A.F., Ahmed, D., Abdelkarim, K., Fatima, Z.A., & Mounira, L. (2017). Productivity of new sweet plant in Morocco (*Stevia rebaudiana Bertoni*) under water stress. *Journal of medical plants studies*, 5(5), 126-131. <https://www.plantsjournal.com/archives/2017/vol5issue5/PartB/5-4-51-121.pdf>
- Jalili, Z., Ghamarnia, H., Kahrizy, D. (2018). Investigating on the effect of shallow saline groundwater on the *Stevia* yield. *Water and Irrigation Management*, 8(2), 193-209. <https://dx.doi.org/10.22059/jwim.2018.264526.630> [Persian]
- Jalili, Z., Ghamarnia, H., & Kahrizy, D. (2019). Estimation of water requirements and plant coefficients of stevia in semi-arid climate and lysimetric conditions. *Journal of Soil and Water Sciences (Agricultural Science and Technology and Natural Resources)*, 23(3), 37-52. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.24763594.1398.23.3.1.1> [Persian]
- Karimi, M., Ahmadi, A., Hashemi, J., Abbasi, A., Tavarini, S., Pompeiano, A., Guglielminetti, L., & Angelini, L.G. (2019). Plant growth retardants (PGRs) affect growth and secondary metabolite biosynthesis in *Stevia rebaudiana Bertoni* under drought stress. *South African Journal of Botany*, 121, 394-401. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.11.028>

- Kheirabi, J., Tavakoli, A., Entesari, M.R., & Salamat, A. (2017). Introduction of theoretical and practical aspects of Penman-Montith method and presentation of standard reference transpiration evaporation for Iran. Working group on water requirements for plants and crop management. National Committee for Irrigation and Drainage of Iran, 16-76. <https://www.sid.ir/paper/448553> [Persian]
- Mahajan, M., Babit, K., Thakur, P., & Kumar, P. (2021). Moisture stress and nitrogen availability modulate the secondary metabolite profiles, enzymatic activity, and physiological and agronomic traits of *Stevia rebaudiana*. *Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, 1(62), 56-68. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.018>
- Nielsen, S. (2017). Total Carbohydrate by Phenol- Sulfuric Acid Method. In *Food Analysis Laboratory Manual*, 137-141. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-44127-6_14
- Parris, C.A., Shock, C.C., & Qian, M. (2016). Dry Leaf and Steviol Glycoside Productivity of *Stevia rebaudiana* in the Western United States. *The American Society for Horticultural Science*, 51(10), 1220-1227. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11149-16>
- Parris, C.A., Shock, C.C., & Qian, M. (2017). Soil Water Tension Irrigation Criteria Affects *Stevia rebaudiana* Leaf Yield and Leaf Steviol Glycoside Composition. *HortScience horts*, 52(1), 154-161. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11352-16>
- Ghamarnia, H., Jalili, Z., & Rezvani, S.V. (2020). Investigation of different levels of low irrigation on the yield and water use efficiency of stevia, in greenhouses and farms. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(12), 3115-3125. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2020.308735.668716> [Persian]



Effects of deficit irrigation on, quantity, quality characteristics and water productivity in Grain Maize (KSC 706) in Kermanshah

Meisam Palash¹ , Ali Bafkar^{2✉} , Bahman Farhadi Bansouleh³ , Mokhtar Ghobadi⁴

¹ M. Sc graduated of irrigation and drainage, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: meisampalash1371@gmail.com

² Corresponding Author, Assistant professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: alibafkar@yahoo.com

³ Assistant professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: bfarhadi2001@yahoo.com

⁴ Associate Professor, Department of Plant Production Engineering and Genetics, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: ghobadi.m@razi.ac.ir

ABSTRACT

Introduction

Maize is one of the most important crops that in addition to food supply and livestock products, plays an important role in creating employment in the agricultural, industrial and commercial sectors. Maize ranks third in the world in terms of area under cultivation (after wheat and rice) and second in terms of yield (after sugarcane). It is also a rich source of oil and protein, which provides between 8% to 15% of the protein needed by the world. Despite the severe limitation of water resources and the occurrence of frequent droughts, this plant, which also needs a lot of water, is cultivated in most parts of Iran. Since the price of water and energy in Iran is not significant, farmers cultivate crops outside the appropriate cropping pattern of the region.

Methodology

This study was conducted to investigate the effects of deficit irrigation on quantitative and qualitative characteristics and water use efficiency of grain maize (KSC 706 cultivar) in Kermanshah, in 2017 in a randomized complete block design with four irrigation treatments (100, 120, 80, and 60% of field capacity) and three replications were designed and applied by furrow irrigation method. Due to the lack of rainfall at the time of the study, the net irrigation requirement of the control treatment was calculated by adding the values of daily evapotranspiration between the two irrigations. According to the controlled conditions of the study and the short length of furrows, irrigation efficiency was assumed to be 90%, and based on this, the gross irrigation requirement of the control treatment was calculated. The irrigation requirement of other treatments was defined as a coefficient of irrigation requirement of the control treatment. The reason for choosing over-irrigation treatment was insufficient uncertainty about the method of irrigation requirement calculation (FAO-Penman-Monteith equation) in the study area. Irrigation was performed as a closed-end furrow with a 7-day irrigation cycle using a volume meter.

Results and Discussion

Results indicated significant effects of deficit-irrigation on crop yield (grain and biomass), leaf area index, harvest index, canopy cover, seed oil content, the weight of plant organs (stem, leaf, and ear), number of seeds per ear, ear length, and water use efficiency in terms of grain, biomass, and fat. The effect of water stress on maize characteristics was different during the various stages of the growth period. The effect of water stress was greater at the end of the growth period (grain filling stage). Treatment of 40% deficit-irrigation with 3631 kg/ha, 12143 kg/ha, 216.66 g, and 288 g, respectively, grain yield, biomass yield, 1000-seed weight, and the number of grains per ear reduced 69, 49, 11, and 21% respectively compared to the control treatment. The maximum crop water productivity in terms of grain, biomass, and fat were 1.15, 2.74, and 0.0488 kg/ha, respectively was observed in over-irrigation treatment. According to the results of this study, the application of deficit irrigation on maize (cultivar of KSC 706) is not recommended in Kermanshah.

Conclusion

The sensitivity of grain maize to water stress is less in the early stages of the growing season and gradually increases from the middle of the growing season and reaches its maximum at the time of pollination and seed formation. Therefore, in this region, deficit irrigation strategy can be recommended with caution at the beginning of its growth period (vegetative growth stage) only to use maize biomass. In this study, although water stress increased the quality of corn grain by affecting its oil percentage, but did not increase the overall oil yield. According to the crop water productivity index (in terms of grain, biomass, and seed oil), it can be said that deficit irrigation has reduced this index and the maximum amount of this index was allocated to over-irrigation treatment.

Keywords: Maize, deficit irrigation, Water Productivity, Biomass, fat

Article Type: Research Article

Article history: Received 13 July 2021 Revised: 27 August 2021 Accepted: 23 September 2021 ePublished: 29 May 2022

Cite this article: Palash, M., Bafkar, A., Farhadi Bansouleh, B., & Ghobadi, M. (2022). Effects of deficit irrigation on, quantity, quality characteristics and water productivity in Grain Maize (KSC 706) in Kermanshah, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(1), 16-37. DOI: 10.22126/ATWE.2021.6686.1003





بررسی اثرات کم آبیاری بر خصوصیات کمی، کیفی و بهره وری آب در ذرت دانه ای رقم سینگل کراس ۷۰۶ در کرمانشاه

میثم پالاش^۱ ID، علی بافکار^۲ ID، بهمن فرهادی بانسوله^۳ ID، مختار قبادی^۴ ID

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: meisampalash1371@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: alibafkar@yahoo.com

^۳ استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: bfarhadi2001@yahoo.com

^۴ دانشیار گروه مهندسی ژنتیک و تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: ghobadi.m@razi.ac.ir

چکیده

این مطالعه جهت بررسی اثرات کم آبیاری بر روند رشد، خصوصیات کمی، کیفی و کارایی مصرف آب ذرت دانه ای در کرمانشاه، در فصل زراعی ۱۳۹۶ در قالب طرح بلوک کامل تصادفی و با چهار تیمار (۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه) و سه تکرار طراحی و به روش آبیاری جویچه ای انجام شد. نتایج نشان داد اثرات کم آبیاری بر عملکرد دانه، زیست توده، شاخص سطح برگ، شاخص برداشت، تاج پوشش گیاهی، عملکرد روغن دانه، وزن خشک ساقه، وزن خشک برگ، وزن خشک بلال، تعداد دانه در بلال، طول بلال، بهره وری مصرف آب نسبت به دانه، بهره وری مصرف آب نسبت به زیست توده و بهره وری مصرف آب نسبت به چربی معنی دار بود. میزان تأثیر تنش آبی بر خصوصیات ذرت در بازه های زمانی مختلف دوره رشد آن متفاوت بود و در اواخر دوره رشد (مرحله پر شدن دانه) تأثیر تنش آبی بیشتر بود به طوری که اعمال تنش ۴۰ درصد کم آبی در صفات عملکرد دانه، عملکرد زیست توده، وزن هزار دانه و تعداد دانه در بلال به ترتیب با مقادیر ۳۶۳۱ کیلوگرم، ۱۲۱۴۳ کیلوگرم، ۲۱۱/۶۶ گرم و ۲۸۸ عدد باعث کاهش ۴۹، ۶۹، ۱۱ و ۲۱ درصدی نسبت به تیمار شاهد گردید. مقدار بیشینه کارایی مصرف آب نسبت به عملکرد دانه، زیست توده و چربی در تیمار بیش آبیاری به ترتیب معادل ۱/۱۵، ۲/۷۴ و ۰/۰۵۴۸ کیلوگرم بر هکتار به دست آمدند. لذا، کم آبیاری ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۶ در کرمانشاه توصیه نمی شود.

واژه های کلیدی: ذرت دانه ای، کم آبیاری، کارایی آب، زیست توده، چربی

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۲ تیر ۱۴۰۰ اصلاح: ۰۵ شهریور ۱۴۰۰ پذیرش: ۰۱ مهر ۱۴۰۰ چاپ الکترونیکی: ۰۸ خرداد ۱۴۰۱

استناد: پالاش، م، بافکار، ع، فرهادی بانسوله، ب و قبادی، م (۱۴۰۱). بررسی اثرات کم آبیاری بر خصوصیات کمی، کیفی و بهره وری آب در ذرت دانه ای رقم سینگل کراس ۷۰۶ در کرمانشاه، فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۲(۱)، ۳۷-۱۶، شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2021.6686.1003



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

ذرت از مهم‌ترین محصولات کشاورزی است که علاوه بر تأمین مواد غذایی و فرآورده‌های دامی، در اشتغال‌زائی بخش‌های کشاورزی، صنعت و بازرگانی نقش مهمی ایفا می‌کند (صابری و همکاران، ۱۳۸۵). از لحاظ سطح زیر کشت در بین گیاهان زراعی دنیا، ذرت پس از گندم و برنج مقام سوم و از نظر میزان عملکرد، بعد از نیشکر مقام دوم را به خود اختصاص داده است. همچنین این گیاه منبع غنی از روغن و پروتئین است که بین ۸ تا ۱۵ درصد پروتئین مورد نیاز دنیا را تأمین می‌نماید (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۸). به دلیل حساس بودن گیاه ذرت به کم‌آبی (کاکیر؛ ۲۰۰۴)، یکی از مهم‌ترین مشکلات زارعین در مناطق خشک و نیمه‌خشک، فراهم ساختن شرایط مطلوب خصوصاً تأمین آب کافی در طول دوره رشد است (رشیدی و رضا دوست، ۱۳۸۴). خشکی، خطر جدی برای تولید موفقیت‌آمیز محصولات زراعی در سرتاسر جهان است. طبق آمار موجود، مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان تقریباً ۴۴/۷ میلیون کیلومتر مربع را شامل می‌شوند که حدود ۳۹ درصد (۱۷/۴ میلیون کیلومتر مربع) آن به مناطق نیمه‌خشک اختصاص دارد. تقریباً حدود ۹۰ درصد مناطق خشک جهان در ۲۷ کشور از جمله ایران قرار دارد (محمدی ده بالایی، ۲۰۱۳). ایران کشوری است که متوسط بارندگی آن حدود یک‌سوم متوسط بارش جهانی است و از نظر منابع آب به شدت در تنگنا است. ظهور ناکافی گیاهچه‌ها و استقرار نامناسب، از عوامل محدود کننده رشد و عملکرد گیاهان به‌ویژه در مناطق با بارندگی کم است (ناوات و همکاران؛ ۲۰۱۳). لذا بهبود کارایی مصرف آب مبتنی بر تولید بیش‌تر در بخش کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (هوگنوم و همکاران؛ ۲۰۰۴). تنش‌های خشکی و محدودیت‌های آبی یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده تولید محصولات کشاورزی است. به طوری که وقوع تنش‌های کم‌آبی در مراحل مختلف رشد گیاه سبب اختلال در مراحل رشد و نمو گیاه می‌گردد (اسکندری و کاظمی، ۲۰۱۹). تنش کم‌آبی بر اجزای عملکرد به‌ویژه تعداد مخازن تشکیل شده در گیاه یا دانه‌ها اثرات منفی شدیدی دارد و باعث کاهش تعداد آن‌ها می‌شود (فرجام و همکاران، ۲۰۱۴). تنش کم‌آبی کارایی مصرف آب را کاهش می‌دهد (الکایسی و همکاران؛ ۲۰۰۳). مقدار خسارت حاصل از تنش‌های خشکی به گونه زراعی، شدت تنش و مراحل رشد وقوع تنش در گیاهان دارد (جیان یانگ و همکاران؛ ۲۰۱۷). حساس‌ترین مراحل رشد گیاهان به تنش‌های خشکی مرحله گلدهی و دانه‌بندی است (محمد و همکاران، ۲۰۱۶).

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

تحقیقات زیادی بر تأثیر کم‌آبیاری بر کمیت و کیفیت محصولات مختلف زراعی و همچنین کارایی مصرف آب صورت گرفته است که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. خلیل وند و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان در تراکم‌های مختلف کشت پرداختند. نتایج نشان داد که اعمال تنش کمبود آب باعث کاهش معنی‌داری در صفات وزن صد دانه، عملکرد دانه در تک بوته و در واحد سطح، درصد روغن و عملکرد روغن در واحد سطح گردید. اردلان و همکاران (۱۳۹۱) جهت بررسی اثر تنش کم‌آبیاری و شیوه‌های مختلف آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد دو رقم ذرت (SC 700 و SC 704) تحقیقی را انجام دادند. در این تحقیق تحت شرایط تنش خشکی و سه روش آبیاری، آزمایشی در مزرعه آزمایشی دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج انجام شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تنش خشکی اثر معنی‌دار بر روی عملکرد و اجزای عملکرد داشت، به طوری که با افزایش تنش صفاتی نظیر عملکرد دانه، تعداد ردیف در بلال، تعداد دانه در ردیف بلال، تعداد دانه در هر بلال، وزن هزار دانه، طول دانه ذرت، طول بلال و... کاهش یافت. احمد پور و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی اثرات کم‌آبیاری بر روند رشد و خصوصیات کمی و کیفی ذرت دانه‌ای در کرمانشاه پرداختند. نتایج نشان داد اثرات کم‌آبیاری بر عملکرد دانه، بیومس، وزن ساقه، وزن بلال، وزن برگ، شاخص سطح برگ، ارتفاع بوته، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال و عملکرد پروتئین و روغن دانه معنی‌دار بود. گلستانی و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی چهار سطح تنش از نرمال تا خشکی شدید دریافتند که عملکرد بیولوژیک همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه داشته و نیز با افزایش تنش، صفات کاهش معنی‌دار بیش‌تری پیدا می‌کنند. بیگلویی و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی اثر چهار تیمار آبیاری (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس خاک و تیمار بدون آبیاری) را در ذرت مورد بررسی قرار دادند، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده با اعمال کم‌آبیاری بر اساس ۷۵ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس خاک، می‌توان ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، بدون کاهش معنی‌دار در عملکرد ماده خشک و میزان پروتئین کل، کشت ذرت علوفه‌ای را توسعه داد. در گزارشی بیان شد کم‌آبیاری، در اوایل رشد رویشی، شاخص سطح برگ، ارتفاع بوته، سرعت رشد گیاه و ماده خشک را در گیاه ذرت

¹ Cakir

² Nawaz et al

³ Hoogenboom et al

⁴ Al-Kaisi et al

⁵ Jian-yong et al

به مقدار کمی کاهش می‌دهد و در مرحله رشد زایشی باعث کاهش شدید این شاخص‌ها می‌شود (پاندی و همکاران؛ ۲۰۰۰). هاگ و همکاران (۲۰۰۳) در بررسی اثر تنش رطوبتی بر ذرت اظهار نمودند که عملکرد دانه در شرایط تنش متوسط و شدید در سال ۲۰۰۰ به ترتیب ۶۳ و ۸۵ و در سال ۲۰۰۱ به ترتیب ۱۳ و ۲۶ درصد کاهش یافت. میرشکار نژاد و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی تأثیر تاریخ کاشت و رژیم‌های مختلف آبیاری بر عملکرد و راندمان مصرف آب در ذرت دانه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که انتخاب تاریخ کاشت زود هنگام ذرت دانه‌ای و پرهیز از آبیاری‌های مازاد بر نیاز گیاه برای دستیابی به حداکثر عملکرد بهینه و بهبود راندمان مصرف آب حائز اهمیت می‌باشند. کریمی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی اثر قطع آبیاری بر عملکرد دانه و خصوصیات فیزیولوژیکی ذرت (Zea mays L., S.C.704) پرداختند نتایج نشان داد که مراحل اولیه و مرحله آخر دوره رشد دارای کمترین حساسیت به قطع آبیاری بود و تأخیر در آبیاری تا سه هفته هم اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه ندارد ولی در مراحل گرده‌افشانی و پر شدن دانه حتی دو هفته قطع آبیاری هم باعث خسارت قابل توجه به عملکرد دانه خواهد شد و نباید با مشکل کم‌آبی و یا تأخیر در آبیاری مواجه گردد.

مجیدیان و همکاران (۲۰۰۹) در بررسی اثر تنش خشکی روی عملکرد و کارایی مصرف آب در گیاه ذرت گزارش نمودند که تیمار آبیاری معادل نیاز آبی گیاه، بیش‌ترین بهره‌وری مصرف آب را خواهد داشت. گاکسای و همکاران^۲ (۲۰۰۴) اثر کم‌آبیاری در سه مرحله رشد آفتابگردان (تشکیل طبق، گلدهی و دانه دهی) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین عملکرد دانه در آبیاری کامل حاصل می‌شود همچنین عملکرد دانه با کاهش تعداد دفعات و حجم آب آبیاری به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد و عدم آبیاری، باعث کاهش ۴۶ و ۴۷ درصدی به ترتیب در عملکرد دانه و روغن نسبت به شرایط آبیاری کامل شد. سزن و همکاران^۳ (۲۰۱۱) تأثیر خشکی موضعی ریشه و کم‌آبیاری بر عملکرد و کیفیت روغن آفتابگردان در اقلیم مدیترانه‌ای شرق ترکیه را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که تیمار خشکی موضعی ریشه در مقایسه با آبیاری کامل، با ۳۶ درصد صرفه‌جویی در آب آبیاری، تنها ۱۵ درصد کاهش در عملکرد دانه را نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که تیمار خشکی موضعی ریشه با ۵۰ درصد آبیاری، در مقایسه با کم‌آبیاری سنتی با ۵۰ درصد آبیاری دارای عملکرد دانه و روغن بیش‌تری بود. رژیم‌های مختلف آبیاری به‌طور معنی‌داری بر قطر طبق، تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه، روغن دانه و ارتفاع گیاه تأثیر داشتند. طبق آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۵ سازمان جهاد کشاورزی، سطح زیر کشت ذرت در ایران و کرمانشاه به ترتیب ۱۵۸۵۳۴ و ۱۶۳۵۳ هکتار و متوسط عملکرد ذرت نیز به ترتیب ۷۳۸۰ و ۹۳۳۰ کیلوگرم در هکتار است. لذا در این تحقیق، به بررسی اثر اعمال تنش آبیاری بر روند رشد، عملکرد کمی و کیفی گیاه ذرت دانه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۶ در کرمانشاه پرداخته شد.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در سال زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ در مزرعه تحقیقاتی و آزمایشگاه‌های گروه "مهندسی آب" پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی با موقعیت مختصات طول جغرافیایی ۴۷ درجه ۶ دقیقه و ۱۲ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه ۱۹ دقیقه و ۳۳ ثانیه شمالی و ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا انجام شد. میانگین ماهانه داده‌های هواشناسی مربوط به دوره رشد محصول کشت‌شده در این مطالعه مطابق جدول ۱ است.

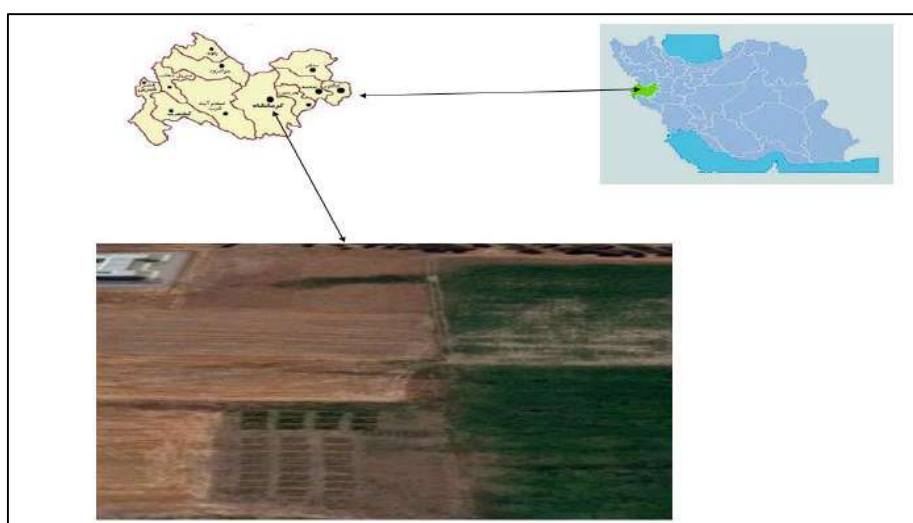
¹ Pandey et al

² Goksoy et al

³ Sezen et al

جدول ۱. میانگین ماهانه پارامترهای هواشناسی محل اجرای آزمایش (اداره کل هواشناسی استان کرمانشاه)

پارامتر	واحد	خرداد ۹۶	تیر ۹۶	مرداد ۹۶	شهریور ۹۶
درجه حرارت حداقل	(° C)	۱۱/۶	۱۷/۶	۱۸/۸	۱۴/۸
درجه حرارت حداکثر	(° C)	۳۲/۹	۳۸/۳	۳۹/۲	۳۶/۹
ساعات آفتابی	(hr/d)	۱۲/۴	۱۳/۴	۱۱/۴	۱۰/۵
رطوبت نسبی حداقل	(%)	۱۰/۲	۹/۸	۸/۸	۱۲/۴
رطوبت نسبی حداکثر	(%)	۳۷/۲	۳۳/۵	۳۰/۲	۳۹/۰
بارش	(mm)	-	-	-	-



شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای موقعیت محل اجرای آزمایش در استان کرمانشاه

ویژگی‌های آب و خاک

مشخصات و پارامترهای فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی با نمونه‌برداری از اعماق مختلف (متناسب با حداکثر عمق مؤثر ریشه) و با استفاده از نتایج آزمایش‌های خاکشناسی انجام‌شده در مزرعه آزمایشی تعیین گردید (سازتون و راوز، ۲۰۰۶). سپس از نرم‌افزار SPAW که از بانک اطلاعاتی قدرتمندی برخوردار است و با داشتن بافت خاک، پارامترهای فیزیکی آن را تخمین می‌زند، جهت کنترل صحت نتایج آزمایش‌ها فیزیکی خاک استفاده شد (جدول ۲).

جدول ۲. مشخصات فیزیکی خاک محل آزمایش

عمق خاک (سانتی‌متر)	بافت خاک	هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/hr)	آب قابل دسترس (mm/m)	رطوبت اشباع (درصد حجمی)	رطوبت نقطه پژمردگی (درصد حجمی)	رطوبت ظرفیت زراعی (درصد حجمی)
۰-۳۰	clay	۰/۴۲	۲۰۰	۵۵	۲۲	۴۲
۳۰-۶۰	clay	۰/۴۲	۲۰۰	۵۵	۲۲	۴۲
۶۰-۹۰	silty clay loam	۰/۵۰	۲۵۰	۵۲	۲۳	۴۳

جدول ۳. تیمارهای اعمال شده

کد تیمار	درصد آبیاری اعمال شده
T120	۱۲۰
T100	۱۰۰
T80	۸۰
T60	۶۰

نیاز آبی تیمار شاهد (آبیاری کامل)، با استفاده از اطلاعات روزانه هواشناسی ثبت شده توسط ایستگاه هواشناسی هوشمند موجود در مجاورت مزرعه تحقیقاتی طبق رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$ET_c = K_c (ET_o) \quad (1)$$

در رابطه فوق ET_c تبخیر-تعرق گیاه موردنظر (برحسب میلی‌متر در روز)، ET_o تبخیر-تعرق مرجع (برحسب میلی‌متر در روز) و K_c ضریب گیاهی است.

سپس با استخراج مقادیر ضریب گیاهی ذرت در مراحل مختلف دوره رشد آن برای منطقه کرمانشاه از نرم‌افزار AGWAT (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۱) و ضرب آن‌ها در مقادیر روزانه تبخیر و تعرق پتانسیل، مقادیر تبخیر و تعرق روزانه ذرت محاسبه گردید. به دلیل عدم وجود پدیده بارش در زمان اجرای طرح و صفر بودن مقدار بارش مؤثر، با جمع کردن مقادیر تبخیر و تعرق روزانه اتفاق افتاده بین دو مرحله آبیاری، نیاز خالص آبیاری تیمار شاهد محاسبه گردید. سپس طبق رابطه (۲) نیاز ناخالص آبیاری تیمار شاهد محاسبه گردید.

$$I_g = \frac{I_n}{E_a} \quad (2)$$

که در آن I_g نیاز ناخالص آبیاری (برحسب میلی‌متر)، I_n نیاز خالص آبیاری (برحسب میلی‌متر) و E_a راندمان آبیاری (برحسب درصد) است. نیاز آبیاری سایر تیمارها، ضریبی از نیاز آبیاری تیمار شاهد (به همان ترتیبی که در معرفی قالب طرح و تیمارهای آبیاری بیان شد) تعریف شد. دلیل انتخاب تیمار بیش آبیاری عدم اطمینان کافی به روش تعیین نیاز آبیاری تیمار شاهد (استفاده از رابطه پنمن - مانتیث فائو) در منطقه مورد مطالعه بود. عملیات آبیاری به صورت جویچه‌ای با انتهای بسته با دور آبیاری ۷ روزه (تابعی از ظرفیت نگهداری آب خاک، حداکثر تبخیر و تعرق و عادت و الگوی منطقه) با استفاده از شیلنگ و کنتور حجمی انجام شد. لازم به ذکر است در مراحل اولیه رشد، جهت اطمینان از سبز شدن بذرها دور آبیاری کم‌تر در نظر گرفته شده و اعمال تیمارها از آبیاری مرحله پنجم (۱۳۹۶/۴/۱) به بعد شروع شد (جدول ۳).

در جدول ۴، اطلاعات مربوط به زمان و مقدار آبیاری ارائه گردیده است.

جدول ۴. اطلاعات مربوط به زمان و مقدار آبیاری

مرحله آبیاری	تاریخ آبیاری	روز ژولپوسی	روز پس از کشت	مقدار آب آبیاری (میلی متر)			
				T120	T100	T80	T60
۱	۱۳۹۶/۳/۹	۱۴۸	۵	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
۲	۱۳۹۶/۳/۱۵	۱۵۳	۱۱	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
۳	۱۳۹۶/۳/۲۰	۱۵۹	۱۶	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
۴	۱۳۹۶/۳/۲۷	۱۶۷	۲۳	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
۵	۱۳۹۶/۴/۳	۱۷۰	۲۹	۴۰	۶۷	۵۴	۸۰
۶	۱۳۹۶/۴/۱۰	۱۷۹	۳۷	۳۴	۵۷	۴۶	۶۸
۷	۱۳۹۶/۴/۱۷	۱۸۶	۴۴	۲۵	۴۲	۳۴	۵۰
۸	۱۳۹۶/۴/۲۵	۱۹۴	۵۲	۳۷	۶۲	۵۰	۷۴
۹	۱۳۹۶/۴/۳۱	۲۰۰	۵۸	۲۵	۴۱	۳۳	۴۹
۱۰	۱۳۹۶/۵/۸	۲۰۸	۶۶	۳۴	۵۷	۴۶	۶۸
۱۱	۱۳۹۶/۵/۱۵	۲۱۵	۷۳	۲۶	۴۳	۳۴	۵۲
۱۲	۱۳۹۶/۵/۲۲	۲۲۲	۸۰	۲۶	۴۳	۳۴	۵۲
۱۳	۱۳۹۶/۵/۲۹	۲۲۹	۸۷	۲۹	۴۸	۳۸	۵۸
۱۴	۱۳۹۶/۶/۵	۲۳۶	۹۴	۲۶	۴۳	۳۴	۵۲
۱۵	۱۳۹۶/۶/۱۲	۲۴۳	۱۰۱	۲۲	۳۷	۳۰	۴۴
۱۶	۱۳۹۶/۶/۱۹	۲۵۰	۱۰۸	۱۹	۳۲	۲۶	۳۸
۱۷	۱۳۹۶/۶/۲۶	۲۵۷	۱۱۵	۱۷	۲۹	۲۳	۳۵
۱۸	۱۳۹۶/۷/۶	۲۶۸	۱۲۶	۲۰	۳۳	۲۶	۴۰
جمع کل ارتفاع آب مصرفی در هر تیمار در کل دوره رشد (میلی متر)				۶۲۰	۷۴۸	۸۷۴	۱۰۰۰

آزمایش شامل ۱۲ کرت بود که در هر کرت هشت ردیف کاشت به طول ۵ متر در نظر گرفته شد به صورتی که دو ردیف اول و آخر به عنوان حاشیه، دو ردیف وسط برای برداشت نهایی و ردیف‌های باقیمانده برای نمونه برداری در نظر گرفته شدند. اطراف و انتهای جویچه‌ها، خاکریزی به ارتفاع ۲۵ سانتیمتر جهت جلوگیری از تلفات رواناب ایجاد گردید. بین کرت‌ها جهت جلوگیری از تأثیر تیمارها بر یکدیگر، دو متر به عنوان حاشیه در نظر گرفته شد. به دلیل آنکه در این تحقیق، بررسی اثرات مواد مغذی خاک مدنظر نبود، در همه کرت‌ها طبق الگوی منطقه، کود سوپر فسفات تریپل قبل از کشت و به صورت یک مرحله‌ای و به میزان ۷ کیلوگرم (طبق الگوی ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) استفاده شد. اما کود اوره در سه مرحله با الگوی ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار (جمعاً ۱۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) به میزان ۶ کیلوگرم به صورت سرک در مراحل مختلف فنولوژیکی رشد گیاه به مزرعه داده شد، که عبارتند از: ۱- کود پایه، ۲- کود مرحله شش برگی و ۳- کود مرحله شروع گلدهی.

کنترل علف‌های هرز در مزرعه با وجین دستی انجام شد. همچنین لازم به ذکر است که در دوره رشد محصول کشت‌شده هیچ‌گونه آفت یا بیماری در مزرعه مشاهده نگردید. جهت بررسی روند رشد، بلافاصله بعد از سبز شدن بذرها، هر ۱۰ روز یک‌بار، صفات وزن خشک کل اندام هوایی، وزن خشک برگ سبز، وزن خشک دانه و وزن خشک ساقه، با نمونه‌گیری از ردیف‌های پیش‌بینی‌شده برای این منظور اندازه‌گیری شد. همچنین پارامتر شاخص سطح برگ (LAI) نیز با نمونه‌برداری ده روز یک‌بار و اسکن سطح برگ‌ها و با استفاده از نرم‌افزار Leaf Area Meter جهت محاسبه سطح برگ‌ها با دقت ۰/۰۱ سانتی‌متر مربع به دست آمد. صفات مربوط به برداشت نهایی شامل: عملکرد دانه، زیست‌توده کل، وزن هزار دانه و درصد چربی دانه به روش Soxhlet بودند (نوریان سرور و همکاران، ۱۳۹۱).

برای تحلیل آب به‌کاررفته در سطوح مختلف زراعی، تعریف بهره‌وری آب ارائه شده است. بر همین اساس کارایی مصرف آب میزان ماده تولیدشده به ازاء مقدار مصرف آب و برحسب کیلوگرم محصول در مترمکعب آب است. بهره‌وری آب آبیاری بر اساس روابط ۳، ۴ و ۵ برای عملکردهای دانه، زیست‌توده و چربی به‌طور جداگانه محاسبه گردید (سپاسخواه و همکاران، ۱۳۸۵).

$$WP \text{ grain} = \frac{Y_{\text{grain}}}{W} \quad (۳)$$

$$WP \text{ biomass} = \frac{Y_{\text{biomass}}}{W} \quad (۴)$$

$$WP \text{ fat} = \frac{Y_{\text{fat}}}{W} \quad (۵)$$

در این روابط WP grain، WP biomass و WP fat به ترتیب بهره‌وری مصرف آب نسبت به دانه، زیست‌توده و چربی تولیدی برحسب کیلوگرم بر مترمکعب آب، Y grain، Y biomass و Y fat به ترتیب عملکرد دانه، زیست‌توده و چربی برحسب کیلوگرم در هکتار و W مقدار آب آبیاری برحسب مترمکعب در هکتار می‌باشند.

یافته‌ها

اثرات کم آبیاری بر صفات کمی و کیفی ذرت

عملکرد دانه

در شکل (۳) روند کاهش عملکرد دانه در اثر تنش‌های آبی اعمال شده در طول دوره رشد مشاهده می‌شود. بیش‌ترین مقدار عملکرد دانه مربوط به تیمار T120 به مقدار ۱۱۵۴۰ کیلوگرم در هکتار و کم‌ترین مقدار عملکرد دانه مربوط به تیمار T60 به مقدار ۳۶۲۱ کیلوگرم در هکتار است که نشان‌دهنده رابطه مستقیم افزایش عملکرد دانه با افزایش میزان مصرف آب است (جدول ۶). همچنین نتایج نشان داد که اختلاف بین عملکرد دانه برای سطوح مختلف آبیاری در سطح یک درصد معنی‌دار است (جدول ۵). با توجه به جدول ۷ مشاهده می‌شود که ۴۰ درصد کاهش آب آبیاری موجب کاهش ۶۹ درصدی عملکرد دانه نسبت به تیمار T100 شده است. احمد پور و همکاران (۱۳۹۵) در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه رازی مقدار عملکرد، رقم سینگل کراس ۷۰۴، تحت روش آبیاری جویچه‌ای برای ۲۰ درصد بیش‌آبیاری و آبیاری کامل را به ترتیب ۱۱/۶۰۱ و ۹/۴۹۹ تن در هکتار به دست آورد. نتایج محققان دیگر از جمله کافی دجامان (۲۰۱۱)، رضایی و همکاران (۱۳۸۶) و فهیمان و همکاران (۱۳۹۰) نشان

می‌دهد با افزایش آب کاربردی عملکرد کل افزایش می‌یابد. متفاوت بودن رقم کشت‌شده، نوع خاک، آب‌وهوای منطقه، تاریخ کاشت، مدیریت مزرعه و مقدار آب کاربردی، می‌تواند از دلایل اختلاف میزان تولید ذرت در این طرح با تحقیقات محققین دیگر باشد.

عملکرد زیست‌توده

روند تغییر عملکرد زیست‌توده ذرت دانه‌ای در طول دوره رشد برای تیمارهای مختلف کم‌آبیاری در شکل (۳) نشان داده شده است. تقریباً تا اواسط دوره رشد اختلاف زیادی بین تیمارها از نظر عملکرد زیست‌توده وجود نداشته است. اما از اواسط دوره رشد به بعد، بین تیمارها اختلاف ایجاد شده و تا زمان برداشت محصول این اختلاف ادامه داشته است. زیست‌توده که مجموع وزن اندام‌های هوایی گیاه است، تا اواسط دوره رشد فقط شامل اندام‌های رویشی بوده است. اما از زمان شروع گلدهی که محصولات مربوط به بخش زایشی نیز به عملکرد زیست‌توده اضافه شده‌اند اختلاف بین تیمارها بیش‌تر شده است به طوری که بیش‌ترین مقدار عملکرد زیست‌توده مربوط به تیمار T120 و به مقدار ۲۷۴۱۰ کیلوگرم در هکتار و کم‌ترین مقدار عملکرد زیست‌توده مربوط به تیمار T60 به مقدار ۱۲۱۴۳ کیلوگرم در هکتار بوده است. در جدول ۵ مشخص است که بین سطوح مختلف آبیاری از نظر عملکرد زیست‌توده اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد وجود دارد. با مقایسه بین میانگین تیمارها که در جدول ۶ نشان داده شده است، مشخص شد که هر کدام از تیمارهای کم‌آبیاری از نظر صفت عملکرد زیست‌توده در گروه‌های آماری متفاوتی قرار دارند. با کاهش مقدار آب آبیاری نسبت به تیمار T100، عملکرد زیست‌توده نیز به طور مشابه با عملکرد دانه کاهش یافت، اما شدت این کاهش نسبت به صفت عملکرد دانه کمتر بود (۴۹ درصد به ازای کاهش ۴۰ درصدی مقدار آب آبیاری نسبت به تیمار شاهد) (جدول ۷). نتایج تحقیق احمد پور و همکاران (۱۳۹۵) نیز بیان‌گر همین نتیجه بود. علت این امر را این‌گونه می‌توان بیان کرد که صفت زیست‌توده شامل قسمت‌های مختلف گیاه است و تأثیر کم‌آبیاری بر هر یک از این قسمت‌ها متفاوت است و در مقایسه باصفت عملکرد دانه تأثیرپذیری کم‌تری نسبت به کم‌آبیاری دارند.

وزن هزار دانه

نتایج نشان داد که با افزایش مقدار آب آبیاری، میانگین وزن هزار دانه به تدریج افزایش یافت و اختلاف در عملکرد وزن هزار دانه در سطح پنج درصد در سطوح مختلف آبیاری مشاهده شد (جدول ۵). در بررسی تأثیر سطوح مختلف آبیاری بر وزن هزار دانه مشخص شد که سه تیمار T120، T100 و T80 در یک گروه آماری و تیمار T60 در گروه آماری متفاوتی قرار گرفت (جدول ۶). بیش‌ترین عملکرد وزن هزار دانه مربوط به تیمار T120 و کم‌ترین مقدار آن مربوط به تیمار T60 بود که کاهش ۱۱ درصدی را نسبت به تیمار T100 نشان داد (جدول ۷). نتایج حاصل از تحقیق هوشمند و همکاران (۱۳۹۲) نیز نشان داد با کاهش میزان آب در دسترس گیاه ذرت وزن هزار دانه نیز روندی نزولی به خود می‌گیرد. علت آن را می‌توان به مهیا بودن آب موردنیاز گیاه در آبیاری کامل نسبت داد. از طرفی تنش آب با تأثیر بر مقدار سطح برگ، سطح‌فعال فتوسنتزی را کاهش می‌دهد و در نتیجه کاهش فتوسنتز واحد سطح برگ در مرحله ابریشم دهی، تولید مواد پرورده کاهش و تأثیر سوء در عملکرد محصول خواهد داشت. همین نتیجه‌گیری توسط ساکی نژاد (۱۳۸۲) نیز به دست آمد. همچنین در تنش خشکی، تنش شوری بیشتر نمایان و باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود. محققین زیادی اذعان داشتند که مهم‌ترین عامل که باعث کاهش وزن دانه در شرایط تنش شدید خشکی می‌شود، کوتاه شدن دوره پر شدن دانه است، بنابراین عرضه مواد پرورده به گیاه تحت شرایط تنش شدید خشکی کاهش می‌یابد که باعث کاهش وزن دانه هر بلال و وزن هزار دانه آن و در نهایت باعث کاهش عملکرد محصول می‌گردد (مجیدیان و همکاران، ۱۳۸۷). مشابه این نتایج را اوسبورنس و همکاران^۱ (۲۰۰۲) و چونگ و همکاران^۲ (۲۰۰۳) به دست آوردند.

¹ Osborne et al

²Cheong et al

روند شاخص سطح برگ

اثرات تنش آبی بر روند شاخص سطح برگ تیمارها در شکل (۳) ارائه شده است. تغییرات شاخص سطح برگ در اثر تنش‌های آبی اعمال شده در کل دوره رشد گیاه به‌وضوح نشان‌دهنده اثرات قابل‌ملاحظه‌ای بر شاخص سطح برگ در سطح احتمال یک درصد است (جدول ۵). در جدول ۶ مشاهده می‌شود که تیمارهای T100 و T120 در یک گروه آماری و تیمارهای T80 و T60 در گروه آماری دیگری قرار گرفته‌اند. نتایج تحقیق احمد پور و همکاران (۱۳۹۵) نیز با این نتایج هم‌سو بود و دلیل این امر را این‌گونه می‌توان بیان کرد که تنش آب با تأثیر بر مقدار سطح برگ، سطح‌فعال فتوسنتزی را کاهش می‌دهد و در نتیجه با کاهش رشد گیاه میزان شاخص سطح برگ نیز روندی نزولی به خود می‌گیرد.

شاخص برداشت

تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف کم‌آبیاری بر شاخص برداشت، وجود اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد بین تیمارها را نشان داد (جدول ۵). میانگین تیمارهای مختلف کم‌آبیاری در پارامتر شاخص برداشت در جدول ۵ نشان می‌دهد که بین تیمار T120 و تیمار T100 اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و در یک گروه آماری قرار گرفته‌اند و همچنین بین تیمارهای T80 و T60 نیز اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. اما با توجه به جدول ۶ بین تیمارهای T120 و T60 تفاوت معنی‌داری وجود دارد. نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق کریم زاده اصل و همکاران (۱۳۸۲) همخوانی دارد. همان‌طور که در نتایج تجزیه واریانس مشخص است، میزان کاهش این صفت در اثر تنش رطوبتی در مقایسه با افت عملکرد دانه چندان زیاد نبود، این موضوع حاکی از آن است که سرعت کاهش عملکرد دانه بر اثر خشکی اندکی بیشتر از سرعت کاهش ماده‌ی خشک در گیاه است.

درصد چربی دانه

در تیمارهای کم‌آبیاری اعمال شده، افزایش درصد روغن گیاه مشاهده گردید. بیش‌ترین درصد چربی دانه ذرت مربوط به تیمار T60 و کمترین آن مربوط به تیمار T120 بود (جدول ۵). این نتیجه با نتایج احمد پور و همکاران (۱۳۹۵) هم‌سو بود. با توجه به نتیجه به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر می‌توان بیان کرد که استراتژی کم‌آبیاری موجب افزایش خصوصیات کیفی محصول می‌شود و بیشترین تأثیرپذیری در تیمار T60 قابل رویت است.

در صفت تاج پوشش گیاهی، سطح سایه‌انداز گیاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد بدین معنی که پوشش سبز گیاه به‌صورت درصد بیان می‌شود. این پارامتر نیز تحت تأثیر تنش‌های آبی قرار گرفت و روند آن در تیمارهای اعمال شده در شکل (۳) قابل مشاهده است. نتایج نشان داد که تیمارهای اعمال شده در کل دوره رشد گیاه سبب ایجاد اختلاف در روند تاج پوشش گیاهی گردیدند. بیش‌ترین مقدار تاج پوشش گیاهی مربوط به تیمار T120 با مقدار ۹۷ درصد و کمترین مقدار تاج پوشش گیاهی مربوط به تیمار T60 با مقدار ۸۵ درصد بود (جدول ۶). نتایج تحقیق احمد پور و همکاران (۱۳۹۵) نیز با این نتایج هم‌سو بود و دلیل این امر را این‌گونه می‌توان بیان کرد که تنش آبی با تأثیر بر مقدار سطح برگ، سطح‌فعال فتوسنتزی را کاهش می‌دهد و در نتیجه با کاهش رشد گیاه میزان تاج پوشش گیاهی نیز تحت تأثیر قرار گرفته و روندی نزولی به خود می‌گیرد.

تعداد دانه در بلال

تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف کم‌آبیاری بر تعداد دانه در بلال، وجود اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد بین تیمارها را نشان داد (جدول ۵). در جدول ۶ مشاهده می‌گردد که هر یک از تیمارها بر اساس روش دانکن در گروه‌های آماری متفاوتی قرار گرفتند و بیش‌ترین مقدار این پارامتر مربوط به تیمار T120 و کمترین مقدار مربوط به تیمار T60 است و همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود عملکرد صفت تعداد

دانه در بلال نسبت به تیمار T100 (شاهد) کاهش ۲۱ درصدی را داشته است. یکی از اجزاء مهم عملکرد ذرت، تعداد دانه است. این صفت ممکن است بر اثر تأخیر در ظهور کاکل و یا سقط جنین در اثر کمبود هیدرات‌های کربن کاهش یابد. البته تنش‌های محیطی مانند تنش خشکی باعث کوتاه شدن دوره تمایز سنبلچه گردیده که منجر به کاهش تعداد سنبلچه در سنبله می‌گردد که کاهش عملکرد را در پی دارد (مجیدیان و همکاران، ۱۳۸۷). در این خصوص آذری و همکاران (۱۳۸۶)، اظهار داشتند که تنش آبی در مراحل گل‌دهی و اوایل پر شدن دانه، باعث کم شدن تعداد دانه بلال می‌شود.

چربی دانه

تجزیه واریانس اثر تیمارهای کم‌آبیاری بر صفت درصد روغن دانه ذرت نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین تیمارها در سطح یک درصد وجود داشت (جدول ۵). هرچند با اعمال تنش آبی بر ذرت شاهد افزایش درصد چربی بودیم اما به دلیل کاهش شدید عملکرد محصول در اثر اعمال تنش آبی عملکرد روغن دانه در سطح هکتار نسبت به تیمار شاهد در تیمار T80 و T60 به ترتیب ۲۷ و ۴۵ درصد کاهش را نشان داد (جدول ۷).

وزن خشک ساقه

تجزیه آماری نشان داد، کم‌آبیاری تأثیر معنی‌داری در سطح یک‌بر صفت وزن خشک ساقه گیاه ذرت داشته است (جدول ۵). در جدول ۶ مشاهده می‌شود که با کاهش مقدار آب آبیاری وزن خشک ساقه به تدریج کاهش می‌یابد و تیمارهای اعمال شده در گروه‌های آماری متفاوتی قرار گرفتند. بیش‌ترین عملکرد وزن خشک ساقه مربوط به تیمار T120 و کم‌ترین مقدار آن مربوط به تیمار T60 بود که کاهش ۳۰ درصدی را نسبت به تیمار شاهد نشان داد (جدول ۷). در تحقیق احمد پور و همکاران (۱۳۹۵) با کاهش مقدار آب آبیاری وزن خشک ساقه به تدریج کاهش یافت. در این آزمایش تیمارهای کم‌آبیاری تا حدودی باعث کاهش وزن خشک ساقه گردیدند اما کاهش وزن خشک ساقه در تیمار ۴۰ درصد کم‌آبیاری به رقم قابل ملاحظه‌ای رسید. و علت این امر حساسیت بالای گیاه ذرت به کم‌آبیاری شدید است.

وزن خشک بلال

نتایج نشان داد که اثر تیمارهای کم‌آبیاری بر پارامتر وزن خشک بلال باعث ایجاد اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد می‌شود (جدول ۵). در جدول ۶ مشاهده می‌شود که با کاهش مقدار آب آبیاری وزن خشک بلال روندی کاهشی را طی می‌کند و تیمارهای اعمال شده بر اساس روش دانکن در گروه‌های آماری متفاوتی قرار گرفتند. بیش‌ترین عملکرد وزن خشک ساقه مربوط به تیمار T120 و کم‌ترین مقدار آن مربوط به تیمار T60 بود که کاهش ۶۸/۵ درصدی را نسبت به تیمار شاهد نشان داد و بیانگر این موضوع است که وزن خشک بلال همانند عملکرد دانه بیش‌ترین تأثیرپذیری در نتیجه اعمال تنش آبی را داشته است. که با نتایج سایر محققین هماهنگ است. (هیریچ و همکاران، ۲۰۱۲).

وزن خشک برگ

جدول ۵ نشان می‌دهد که تأثیر تیمارهای کم‌آبیاری بر صفت وزن خشک برگ در سطح یک درصد معنی‌دار بوده است. مقایسه میانگین تیمارهای مختلف کم‌آبیاری در پارامتر وزن خشک برگ در جدول ۶ نشان می‌دهد که بین تیمار T120 و تیمار T100 اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و در یک گروه آماری قرار گرفته‌اند ولی این پارامتر در تیمارهای T80 و T60 معنی‌دار بوده و در گروه‌های مختلفی قرار گرفته‌اند. کاهش

¹ Hirich et al

عملکرد خشک برگ بر اثر کم آبیاری این تحقیق با نتایج سایر تحقیقات که در آن‌ها نیز با کاهش آب آبیاری از عملکرد خشک گیاه کم شده و عملکرد خشک بین تیمارهای طرح اختلاف معنی‌داری وجود داشت، هماهنگ است (رضایی استخروئیه و همکاران، ۱۳۹۱) و (اوکتم و همکاران، ۲۰۰۳)

جدول ۵. تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی ذرت دانه‌ای متأثر از تیمارهای مختلف آبیاری

میانگین مربعات						منبع	درجه
تاج پوشش گیاهی	درصد چربی دانه	شاخص برداشت	شاخص سطح برگ	وزن هزار دانه	عملکرد زیست‌توده	عملکرد دانه	آزادی
ns۱/۰۲	ns۰/۳۹۲	ns۸/۵۴	ns۰/۲۶۲	ns۱۵۳/۶۴۱	ns۶۹۷/۶۳۶	ns۱/۳۱۳	۲
**۷۲/۸۶	**۳/۴۲۵	**۱۲۴/۷۲	**۵/۴۷۹	*۷۰/۸/۶۰۴	**۲۸۷۵۷/۹۴۴	**۳۷/۲۶۵	۳
۴/۰۶	۰/۱۵۵	۳/۹۵	۰/۲۴۳	۹۳/۶۰۶	۲۶۷/۲۱۰	۱/۰۲۷	۶
۲/۲۰	۶/۷۵	۵/۷۰	۸/۱۸	۴/۱۵	۵/۲۷	۱۳/۶۱	---
						تغییرات %	
میانگین مربعات						منبع	درجه
وزن خشک بلال	وزن خشک برگ	وزن خشک ساقه	عملکرد روغن دانه	تعداد دانه در بلال	تعداد دانه در بلال	آزادی	
ns۲۷۰/۱/۴	ns۴۹۹۵/۷۲	ns۱۰۲۷۴/۳۵	ns۴۷/۶۵	ns۲۱۷/۷۵	ns۲۱۷/۷۵	۲	
**۶۴۵۶۰۹۰۶/۲	**۹۹۷۱۸۵/۱۵	**۹۹۲۱۲۷۸/۵۰	**۴۹۶۱۸/۵۷	**۱۷۰۵۶/۷۵	**۱۷۰۵۶/۷۵	۳	
۲۲۵۶۳/۲	۵۴۹۹/۹۲	۲۱۸۹۷/۰۷	۱۶۹/۳۷	۸۶/۷۵	۸۶/۷۵	۶	
۱/۵۳	۲/۴۸	۱/۷۲	۳/۲۰	۲/۵۸	۲/۵۸	---	
						تغییرات %	

* معنی دار در سطح احتمال 5 درصد، ** معنی دار در سطح احتمال 1 درصد و ns غیر معنی دار

جدول ۶. مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه ذرت دانه‌ای در سطوح مختلف آبیاری

سطوح آبیاری	عملکرد زیست توده (کیلوگرم در هکتار)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	وزن هزار دانه (گرم)	شاخص سطح برگ	شاخص برداشت (درصد)	درصد چربی دانه	تاج پوشش گیاهی (درصد)
T120	a27410	a11540	a248/2	a7/5	a42/15	a4/75	a97/18
T100	b23555	b9016	a237/1	a6/66	a38/32	b5/23	ab93/20
T80	c19505	c5601	a234/75	b5/43	b29/99	c6/18	bc89/38
T60	d12143	c3621	b211/66	b4/5	b28/87	c7/16	c85/73

سطوح آبیاری	تعداد دانه در بلال	عملکرد روغن دانه (کیلوگرم در هکتار)	وزن خشک ساقه (کیلوگرم در هکتار)	وزن خشک برگ (کیلوگرم در هکتار)	وزن خشک بلال (کیلوگرم در هکتار)
T120	a463	a548/14	a10723/3	a3509/34	a14604/40
T100	b366	b470/13	b9424/4	a3384/67	b11911/10
T80	c325	c346/14	c7746/2	b2834/44	c9132/90
T60	d288	d259/51	d6598/4	c2250/00	d3751/30

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون برای سطوح هر تیمار، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند (آزمون Duncan 0/05).

جدول ۷. مقایسه تغییرات نسبی میانگین صفات مورد مطالعه ذرت دانه‌ای در چهار سطح مختلف آبیاری

سطوح آبیاری	حجم آب آبیاری در دوره رشد	عملکرد زیست توده	عملکرد دانه	وزن هزار دانه	شاخص سطح برگ	شاخص برداشت (درصد)	درصد چربی دانه	تاج پوشش گیاهی
T120	+14/41	+16/36	+28	+4/00	+12	+10	-10	+4/27
T100	0	0	0	0	0	0	0	0
T80	-14/41	-17/19	-38	-1	-19	-21/73	+18	-4/10
T60	-29	-49	-69	-11	-33	-24/66	+36	-8/01

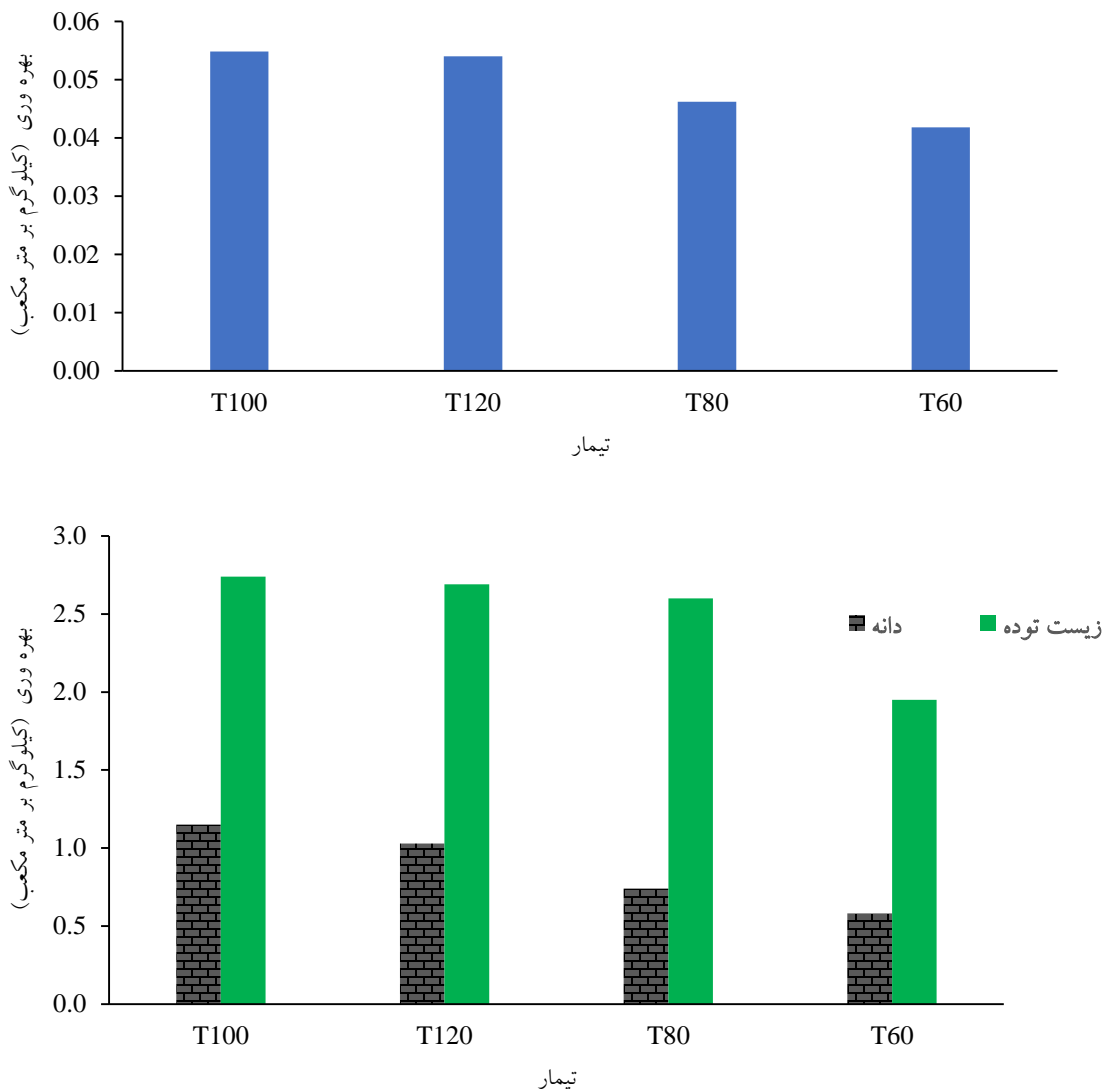
سطوح آبیاری	تعداد دانه در بلال	عملکرد روغن دانه	وزن خشک ساقه	وزن خشک برگ	وزن خشک بلال
T120	+26/50	+16/09	+13/78	+3/68	+22/61
T100	0	0	0	0	0
T80	-11/20	-26/68	-17/80	-16/25	-23/32
T60	-21/31	-45/03	-29/98	-33/52	-68/50

نتایج مربوط به شاخص بهره‌وری نسبت به عملکردهای دانه، زیست‌توده و چربی

در این تحقیق کارایی مصرف آب نسبت به عملکردهای دانه، زیست‌توده و چربی محاسبه شد. در تیمارهای کم آبیاری اعمال شده، کاهش بهره‌وری مصرف آب از نظر عملکرد دانه مشاهده گردید. مطابق شکل ۲ بیش‌ترین بهره‌وری مصرف آب از نظر عملکرد دانه مربوط به تیمار T120 و کمینه آن مربوط به تیمار T60 به ترتیب به میزان ۱/۱۵ و ۰/۵۸ کیلوگرم بر مترمکعب بود. همچنین از نظر صفت بهره‌وری آب نسبت به عملکرد زیست‌توده تیمارهای T120 و T100 و T80 از لحاظ آماری در یک گروه قرار دارند و تیمار T60 با کم‌ترین مقدار این صفت در گروهی متفاوت نسبت به سایر تیمارها قرار دارد. در صفت بهره‌وری نسبت به عملکرد چربی هم تیمارهای T120 و T100 در یک گروه آماری قرار گرفتند و در تیمارهای کم آبیاری شاهد کاهش مقدار بهره‌وری بودیم. (جدول ۸). دلیل کاهش شاخص بهره‌وری نسبت به عملکردهای محصول، زیست‌توده و چربی با اعمال تیمارهای کم آبیاری را افت شدید میزان تولید در پارامترهای مدنظر را می‌توان اعلام کرد که با نتایج تحقیقی مبنی بر افزایش بهره‌وری با عملکرد دانه و کاهش آن با افزایش حجم آبیاری مطابقت دارد (اوکتم و همکاران، ۲۰۰۳).

جدول ۸. مقایسه میانگین بهره‌وری آب صفات مورد مطالعه ذرت دانه‌ای (Kg/m³)

سطوح آبیاری	عمق آب‌داده شده در کل دوره رشد (mm)	بهره‌وری آب نسبت به عملکرد دانه	بهره‌وری آب نسبت به عملکرد زیست‌توده	بهره‌وری آب نسبت به عملکرد چربی
T120	۱۰۰۰	۱/۱۵a	a۲/۷۴	a۰/۰۵۴۸
(تیمار شاهد)	۸۷۴	۱/۰۳b	a۲/۶۹	a۰/۰۵۴۰
T100				
T80	۷۴۸	c۰/۷۴	a۲/۶۰	b۰/۰۴۶۲
T60	۶۲۰	d۰/۵۸	b۱/۹۵	c۰/۰۴۱۸

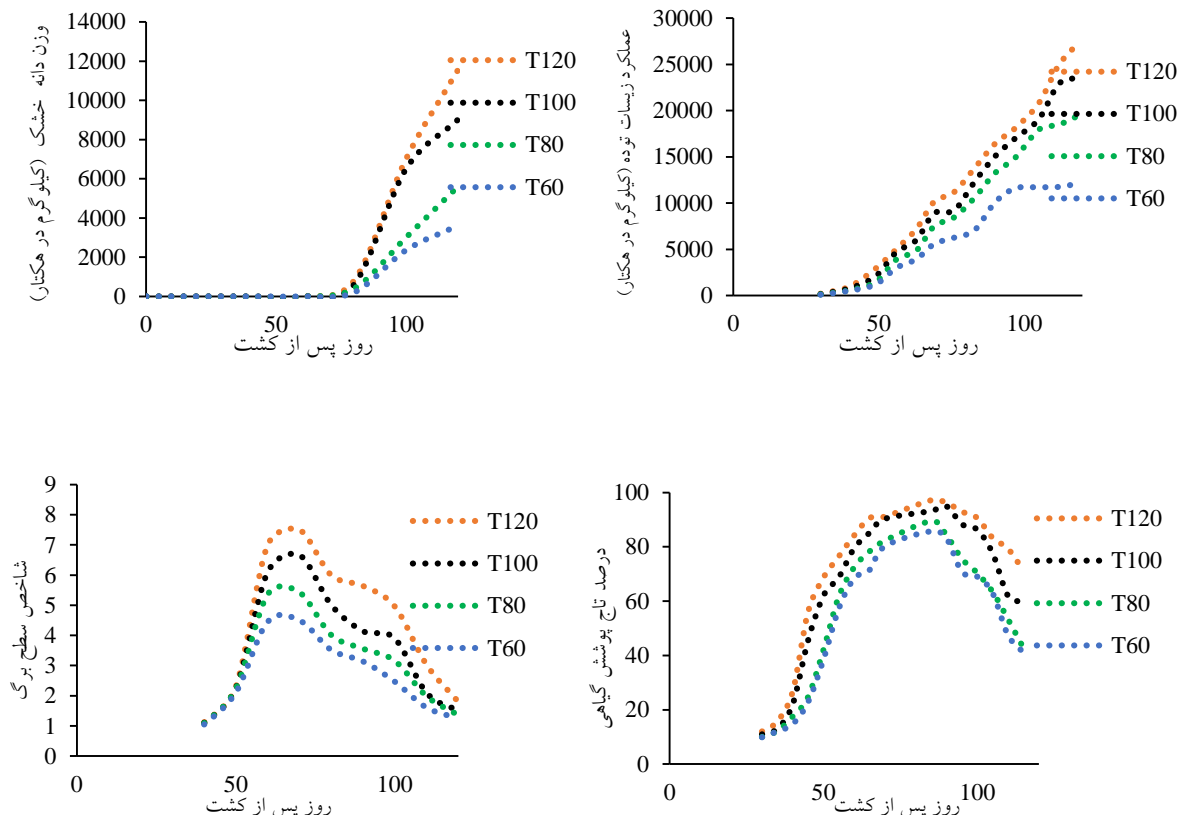


شکل ۲. مقایسه بهره‌وری مصرف آب در تیمارهای مختلف الف) بهره‌وری نسبت به عملکرد چربی ب) بهره‌وری نسبت به عملکرد دانه و زیست‌توده

نتایج مربوط به بررسی اثرات تنش بر روند رشد

اثر سطوح مختلف کم‌آبیاری بر روند تغییرات صفات ذرت دانه‌ای در طول دوره رشد آن در شکل ۲ ارائه شده است. در مورد صفت وزن خشک دانه، در ابتدای دوره تشکیل محصول تفاوت محسوسی بین تیمارها مشاهده نشد. از نظر عملکرد زیست‌توده، اختلاف چندانی بین تیمارهای مختلف مشاهده نشد و تا اواسط دوره رشد عملکرد زیست‌توده همه تیمارها در سطح تقریباً یکسانی بود. علت این امر را می‌توان اعمال تیمارهای آبیاری از آبیاری پنجم به بعد جهت حصول اطمینان از رشد ابتدایی کامل تمام تیمارها بیان کرد. اما از اواسط دوره رشد به بعد، به تدریج با مؤثر واقع شدن تیمارها، اختلاف بین تیمارها ایجاد شده و تا زمان برداشت محصول ادامه داشت. به‌طور مشابه با عملکرد زیست‌توده، در اوایل دوره رشد اختلاف

قابل ملاحظه‌ای بین تیمارهای کم‌آبیاری از نظر وزن خشک و شاخص سطح برگ وجود نداشت. به تدریج با مؤثر واقع شدن تیمارها، اختلاف بین آن‌ها از نظر این دو صفت بیش‌تر شد.



شکل ۳. اثر سطوح مختلف کم‌آبیاری بر روند تغییرات صفات ذرت دانه‌ای در دوره رشد

بحث

در مناطقی که کمبود آب موجب محدودیت در کشاورزی باشد، اگر اثرات منفی تنش آبی بر میزان محصول معنی‌دار نباشد می‌توان استراتژی کم‌آبیاری را برای صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش سطح زیر کشت محصولات با آب صرفه‌جویی شده توصیه نمود. اما طبق نتایج این مطالعه، تنش کم‌آبی بر اکثر صفات گیاه ذرت دانه‌ای رقم SC.706 تأثیر معنی‌دار منفی و کاهش‌دهنده داشت و سبب کاهش عملکرد دانه، زیست‌توده، شاخص سطح برگ، شاخص برداشت، تاج پوشش گیاهی، عملکرد چربی دانه، وزن خشک ساقه، وزن خشک برگ، وزن خشک بلال، تعداد دانه در بلال، طول بلال، بهره‌وری مصرف آب نسبت به دانه، بهره‌وری مصرف آب نسبت به زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب نسبت به چربی گردید. تیمار شاهد (نیاز آبی ۱۰۰ درصد) به دلیل تفاوت در عملکرد دانه و زیست‌توده در مقایسه با تیمار ۲۰ درصد بیش‌آبیاری تحت تنش آبی بود و در مطالعات بعدی باید تیمار بیش‌آبیاری نیز اعمال شود. با توجه به اختلاف معنی‌دار بین عملکرد دانه در سطوح مختلف آبیاری و کاهش ۶۹ درصدی آن در اثر کاهش ۴۰ درصدی تخصیص آب نسبت به حال آبیاری کامل، اگر هدف از کشت ذرت، برداشت دانه باشد، استراتژی کم‌آبیاری در منطقه

کرمانشاه توصیه نمی‌شود. هم‌چنین مشخص شد ذرت دانه‌ای در اوایل دوره رشد حساسیت کمتری نسبت به تنش آبی دارد و به تدریج از اواسط دوره رشد بر شدت تأثیر تیمارهای تنش‌افزوده می‌شود و در زمان لقاح و تشکیل دانه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. لذا در این منطقه، فقط باهدف استفاده از زیست‌توده ذرت می‌توان استراتژی کم‌آبیاری را با احتیاط در اوایل دوره رشد آن (مرحله رشد رویشی) توصیه کرد. در رابطه با استراتژی کم‌آبیاری این موضوع مطرح است که احتمالاً کم‌آبیاری موجب افزایش خصوصیات کیفی محصول شده و به‌طور مثال در ذرت با استخراج مقدار بیشتر چربی، سود حاصل از کشت این محصول افزایش می‌یابد. اما در خصوص موضوع مطرح‌شده، در این مطالعه هرچند کم‌آبیاری کیفیت دانه ذرت را با تأثیر بر درصد چربی آن افزایش داد، اما در مجموع موجب افزایش عملکرد کلی چربی دانه نشد. هم‌چنین بررسی شاخص بهره‌وری آب برای صفات عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده و عملکرد چربی دانه عدم توانایی استراتژی کم‌آبیاری در ارتقاء این شاخص را نشان داد به‌طوری‌که مقادیر حداکثر این صفت به تیمار بیش‌آبیاری اختصاص داشت.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج این مطالعه می‌توان بیان نمود که کم‌آبیاری شدید برای گیاه ذرت دانه‌ای در شرایط آب‌وهوایی کرمانشاه و مناطق با خصوصیات آب‌وهوایی مشابه، مناسب نیست و پیشنهاد می‌شود که با توجه به کمبود آب از یک طرف و اهمیت تولید بیشتر محصولات کشاورزی از طرف دیگر، نسبت به شناسایی دقیق‌تر محصولات زراعی با حساسیت کمتر نسبت به آب و استفاده از آن‌ها در الگوی کشت منطقه و اعمال مدیریت کم‌آبیاری بر روی آن‌ها اقدام شود.

منابع

- احمدپور، عبدالرضا، فرهادی بانسوله، بهمن، و قبادی، مختار. (۱۳۹۵). بررسی اثرات کم‌آبیاری بر روند رشد و خصوصیات کمی و کیفی ذرت دانه‌ای در کرمانشاه. نشریه حفاظت منابع آب و خاک (علمی - پژوهشی)، ۳(۶)، ۹۹-۱۱۲.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517480.1396.6.3.7.8>
- آذری، آرش، برومند نسب، سعید، بهزادی، مجید، و معیری، منصور. (۱۳۸۶). بررسی عملکرد گیاه ذرت در روش آبیاری قطره‌ای نواری (T-Tape). مجله علمی کشاورزی، ۳۰(۲)، ۸۷-۸۱.
<https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=74293>
- اردلان، وحید، آقا یاری، فیاض، پاک‌زاد، فرزاد، صادقی شعاع، مهدی، اسماعیل‌زاده خراسانی، شقایث، و فاطمی ریکا، زینب. (۱۳۹۱). بررسی اثر کم‌آبیاری و شیوه‌های مختلف آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد دو رقم ذرت. نشریه زراعت و اصلاح نباتات، ۸(۳)، ۱۷۵-۱۸۹.
<https://www.sid.ir/paper/190253/fa>
- اسکندری، حمداله، کاظمی، کامیار. (۱۳۹۸). ارزیابی اثر سطوح آبیاری و مدیریت حاصلخیزی خاک بر عملکرد دانه و روغن کنجد (Sesamum indicum). نشریه تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۲(۱)، ۱۱۱-۱۲۲.
<https://dx.doi.org/10.22077/escs.2018.1254.1256>
- بیگلویی، محمد حسن، کافی قاسمی، علی، جواهر دشتی، محمد، و اصفهانی، مسعود. (۱۳۹۲). اثر رژیم‌های آبیاری بر عملکرد و کیفیت ذرت (سینگل کراس ۷۰۴) در منطقه رشت. فصلنامه علوم زراعی ایران، ۱۵(۳)، ۲۰۶-۱۹۶.
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1392.15.3.1.3>
- خلیل‌وند بهروزیار، ابراهیم، یارنیا، مهرداد، دربندی، صمد، و آبیاری، هوشنگ. (۱۳۸۸). اثر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان در تراکم‌های مختلف کشت. مجله علوم زراعی، ۱۱(۱)، ۴۴-۳۳.
https://journals.srbiau.ac.ir/article_5651.html
- رشیدی، محسن، و رضا دوست، ساسان. (۱۳۸۴). بررسی اثرات سطوح مختلف آبیاری بر خصوصیات کمی و کیفی ارقام آفتابگردان. مجله علوم کشاورزی ایران، ۳۶(۵)، ۱۲۵۰-۱۲۴۱.
<https://www.sid.ir/fa/Journal/ViewPaper.aspx?ID=59419>

- رضائی استخروئیه، عباس، هوشمند، عبدالرحیم، برومند نسب، سعید، و خانجانی، محمد جواد. (۱۳۹۱). تاثیر کم آبیاری و خشکی موضعی ریشه بر عملکرد، اجزاء عملکرد و کارایی مصرف آب گیاه ذرت دانه ای هیبرید سینگل کراس ۷۰۴. مجله آب و خاک، ۲۶(۶)، ۱۵۱۴-۱۵۲۱.
<https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.19289>
- رضائی، عباس، غفوری، علیرضا، علی‌اصغری، فاطمه، و کریمی، گیتی. (۱۳۸۶). بررسی تأثیر تنش آبی بر محصول ذرت علوفه‌ای در منطقه کرمان. نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان.
<https://civilica.com/doc/38462>
- ساکي نژاد، طیب. (۱۳۸۲). مطالعه اثر تنش آب بر روند جذب عناصر نیتروژن، فسفر، پتاس و سدیم در دوره‌ها مختلف ریشه با توجه به خصوصیات دانشکده کشاورزی، فیزیولوژی گیاهان زراعی مرفولوژی و فیزیولوژیکی گیاه ذرت در شرایط آب و هوایی اهواز. پایان‌نامه دکتری تخصصی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خوزستان.
- صابری، علیرضا، مظاهری، داریوش، و حیدری شریف آبادی، حسین. (۱۳۸۵). بررسی تأثیر تراکم و آرایش کاشت و برخی از خصوصیات زراعی ذرت تری وی کراس ۶۴۷. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۳(۱)، ۶۷-۶۶.
<https://www.sid.ir/FA/Journal/ViewPaper.aspx?id=45511>
- علی‌زاده، حمزه علی، لیاقت، عبدالمجید، و عباسی، فریبرز. (۱۳۸۸). بررسی اثر کودآبیاری جویچه‌ای بر کارایی مصرف کود و آب، عملکرد و اجزای عملکرد ذرت دانه‌ای. دو ماهنامه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۳(۴)، ۱۳۷-۱۴۷.
<https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.2478>
- فهیمان، آزاده، اله دادی، ایرج، چایی چی، محمدرضا، و اکبری، غلامعلی. (۱۳۹۰). بررسی اثر روش های کم آبیاری بر عملکرد کمی و کیفی گیاهان علوفه ای تابستانه (ذرت، سورگوم و ارزن علوفه ای). اولین کنگره ملی علوم و فناوریهای نوین کشاورزی، زنجان.
<https://civilica.com/doc/145276>
- کریم زاده اصل، خلیل، مظاهری، داریوش، و پیغمبری، سید علی. (۱۳۸۲). اثر چهار دور آبیاری بر عملکرد و صفات کمی سه رقم آفتابگردان. مجله علوم کشاورزی ایران، ۳۴(۲)، ۳۰۱-۲۹۳.
<https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=814>
- کریمی، علی، قبادی، محمد اقبال، قبادی، مختار، و نصرتی، ایرج. (۱۳۹۸). بررسی اثر قطع آبیاری بر عملکرد دانه و خصوصیات فیزیولوژیکی ذرت (S.C.704 Zea mays L). نشریه تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۲(۴)، ۱۱۶۳-۱۱۵۱.
<https://dx.doi.org/10.22077/escs.2019.1623.1365>
- گلستانی، سودابه، نوری، محمدرضا، شایان نژاد، محمد، و محمدخانی، عبدالرحمن. (۱۳۹۱). مطالعه اثرات روش کم آبیاری متناوب بر تعدادی از صفات فیزیولوژیکی گیاه سیب‌زمینی رقم آگریا. اولین کنفرانس ملی راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار (کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست)، شهرکرد.
<https://civilica.com/doc/197391>
- مجیدیان، مجید، قلاوند، امیر، کریمیان، نجفعلی، و کامکار حقیقی، علی اکبر. (۱۳۸۷). تاثیر مقادیر مختلف نیتروژن، کود دامی و آب آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت. مجله الکترونیک تولید گیاهان زراعی، ۱(۲)، ۸۵-۶۷.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.2008739.1387.1.2.5.8>
- مجیدیان، مجید، قلاوند، امیر، حقیقی، علی اکبر، و کریمیان، نجفعلی. (۱۳۸۷). اثر تنش خشکی، کود شیمیایی نیتروژن و کود آلی بر قرائت کلروفیل متر، عملکرد دانه و اجزای عملکرد ذرت دانه‌ای سینگل کراس ۷۰۴. مجله علوم زراعی ایران، ۱۰(۳)، ۳۳۰-۳۰۳.
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1387.10.3.7.4>
- محمدی دهبالایی، حسین. (۱۳۹۲). فعالیت آنتی اکسیدانی و ژنوتیپ های مورفومتريک لوبيا سياه در شرایط عادی و تنش آبی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام.
- میرشکار نژاد، بابک، پاکزاد، فرزاد، امیری، ابراهیم، اردکانی، محمدرضا، و ایلکایی، محمدنبی. (۱۳۹۹). تأثیر تاریخ کاشت و رژیم‌های مختلف آبیاری بر عملکرد و راندمان مصرف آب در ذرت دانه‌ای. نشریه تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۳(۲)، ۵۵۷-۵۴۷.
<https://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.2156.1540>

هوشمند، عبدالرحیم، فروتن، مجتبی، و برومند نسب، سعید. (۱۳۹۲). ارزیابی کم آبیاری و آرایش کاشت بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت دانه ای هیبرید KSC-704. مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۳۷(۳)، ۴۳-۵۲.
<https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?ID=295578>

References

- Ahmadpour, A., Farhadi Bansouleh, B., & Ghobadi, M. (2017). Effects of deficit irrigation on growth trend, quantity and quality characteristics of maize in Kermanshah. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 6(3), 99-112. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517480.1396.6.3.7.8> [In Persian]
- Alizadeh, H., Liaghat, A., & Abbasi, F. (2010). Effect of furrow Fertigation on Fertilizer and water use efficiency, productivity and yield components of Corn (ZEA MAYS L). *Journal of water and soil (Agricultural Sciences and Technology)*, 23(4), 137-147. <https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.2478> [In Persian]
- Al-Kaisi, M. M., & Yin, X. (2003). Effects of Nitrogen rate, Irrigation rate and Plant Population on Corn Yield and Water Use Efficiency. *Agronomy Journal*, 95, 1475-1482. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.1475>
- Ardalan, V., Aghayari, F., Pakzad, F., Sadeghi Shoa, M., Ismailzadeh Khorasani, Sh., & Fatemi Rika, Z. (2012). Investigation of the effect of dehydration and different irrigation methods on yield and yield components of two maize cultivars. *Journal of Agriculture and Plant Breeding*, 8(3), 175-189. <https://www.sid.ir/paper/190253/fa> [In Persian]
- Azari, A., Boroumand Nasab, S., Behzadi, M., & Moayeri, M. (2007). Investigation of maize yield in strip diameter irrigation method. *Journal of Agricultural Science*, 30(2), 81-87. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=74293> [In Persian]
- Biglouei, M., Kafi Ghasemi, A., Javaherdashti, M., & Isfahani, M. (2013). Effect of irrigation regimes on yield and quality of forage maize (KSC 704) in Rasht region in Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 15(3), 196-206. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1392.15.3.1.3> [In Persian]
- Cakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops*, 89(1), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.005>
- Cheong, Y. H., Kim, K. N., Pandey, G. K., Gupta, R., Grant, J. J., & Luan, S. (2003). CBL1, a calcium sensor that differentially regulates salt, drought, and cold responses in Arabidopsis. *The Plant cell*, 15(8), 1833-1845. <https://dx.doi.org/10.1105/2Ftpc.012393>
- Djaman, k. (2011). Crop evapotranspiration, crop coefficients, plant growth and yield parameters, & nutrient uptake dynamics of maize (zea mays l.) Under full and limited irrigation. Effect of irrigation on yield and above-ground biomass, University of Nebraska, Lincoln. <https://www.researchgate.net/publication/305348074>
- Eskandari, H., & Kazemi, K. (2019). Evaluation of irrigation levels and soil fertility management on seed and oil yield of sesame (Sesamum indicum L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(1), 111-122. <https://dx.doi.org/10.22077/escs.2018.1254.1256> [In Persian]
- Fahiman, A., Allah Dadi, A., Chaeichi, M., & Akbari, Gh. (2011). Investigation of the effect of low irrigation methods on quantitative and qualitative yield of summer forage plants (corn, sorghum and millet forage), First National Congress of New Agricultural Sciences and Technologies, Zanjan University. <https://civilica.com/doc/145276> [In Persian]

- Farjam, S., Jafarzadeh Kenarsari, M., Rokhzadi, A., & Yousefi, B. (2014). Effects of inter-row spacing and superabsorbent polymer application on yield and productivity of rainfed chickpea. *Journal of Biodiversity and Environment Sciences*, 5, 316-320. <https://www.researchgate.net/publication/303664434>
- Goksoy, A.T., Demir, A.O., Turan, Z.M., & Agustu, N.D. (2004). Responses of sunflower (*Helianthus annuus* L) to full and limited irrigation at different growth stages. *European Journal of Agronomy*, 21, 117-127. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.fcr.2003.11.004>
- Golestani, S., Nouri, M., Shayannejad, M., & Mohammad Khani, A. (2012). Study of the effects of intermittent low irrigation method on a number of physiological traits of *Agria* cultivar. The first national conference on strategies for achieving sustainable development, Shahrekord. <https://civilica.com/doc/197391> [In Persian]
- Hirich, A., Rami, A., Laajaj, K., Choukr-Allah, R., Jacobsen, S. E., El youssfi, L., & El Omari, H. (2012). Sweet Corn Water Productivity under Several Deficit Irrigation Regimes Applied during Vegetative Growth Stage using Treated Wastewater as Water Irrigation Source. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 61, 840-847. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1057043>
- Hoogenboom G.J., White J.W., & Messina C.D. (2004). From genome to crop: Integration through simulation modelling. *Field Crop Research*, 90, 145 -16. <https://doi.org/10.15406/mojfpt.2018.06.00186>
- Hooshmand, A., Forotan, M., & Boroumand Nasab, S. (2014). Evaluation of Deficit Irrigation and Sown Pattern on Yield and Water Use Efficiency of Maize (KSC-704). *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(3), 43-52. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?ID=295578> [In Persian]
- Hugh, J. E., & Davis, R.F. (2003). Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. *Agronomy Journal*, 95, 688-696. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.6880>
- Jian-yong, W., You-Cai, X., Feng-Min, L., Kadambot, H.M., & Neil, C.T., (2017). Effects of Drought Stress on Morphophysiological Traits, Biochemical Characteristics, Yield, and Yield Components in Different Ploidy Wheat: A Meta-Analysis. *Advance in Agronomy*, 134, 139-173. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.01.002>
- Karimi, A., Ghobadi, M., Ghobadi, M., & Nosratti, I. (2019). Studying the effect of no irrigation on grain yield and physiological characteristics of corn (*Zea mays* L., S.C.704) in summer planting. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(4), 1151-1163. <https://dx.doi.org/10.22077/escs.2019.1623.1365> [In Persian]
- Karimzadeh Asl, Kh., Mazaheri, D., & Peyghambari, S.A. (2003). Effect of four irrigation cycles on yield and quantitative traits of three sunflower cultivars. *Iranian Agricultural Sciences*, 34(2), 293-301. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=814> [In Persian]
- Khalilvand Behrouzfar, E., Yarnia, M., Darbandi, S., & Aliari, H. (2009) Effect of drought stress on yield and yield components of sunflower (*Helianthus annuus*) at different plant densities. *Journal of Crop Science*, 1(1), 33-44. https://journals.srbiau.ac.ir/article_5651.html [In Persian]
- Majidian, M., Ghalavand, A., Kamgar Haghghi, A.A., & Karimian, N. (2008). Effect of drought stress, nitrogen fertilizer and manure on chlorophyll meter reading, grain yield and yield components in grain maize cv. SC 704. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 10(3), 303-330. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1387.10.3.7.4> [In Persian]
- Majidian, M., Ghalavand, A., Karimian, N., & Kamgar haghghi, A.A. (2009). Effects of nitrogen different amounts, manure and irrigation water on yield and yield components of corn. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 1(2), 67-85. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.2008739.1387.1.2.5.8> [In Persian]

- Mirshekarnezhad, B., Paknejad, F., Amiri, E., Ardakani, M., & Ilkaee, M. (2020). The Effect of planting date and different irrigation levels on yield and irrigation efficiency in grain maize. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(2), 547-557. <https://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.2156.1540> [In Persian]
- Mohammadi Dehbalae, H. (2013). Antioxidant activity and morphometric black bean genotypes in normal conditions and water stress, MSc dissertation, Faculty of Agriculture, Ilam University. [In Persian]
- Muhammad, Z.I., Fathy, S.E., Saleh, M.I., Shah, F., & Ihsanullah, D. (2016). Wheat phenological development and growth studies as affected by drought and late season high temperature stress under arid environment. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00795>
- Nawaz, A., Amjad, M., Khan, S.M., Afzal, I., Ahmed, T., Iqbal, Q., & Iqbal, J. (2013). Tomato seed invigoration with cytokinins. *The Journal of Animal & Plant Sciences*, 23(1), 121-128 <https://www.researchgate.net/publication/260555727>
- Oktem, A., Simsek, M., & Oktem., A.G. (2003). Deficit irrigation effects on sweet corn (*Zea ays saccharata* Sturt) with drip irrigation system in a semi-arid region1. Water-yield relationship. *Journal of Agricultural Water Management*, 61, 63-74. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00161-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00161-0)
- Ors, S., & Suarez, D.L. (2017). Spinach biomass yield and physiological response to interactive salinity and water stress. *Agricultural Water Management*, 190, 31-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.05.003>
- Osborn, S.L., Schepers, J.S., Franas, D.D., & Schlcmer, M.R. (2002). Use of spectral radiance to in-season biomass and grain yield in nitrogen and water stressed corn. *Crop sci*, 42, 165-186. <https://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/8>
- Pandey, R.K., Maranville, J.W., & Admou, A. (2000). Deficit irrigation and nitrogen effect on maize in Sahelian environment I. *Agricultural Water Management*, 46, 1-13. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00073-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00073-1)
- Rashidi, M., & Rezadoust, S. (2005). Investigation of the effect of different levels of irrigation on quantitative and qualitative characteristics of sunflower cultivars. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*. 36(5), 1250-1241. <https://www.sid.ir/fa/Journal/ViewPaper.aspx?ID=59419> [In Persian]
- Rezaei Estakhroei, A., Hooshmand, A., Boroomand Nasab, S., & Khanjani, M.j. (2012). Effect of Deficit Irrigation and Partial Rootzone Drying on Yield, Yield Components and Water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) SC 704. *Water and Soil*, 26(6), 1514-1521. <https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.19289> [In Persian]
- Rezaei, A., Ghafouri, A.R., Ali Asghari, F. & Karimi, G. (2007). Investigation of the effect of water stress on forage maize crop in Kerman region, 9th national seminar on irrigation and evaporation reduction, Kerman. <https://civilica.com/doc/38462> [In Persian]
- Saberi, A., Mazaheri, d., & Heidari Sharif-Abad, H. (2006). The effects of sowing density and sowing pattern on yield, yield components and some agronomic characteristics of corn (*Zea mays* L.), H.T.W.C. 647 cultivar. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 13(1), 67-76. <https://www.sid.ir/fA/Journal/ViewPaper.aspx?id=45511> [In Persian]
- Sakinezhad, T. (2003). Study of the effect of water stress on the process of nitrogen uptake. Phosphorus. Potash and sodium in different root periods according to the characteristics of the Faculty of Agriculture, "Physiology of Crops", morphology and physiology of corn in Ahvaz climatic conditions. PhD Thesis, Islamic Azad University, Khuzestan Science and Research Branch. [In Persian]

- Saxton, K.E., & Rawls, W.J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569-1578.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Sezen, S. M., Yazar, A. & Tekin, S. (2011). Effects of partial root zone drying and deficit irrigation on yield and oil quality of sunflower in a Mediterranean environment. *Irrigation and Drainage*, 60(4), 499-508.
<https://doi.org/10.1002/ird.607>



Determination of applied water and water productivity in Saffron fields in Khorasan Razavi Province

Ardalan Zolfagharan¹ 

¹ Corresponding Author, Assistant Professor of Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Iran. E-mail: azolfagharan@yahoo.com

ABSTRACT

Introduction

Drought in Iran is a climatic fact and due to the growing need for water in different sectors, the problem of drought will become more acute in the coming years. In such cases, one of the practical solutions is the optimal use of water consumption. Water consumption management in agriculture can be very effective. Determining water consumption management indicators such as the amount of irrigation water, irrigation efficiency and water productivity in various crops and orchards in the country is one of the most important tools and key indicators in macro-agricultural planning. Regarding the volume of irrigation water in the agricultural sector, the figures provided in the country are very different. Therefore, it is necessary to do a research work and its results would be a great help for decision makers. Therefore, the main purpose of this research project is direct measurement and irrigation water fields of saffron cultivation under the management of farmers.

Methodology

This project is a crop-based research that measured applied water by farmers to produce saffron during a growing season. The farms in Torbat-e Heydarieh, Zaveh and Gonabad were identified and selected with the help of experts. In each selected plain, 6 farms were selected for data collection and monitoring. Three methods of surface irrigation, roll line and peifelex were evaluated in this project. The volume of irrigation water for saffron in each field was determined by measuring the flow rate of the water source and its operating time. For this purpose, first the output flow of the water source was measured with a suitable device (flume, couter) and then the irrigation time was measured. In each of the farms in questionnaire, the characteristics of the farms include; Crop area, total land area, field soil texture, soil electrical conductivity and irrigation water were measured. Some characteristics of farms such as location, irrigation method, irrigation water source, type of irrigation network (modern, traditional), characteristics of users, etc. were done by compiling information registration forms. In addition, the final yield of saffron was measured to calculate water use efficiency. The amount of saffron evapotranspiration in each region was calculated using meteorological data by Penman Mantis method.

Results and discussion

The results of field measurements showed that the average of applied water in Peifelex, roll line and surface irrigation systems were 3713, 3900 and 4691 m³/ha respectively. The volume of saffron irrigation water in Torbat-e-Heydariyeh, Zaveh and Gonabad cities was 4974, 4816 and 4517 m³/ha, respectively. The average yield of saffron in Zaveh and Torbat-e Heydariyeh counties was 7.3 kg / ha and in Gonabad county was 5 kg / ha. The highest crop water profuvtivity was 0.001669 kg / m³ in Zaveh city and the lowest was related to Gonabad city (0.001076 kg / m³). The results also showed that in all three studied regions, the net crop water requirement in the year of the research was higher than the last decade. Application efficiency based on ten-year statistics in Zaveh, Torbat-e Heydarieh and Gonabad counties was 51, 49 and 87%, respectively.

Conclusions

This study showed that in saffron cultivation irrigation, among the three methods of surface irrigation, roll line and Piflex, farmers give the least volume of irrigation water to the plant by Piflex method and the highest volume of irrigation water to the plant by surface method. On the other hand, saffron yield in irrigation with Piflex pipes was 7.4 kg / ha and the lowest yield in surface irrigation was 6 kg. As a result, the highest water use efficiency of 0.00198 kg / m³ was obtained in irrigation with Piflex pipes and the lowest efficiency of surface irrigation method was 0.00129 kg / m³. Comparison of saffron irrigation water volume in the three studied regions of Zaveh, Gonabad and Torbat Heydariyeh shows that the highest volume of saffron irrigation water belongs to Torbat Heydariyeh city and the lowest belongs to Gonabad. On the other hand, the highest yield of saffron was observed in Zaveh and Torbat-e Heydarieh counties and the lowest yield was observed in Gonabad. In total, the highest water use efficiency was 0.001714 kg / m³ in Zaveh city and the lowest productivity was 0.001103 kg / m³ in Gonabad. Water consumption efficiency in Torbat Heydariyeh was equal to 0.001713 kg / m³. Application efficiency based on ten-year statistics in Zaveh, Torbat-e Heydarieh and Gonabad counties was 51, 49 and 87%, respectively. According to the volume of irrigation water and the area under cultivation, the average weight of irrigation water volume was 4296 cubic meters per hectare.

Keywords: Irrigation water volume, Yield of saffron, Application efficiency

Article Type: Research Article

Article history: Received: 22 February 2022 Revised: 29 March 2022 Accepted: 16 April 2022 ePublished: 29 May 2022

Cite this article: Zolfagharan, A. (2022). Determination of irrigation water and water productivity in saffron of Khorasan Razavi province, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(1), 38-51, DOI: 10.22126/ATWE.2022.7535.1015

Publisher: Razi University

© The Author(s).





تعیین آب کاربردی و بهره‌وری مصرف آب در مزارع زعفران استان خراسان رضوی

اردلان ذوالفقاران^۱

^۱ استادیار پژوهش بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران. رایانامه: azolfagharan@yahoo.com

چکیده

در خصوص حجم آب آبیاری در بخش کشاورزی اعداد و ارقام ارائه شده در کشور بسیار متفاوت بوده و در خصوص صحت آن‌ها نیز تردیدهای جدی وجود دارد. بنابراین، هدف اصلی از این طرح تحقیقاتی، اندازه‌گیری مستقیم و مزرعه‌ای آب آبیاری زراعت زعفران تحت مدیریت کشاورزان است. بدین ترتیب، حجم آب مصرف شده برای تولید زعفران در شهرستان‌های عمده استان خراسان رضوی (تربت حیدریه، زاوه و گناباد) در ۱۸ پرسشنامه اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی نشان داد که بیشترین حجم آب آبیاری زعفران متعلق به آبیاری سطحی به میزان ۴۶۹۱ مترمکعب در هکتار و کم‌ترین آن مربوط به آبیاری با لوله‌های پیفلکس به میزان ۳۷۱۳ مترمکعب در هکتار و آبیاری با رول لاین با حجم آب آبیاری ۳۹۰۰ متر مکعب در هکتار رتبه دوم را دارا بود. حجم آب آبیاری زعفران در شهرستان‌های تربت حیدریه، زاوه و گناباد به ترتیب به میزان ۴۹۷۴، ۴۸۱۶ و ۴۵۱۷ مترمکعب در هکتار بود. متوسط عملکرد زعفران در شهرستان‌های زاوه و تربت حیدریه به میزان ۷/۳ کیلوگرم در هکتار و در شهرستان گناباد به میزان ۵ کیلوگرم بر هکتار بود. بیشترین بهره‌وری مصرف آب در شهرستان زاوه به میزان ۰/۰۰۱۶۶۹ کیلوگرم بر متر مکعب و کم‌ترین آن مربوط به شهرستان گناباد به میزان ۰/۰۰۱۰۷۶ کیلوگرم بر متر مکعب به‌دست آمد. راندمان کاربرد بر اساس آمار ده‌ساله در شهرستان‌های زاوه، تربت حیدریه و گناباد به ترتیب برابر با ۵۱، ۴۹ و ۸۷ درصد به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، بهره‌وری آب، زعفران، آب آبیاری

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۳ اسفند ۱۴۰۰ اصلاح: ۰۹ فروردین ۱۴۰۱ پذیرش: ۲۷ فروردین ۱۴۰۱ چاپ الکترونیکی: ۰۸ خرداد ۱۴۰۱

استناد: ذوالفقاران، ا. (۱۴۰۱). تعیین آب آبیاری و بهره‌وری مصرف آب در مزارع زعفران استان خراسان رضوی، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، (۱)۲، ۵۱-۳۸.

شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2022.7535.1015



© نویسندهگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

خشک سالی و کم آبی در ایران یک واقعیت اقلیمی است و با توجه به روند روزافزون نیاز بخش های مختلف به آب، مشکل خشک سالی در سال های آینده حادتر نیز خواهد شد. در چنین شرایطی یکی از راهکارهای مؤثر و عملی استفاده بهینه و صرفه جویی در مصرف آب است. مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی که بخش عمده ای از مصارف آب در ایران و جهان را نیز شامل می شود، می تواند بسیار مؤثر و راه گشا باشد. تخمین نسبتاً دقیق و یا تعیین شاخص های مدیریت مصرف آب از جمله مقدار آب کاربردی، راندمان آبیاری و بهره وری آب محصولات زراعی و باغی مختلف در کشور از مهم ترین ابزارها و شاخص های کلیدی در برنامه ریزی های کلان مربوط به تأمین، تخصیص و مصرف اصولی از آب در بخش های مختلف از جمله کشاورزی است (ابریشمی، ۱۳۷۲).

زعفران گیاهی است که به لحاظ آبیاری، برای مناطق خشک و نیمه خشک که با کمبود آب مواجه هستند بسیار مطلوب است، زیرا بنه های زعفران از نیمه اردیبهشت ماه که بارندگی های بهاره قطع می شود یک خواب با دوره ۵ ماهه را طی کرده و در این مدت نیاز به آبیاری ندارند. اما خارج از این محدوده، زعفران باید مانند هر محصول دیگری آبیاری شود. در نقاط زعفران کاری خراسان بسته به وضعیت آب و هوایی منطقه، آبیاری زعفران از اواسط مهرماه تا دهه اول آبان ماه شروع می گردد. از آنجایی که رشد زعفران با آبیاری مزرعه آغاز شده و اولین مرحله رشد، شروع گل دهی است، در مناطقی که سطح زیر کشت زیاد و کمبود کارگر وجود دارد برای این که برداشت زعفران با مشکل مواجه نشود آبیاری بین قطعات و با فواصل چند روز تقسیم می شود تا گل دهی مزرعه در اوج خود همزمان نگردد. بنابراین اولین آبیاری در زعفران زمانی انجام می شود که سطح مزرعه خالی از گیاه است. با انجام آبیاری اول گل ها و سپس برگ ها در سطح مزرعه آشکار می شوند. آبیاری دوم زودتر از ۴ تا ۵ هفته پس از آبیاری اول انجام نمی شود. آبیاری های بعدی به فواصل ۱۲ تا ۱۴ روز، بسته به زمانی که آب در اختیار زارع باشد صورت می گیرد. اما در اوایل فروردین تا موقعی که در اواسط اردیبهشت ماه رنگ برگ ها به زردی می گراید در صورت امکان آبیاری باید به صورت هفتگی یا دوره های ۱۰ روزه انجام پذیرد. معمولاً از اواسط اردیبهشت ماه آبیاری زعفران قطع می گردد (ابریشمی، ۱۳۷۲).

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

زعفران به علت اینکه سیکل رشد رویشی آن منطبق بر فصولی از سال است که معمولاً ریزش باران و برف دارد عمده نیاز آبی آن به وسیله آب برف و باران تأمین می شود، لیکن میزان نیاز آبی آن در مقایسه با محصولات کمتر از غلات نیست که چون عمده آن به وسیله باران تأمین می شود باقی مانده نیاز آبی با ۳ الی ۵ نوبت آبیاری مرتفع می شود. به طور کلی نیاز آبی زعفران حدود ۴ الی ۵ هزار مترمکعب برآورد می شود. زمان آبیاری از مهرماه با اولین آب جهت آغاز رشد گیاه شروع شده که به آن خاک آب گفته می شود. پس از این آبیاری است که گل های زعفران ظاهر شده و پس از آن برگ ها خارج می شوند. اگر زمان آبیاری مناسب نباشد امکان دارد که ظهور برگ و گل دچار اشکال گردد. یعنی در آبیاری زودهنگام برگ ها زودتر خارج شده و سپس از وسط آن ها گل خارج گردیده و آبیاری دیرهنگام نیز باعث می شود که خروج گل از لایه های سطحی خاک دچار اشکال شده و بدشکلی گلدهی به وجود می آید. لذا زمان اولین آبیاری بسیار مهم است قبل از اولین آبیاری وجین علف های هرز از سطح مزرعه انجام می شود و سپس کود دامی در سطح مزرعه توزیع و بعداً عمل آبیاری انجام می شود. هنگام گاو رو شدن عملیات سله شکنی و به زیر خاک بردن کود دامی انجام می شود پس از برداشت محصول آبیاری دوم که زاج آب است انجام می شود. در این مرحله کودهای شیمیایی توزیع می شود بستگی به مقدار ریزش برف و باران و برودت دما آبیاری نوبت های بعدی انجام می گردد (کمیته تدوین برنامه راهبردی زعفران، ۱۳۸۸). به طور سنتی آبیاری مزارع زعفران محدود به چهار آبیاری است، اما در فاصله ماه های مهر و اردیبهشت ماه نیاز آبی زعفران مانند هر گیاه دیگر باید تأمین گردد. بهترین زمان برای آبیاری اول با توجه به دمای هوا در خراسان ۱۵ مهر است. دور آبیاری ۱۵ روز نیز مناسب ترین دور آبیاری گزارش شده است. طول دوره های رشد اولیه، توسعه، میانی و نهایی زعفران به ترتیب ۳۰، ۵۵، ۱۰۵ و ۳۰ روز بوده و ضرایب گیاهی در این مراحل ۰/۴، ۰/۸۵ و ۰/۵۵ برآورد شده است (مسافری، ۱۳۸۰). کوچکی و همکاران (۱۳۹۵) به منظور مطالعه اثر برخی فاکتورهای زراعی بر رشد بنه های دختری زعفران، آزمایشی در سال های ۹۰-۱۳۸۸ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا کردند.

نتایج نشان داد که تیمار آبیاری، موجب افزایش ۱۲ درصدی تعداد بنه‌های دختری و ریشه‌های انقباضی در هر کلون و کاهش ۱۹ درصدی تعداد جوانه گل دهنده، کاهش ۱۱ درصدی تعداد کل جوانه‌ها و نیز کاهش ۱۹ درصدی وزن بنه و کاهش ۸ درصدی قطر هر بنه دختری شد.

احمدی و همکاران (۱۳۹۵) تحقیقی جهت بررسی مدل مناسب تعیین نیاز آبی زعفران و تعیین میزان تنش‌های آبی وارده انجام دادند. نتایج نشان داد که معادلات بلانی - کریدل، جنسن - هیز اصلاح شده و هارگریوز از دقت بهتری نسبت به سایر معادلات برخوردار بودند. همچنین نیاز آبی زعفران در دشت بیرجند با استفاده از روش فائو-پنمن مانیتیت ۲۳۵۰ مترمکعب در هکتار برای یک فصل زراعی برآورد شد و معادله هارگریوز با اختلاف ۱۶۱/۲۳- مترمکعب در هکتار نسبت به این روش، به‌عنوان مدلی مناسب تعیین گردید. علیزاده و همکاران (۱۳۸۸) تحقیقی در رابطه با بررسی مناسب‌ترین زمان شروع آبیاری زراعت زعفران در استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی انجام دادند. بر اساس نتایج حاصله تاریخ گلدهی و زمان انجام اولین آبیاری گیاه زعفران بسته به اقلیم و دمای منطقه مورد مطالعه بسیار متفاوت است. در مکان‌هایی با ارتفاع بالاتر از سطح دریا و میانگین دمای کمتر، معمولاً تاریخ گلدهی و زمان آبیاری زود هنگام و در اوایل پائیز است. با کم شدن ارتفاع و بالا رفتن دمای هوا تاریخ گلدهی و زمان انجام اولین آبیاری به اواسط و حتی به اواخر پائیز منتقل می‌شود. شمس‌آبادی و همکاران (۱۳۹۴) سعی کردند با بررسی دو پارامتر مهم مصرف آب در بخش کشاورزی یعنی بهره‌وری فیزیکی و بهره‌وری اقتصادی شرایط موجود در شهرستان باخرز را در مورد کشت محصول زعفران بررسی و ارزیابی کنند. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان بهره‌وری فیزیکی آب ۰/۰۱۸۴۶ کیلوگرم بر مترمکعب و میزان بهره‌وری اقتصادی آب ۱/۳ ۱۰۰۹۷۰ ریال بر هر مترمکعب است. کیخا مقدم و همکاران در سال (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای باهدف اندازه‌گیری و برآورد تبخیر-تعرق بالقوه و ضرایب گیاهی و دوگانه زعفران تکامل‌یافته در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز به اتمام رساندند. نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار کل تبخیر-تعرق بالقوه از لایسیمترهای کشت زعفران در سال سوم و چهارم به ترتیب ۷۲۶ و ۷۸۳ میلی‌متر، حداکثر تبخیر-تعرق زعفران برای سال سوم و چهارم به ترتیب ۶/۲۸ و ۶/۴۰ میلی‌متر بر روز بوده است. همچنین در این مطالعه طول مراحل رشد اولیه، توسعه گیاهی، میانی و پایانی رشد به ترتیب برابر با ۳۰، ۵۵، ۵۵ و ۶۵ روز تعیین شد. ضریب گیاهی یگانه، برای مراحل ابتدایی، میانی و انتهایی برای سال سوم به ترتیب ۰/۴۶، ۱/۲ و ۰/۳۵ و برای سال چهارم نیز به ترتیب ۰/۴۹، ۱/۲۵ و ۰/۳۵ و به‌طور میانگین برای سال سوم و چهارم ۰/۴۸، ۱/۲۳ و ۰/۳۵ برآورد شد. مقدار ضریب گیاهی پایه زعفران برای مراحل سه‌گانه رشد برای سال سوم به ترتیب برابر ۰/۱۵، ۰/۹۰ و ۰/۱۷ و در سال چهارم ۰/۱۵، ۰/۹۵ و ۰/۱۸ به دست آمد (کیخا مقدم و همکاران، ۱۳۹۲). در مطالعه‌ای که در سال ۱۳۹۴ تحت عنوان "مدل سازی اثرات تغییر اقلیم روی نیاز آبی زعفران در خراسان جنوبی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی" صورت پذیرفت، محققین تلاش کردند تا بهترین سناریو تغییر اقلیم منطبق با منطقه مورد مطالعه را شناسایی کرده و اثرات تغییر اقلیم را بر نیاز آبی محصول زعفران برآورد نمایند. به‌طور کلی، میانگین افزایش نیاز آبی در استان ۶۷ میلی‌متر در انتهای فصل کشت در سال ۲۰۴۰ میلادی پیش‌بینی شد. نتایج بیانگر آن بود که میانگین نیاز آبی زعفران در استان روند افزایشی به خود خواهد گرفت، به‌طوری‌که از ۴۲۵/۵۲ میلی‌متر به ۴۸۷/۶۱ میلی‌متر در سال خواهد رسید. به‌طور کلی، نتایج نشان داد، تغییر اقلیم اثرات منفی روی نیاز آبی زعفران در استان خراسان جنوبی خواهد داشت که پراکنش این افزایش در مناطق مختلف متفاوت خواهد بود (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۴). رجیبی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای تلاش نمودند تا میزان نیاز آبی محصول زعفران را در مناطق مختلف استان اصفهان بررسی نمایند. نتایج این پژوهش نشان داد که ایستگاه‌های غرب و جنوب غرب استان دمای لازم برای کسب درجه-روز مورد نیاز برای تکمیل دوره رشد گیاه به دست نمی‌آید. در دوره رشد زعفران، در ایستگاه اردستان با ۵۸۱ میلی‌متر، بیشترین نیاز آبی و ایستگاه کاشان با ۲۷۹ میلی‌متر، کم‌ترین نیاز آبی اندازه‌گیری شده است. فلاح قاله‌ری و احمدی (۱۳۹۴) تلاش نمودند تا با استفاده از آمار درجه حرارت روزانه ایستگاه‌های هوا شناسی، طول دوره رشد زعفران را در سطح استان اصفهان پهنه‌بندی نمایند. نتایج این مطالعه نشان داد که تاریخ بهینه گلدهی زعفران بر اساس شرایط اقلیمی از نیمه اول مهر تا اواخر آبان ماه متغیر است. با در نظر گرفتن تاریخ گلدهی و نیاز درجه روز زعفران، زمان آبیاری قبل از گلدهی از نیمه دوم شهریورماه در نیمه غربی تا اوایل آبان ماه در مناطق شرقی ادامه خواهد داشت. از نظر شرایط دمایی مناطق غرب، مرکز، شمال و شرق استان اصفهان برای توسعه محصول زعفران مناسب‌تر به نظر می‌رسد. بیشترین میزان نیاز آبی بر اساس تبخیر و تعرق منطقه مورد مطالعه و ضریب گیاهی زعفران، در مراحل میانی، انتهایی و اولیه رخ می‌دهد. صادقی و همکاران (۱۳۹۵) باهدف تعیین الگوی کشت بهینه در دشت بیرجند با استفاده الگوریتم فرا کوشی جهش ترکیبی

قورباغه را به اتمام رساندند. پس از بدون بعد نمودن معیارهای دخیل تصمیم‌گیری و هدف، مدل تحت دو سناریو متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که در سناریوی اول زعفران، محصولات جالیزی، زیره سبز و سبزیجات، بالاترین حد مربوطه (با توجه به وجود محدودیت) از سطح زیر کشت را به خود اختصاص دادند، اما در سناریوی دوم که محدودیت اختصاص سطح زیر کشت به محصولات کاهش یافت، ابتدا زعفران و سپس محصولات جالیزی به ترتیب با مقادیر ۳۴/۸ و ۳۲/۵ درصد از کل سطح زیر کشت، بیشترین سطح را به خود اختصاص دادند. همچنین با توجه به اقلیم خشک منطقه میزان آب مصرفی نسبت به الگوی کشت پایه در سناریوی اول و دوم به ترتیب ۱۴ و ۲۰ درصد کاهش داشت.

سپاسخواه و یارمی (۲۰۰۹)، اثر متقابل رژیم آبیاری و شوری بر عملکرد گل و رشد زعفران را بررسی کردند. تیمارهای آبیاری شامل چهار دور آبیاری (به ترتیب ۲، ۴، ۶ و ۸ روز) و تیمارهای شوری آب آبیاری مقدار ۰/۵، ۱/۷، ۲/۹ و ۴ دسی زیمنس بر متر بود. نتایج نشان داد که عملکرد زعفران و کلاله گل به ترتیب بیشترین و کمترین حساسیت به کاهش آب آبیاری را دارند. مقادیر آستانه شوری آب آبیاری به ترتیب برابر با ۰/۱۳ و ۰/۴۸ دسی زیمنس بر متر برای گل و ریشه بود. هنگامی که آب شور برای آبیاری زعفران استفاده می‌شود، فاصله آبیاری باید برای جلوگیری از تنش شدید آب کمتر باشد (به‌عنوان مثال فاصله زمانی ۲ روز). یارمی و همکاران (۲۰۱۱) برای تعیین تبخیر و تعرق بالقوه و ضریب گیاهی زعفران با استفاده از لایسیمتر بیلان آبی تحقیقی انجام دادند. تبخیر - تعرق بالقوه زعفران و تبخیر - تعرق بالقوه گیاه مرجع با روش پنمن فائو در منطقه باجگاه به ترتیب ۵۲۴ و ۸۱۱ میلی‌متر در طی فصل رشد به دست آمد. ضریب گیاهی زعفران در دوره ابتدایی رشد، دوره رشد میانی و انتهایی به ترتیب ۰/۴۱، ۰/۹۵ و ۰/۳۵ محاسبه شده است. بهدانی و همکاران (۲۰۰۸) به منظور ارزیابی و کمی کردن روابط بین مصرف عناصر غذایی و عملکرد زعفران در پهنه اقلیمی مرکز و جنوب خراسان، مطالعه‌ای در چهار شهر بیرجند، گناباد، قاین و تربت‌حیدریه که مهم‌ترین مناطق تولید زعفران ایران هستند انجام دادند. ۱۶۰ مزرعه زعفران یک‌ساله تا پنج‌ساله طی دو سال زراعی ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ مورد بررسی قرار گرفت. توابع برازش داده‌شده بین عملکرد و میزان مصرف کود دامی بیانگر ارتباط خطی مثبتی بین آن‌ها بوده و شیب منحنی افزایش عملکرد نسبت به مصرف کود دامی در بیرجند بیشتر از سایر شهرها بود.

از نظر میزان مصرف آب در بخش‌های مختلف، در ایران نیز همانند سایر کشورها، بخش قابل توجهی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در بخش کشاورزی استفاده می‌شود. هرچند، تاکنون حجم آب کاربردی در بخش کشاورزی به‌طور دقیق تعیین یا برآورد نشده اما این موضوع همواره از دغدغه‌های اصلی متولیان و برنامه‌ریزان صنعت آب کشور بوده و است. در شرایط فعلی که تناقضاتی در آب کاربردی محصولات مختلف بین سازمان‌های مختلف و به‌طور خاص بین وزارت نیرو و وزارت جهاد کشاورزی وجود دارد، انجام یک کار پژوهشی در سطح کشور که بتواند به مقادیر واقعی درباره حجم آب کاربردی محصولات مختلف در کشور منتهی شود، امری لازم و ضروری بوده و نتایج آن می‌تواند کمک شایانی به تصمیم‌گیری مسئولین مرتبط با آب و کشاورزی بنماید. لذا، هدف اصلی این مقاله، اندازه‌گیری مستقیم و مزرعه‌ای آب کاربردی زعفران تحت مدیریت زارعان استان خراسان رضوی است. اهداف دیگر این مقاله مقایسه حجم آب کاربردی زعفران در منابع آبی انتخابی و تعیین بهره‌وری مصرف آب زعفران در مناطق مورد اندازه‌گیری شده است.

روش پژوهش

این پروژه، یک پژوهش محصول محور است که آب‌داده شده توسط کشاورزان برای تولید زعفران در طول یک فصل زراعی، بدون دخالت کارشناس در بحث مدیریت آبیاری زارع، اندازه‌گیری شد. مزارع مورد نظر در شهرستان‌های تربت‌حیدریه، زاوه و گناباد با کمک کارشناسان معاونت تولیدات گیاهی، مدیریت هماهنگی ترویج و مدیریت آب‌و خاک سازمان‌های جهاد کشاورزی استان، شناسایی و انتخاب شد. منابع آبی مزارع نیز طوری انتخاب شد که عوامل مختلف از جمله روش آبیاری، بافت خاک و کیفیت آب آبیاری را پوشش دهند. در هر شهرستان انتخابی ۶ مزرعه برای داده‌برداری و پایش انتخاب شد. سه روش آبیاری سطحی، رول لاین و پیفلکس در این طرح مورد ارزیابی قرار گرفت. حجم آب آبیاری محصول زعفران در هر مزرعه در طول فصل زراعی با اندازه‌گیری دبی منبع آبی و زمان کارکرد آن تعیین شد. برای این منظور ابتدا مقدار دبی خروجی منبع آبی انتخاب‌شده (چاه، استخر و قنات) با وسیله مناسب (فلوم، کنتور) اندازه‌گیری و سپس زمان آبیاری اندازه‌گیری شد. در هر کدام از مزارع مورد نظر، ویژگی مزارع شامل: سطح زیر کشت محصول، سطح کل اراضی زیر منبع آبی، بافت خاک مزارع،

هدایت الکتریکی خاک و آب آبیاری مورد استفاده، اندازه‌گیری شد. برخی از مشخصات مزارع از قبیل موقعیت دقیق مکانی با GPS، روش آبیاری، منبع آب آبیاری (سطحی، زیرزمینی)، نوع شبکه (مدرن، سنتی)، مشخصات بهره‌برداران و غیره با تدوین فرم‌های ثبت اطلاعات انجام شد. در ضمن عملکرد نهایی زعفران، جهت محاسبه بهره‌وری مصرف آب در هر مزرعه اندازه‌گیری شد. مقدار تبخیر و تعرق گیاه زعفران در هر منطقه با استفاده از داده‌های هواشناسی نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه اجرای طرح در دوره ۱۰ ساله اخیر (۱۳۸۷-۱۳۹۷) و سال زراعی انجام تحقیق (۱۳۹۷-۱۳۹۸) با استفاده از روش پنمن مانیتیت محاسبه شد.

شاخص بهره‌وری آب زعفران از نسبت مقدار عملکرد محصول (کیلوگرم بر هکتار) به حجم آب مصرفی (مترمکعب بر هکتار) به دست آمد (رابطه ۱).

$$WUE = CY / CW \quad (1)$$

که در آن:

WUE = بهره‌وری آب در تولید زعفران (کیلوگرم بر مترمکعب آب مصرفی)

CY = عملکرد زعفران (کیلوگرم بر هکتار)

CW = حجم آب مصرفی در تولید زعفران (مترمکعب بر هکتار)

برای برآورد شاخص بهره‌وری آب و بارش مؤثر از نسبت عملکرد محصول به حجم آب مصرفی و بارش مؤثر استفاده شد.

برای برآورد نیاز آبی خالص زعفران در مناطق مورد مطالعه و تبخیر-تعرق مرجع، از نرم‌افزار ETo-calculator به روش پنمن مانیتیت فائو و با استفاده از آمار و اطلاعات نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی به مناطق مورد مطالعه استفاده شد. اطلاعات هواشناسی مورد استفاده شامل متوسط روزانه مقادیر درجه حرارت و رطوبت نسبی حداکثر و حداقل هوا، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و تعداد ساعات آفتابی در شبانه‌روز در یک دوره آماری ۱۰ ساله (۱۳۸۷-۱۳۹۷) بودند. پس از تعیین مقادیر تبخیر-تعرق مرجع، میزان تبخیر-تعرق پتانسیل زعفران در مناطق مورد مطالعه با استفاده از رابطه تجربی (رابطه ۲) برآورد شد.

$$ETc = Kc * ETo \quad (2)$$

در پژوهش حاضر، ضرایب گیاهی مربوط به هر مرحله رشد زعفران (جدول ۱) بر اساس پیشنهاد احمدی و همکاران (۱۳۹۵) انتخاب شد

جدول ۱. ضریب گیاهی زعفران در استان خراسان جنوبی در طول دوره رشد

۹ مهر -	۱۰ آبان -	۱۰ آذر -	۱۱ دی -	۱۲ بهمن - ۹	۱۰ اسفند - ۱۱	۱۲ فروردین -	۱۱ اردیبهشت
۹ آبان	۹ آذر	۱۰ دی	۱۱ بهمن	اسفند	فروردین	۱۰ اردیبهشت	۱۰ خرداد
۰/۳۸	۰/۴۶	۰/۷۸	۰/۸۴	۰/۶۸	۰/۵۰	۰/۴۱	۰/۳۷

نتایج و بحث

بررسی پارامترهای اندازه گیری شده

پارامترهای اندازه گیری شده در شهرستان های مورد مطالعه زاوه، تربت حیدریه و گناباد مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت، بررسی پارامترهای اندازه گیری شده نشان داده که ارتفاع از سطح دریا بین ۱۰۴۰ تا ۱۴۳۴ متر، شوری آب آبیاری بین ۳۵۰ تا ۲۷۰۰ dS/m، اقلیم گرم و خشک، منابع آبی: چاه، رودخانه و قنات، سن پياز زعفران بین ۲ تا ۶ سال، نوبت های آبیاری از ۴ تا ۷ نوبت و حجم آب آبیاری بین ۳۶۵۰ تا ۵۱۰۰ مترمکعب در هکتار، متغیر بود. مقادیر مورد بحث در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. نتایج یادداشت برداری و اندازه گیری از مزارع مورد مطالعه

کد مزرعه	شهرستان	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	سطح زیر شوری آب کشت (ha)	شوری آبیاری (dS/m)	روش آبیاری	نوبت های آبیاری	حجم آب مصرفی (m ³ /ha)	تبخیر و تعرق باران مؤثر سال جاری (mm)	تبخیر و تعرق باران مؤثر سال جاری (mm)	باران مؤثر ده ساله (mm)	عملکرد (Kg/ha)
۱	زاوه	۵۹-۲۸-۲۱	۳۵-۱۶-۳۷	۲۰	۴۰۰	رول لاین	۶	۳۸۰۰	۴۸۳	۱۲۹	۴۰۴	۶/۵
۲	زاوه	۵۹-۲۹-۱۳	۳۵-۱۵-۴۵	۸	۳۶۰	پفلاکس	۶	۳۶۵۰	۴۸۳	۱۲۹	۴۰۴	۷/۰
۳	زاوه	۵۹-۲۹-۷۸	۳۵-۱۴-۵۴	۳	۳۵۰	پفلاکس	۷	۳۷۰۰	۴۸۳	۱۲۹	۴۰۴	۷/۲
۴	زاوه	۵۹-۲۷-۱۱	۳۵-۱۸-۹۸	۴	۷۵۰	سطحی	۵	۵۰۰۰	۴۸۳	۱۲۹	۴۰۴	۷/۵
۵	زاوه	۵۹-۲۶-۴۵	۳۵-۱۷-۳۹	۱	۴۰۰	سطحی	۴	۴۷۰۰	۴۸۳	۱۲۹	۴۰۴	۷/۳
۶	زاوه	۵۹-۲۸-۴۲	۳۵-۱۷-۵	۱	۳۵۰	سطحی	۴	۴۸۰۰	۴۸۳	۱۲۹	۴۰۴	۷/۲
۷	تربت حیدریه	۵۹-۱۱-۵۴	۳۵-۱۷-۲	۳	۴۰۰	پفلاکس	۶	۳۸۰۰	۴۸۳	۱۲۹	۴۰۴	۷/۲
۸	تربت حیدریه	۵۹-۱۱-۴۵	۳۵-۱۷-۹	۳	۲۷۰۰	رول لاین	۵	۳۹۰۰	۴۸۳	۱۲۹	۴۰۴	۶/۸
۹	تربت حیدریه	۵۹-۱۲-۴۲	۳۵-۱۵-۶۵	۳	۸۵۰	سطحی	۴	۴۹۰۰	۴۸۳	۱۲۹	۴۰۴	۷/۵
۱۰	تربت حیدریه	۵۹-۱۱-۵۷	۳۵-۱۶-۲	۵	۷۰۰	رول لاین	۶	۴۰۰۰	۴۸۳	۱۲۹	۴۰۴	۷/۰
۱۱	تربت حیدریه	۵۹-۱۱-۴۵	۳۵-۱۸-۵	۲	۹۰۰	پفلاکس	۶	۳۷۰۰	۴۸۳	۱۲۹	۴۰۴	۸/۰
۱۲	تربت حیدریه	۵۹-۱۰-۱۰	۳۵-۱۶-۵	۵	۸۰۰	سطحی	۴	۵۱۰۰	۴۸۳	۱۲۹	۴۰۴	۷/۰
۱۳	گناباد	۵۸-۴۴-۵۵	۳۴-۲۲-۲	۲	۷۵۰	سطحی	۴	۴۳۰۰	۶۷۶	۸۷	۴۷۲	۴/۸
۱۴	گناباد	۵۸-۴۳-۵	۳۴-۲۰-۲	۵	۸۵۰	سطحی	۵	۴۶۰۰	۶۷۶	۸۷	۴۷۲	۵/۰
۱۵	گناباد	۵۸-۴۵-۳۲	۳۴-۲۲-۱	۳	۸۰۰	سطحی	۴	۴۴۰۰	۶۷۶	۸۷	۴۷۲	۵/۰
۱۶	گناباد	۵۸-۴۴-۶۵	۳۴-۲۰-۵	۵	۷۵۰	سطحی	۵	۴۷۰۰	۶۷۶	۸۷	۴۷۲	۵/۲
۱۷	گناباد	۵۸-۴۵-۳۷	۳۴-۲۳-۶	۵	۶۰۰	سطحی	۴	۴۵۰۰	۶۷۶	۸۷	۴۷۲	۴/۸
۱۸	گناباد	۵۸-۴۱-۵	۳۴-۲۱-۴۵	۵	۲۵۰۰	سطحی	۵	۴۶۰۰	۶۷۶	۸۷	۴۷۲	۵/۱

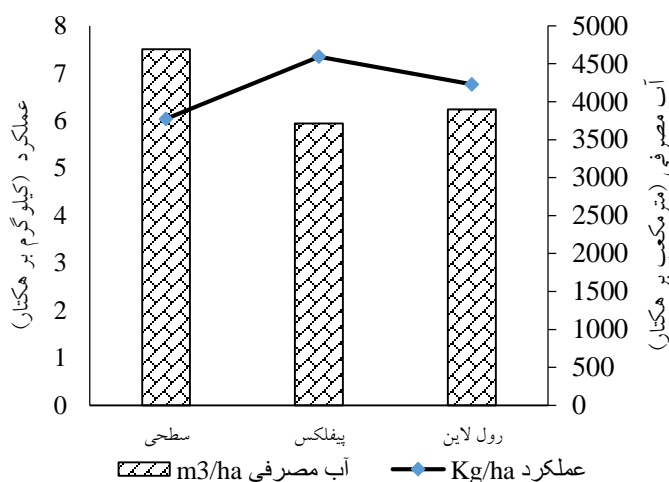
تبخیر و تعرق زعفران بر اساس داده های سال انجام تحقیق و داده های ده ساله اخیر

تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_o) بر اساس داده های نزدیک ترین ایستگاه هواشناسی با روش پنمن مانیتیت برای شهرستان های مورد مطالعه، در سال انجام تحقیق و ده ساله اخیر محاسبه گردید. با توجه به نزدیکی شهرستان های زاوه و تربت حیدریه و عدم وجود ایستگاه هوا شناسی در شهرستان زاوه، جهت برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل، از داده های ایستگاه هوا شناسی تربت حیدریه استفاده شد. با توجه به مقادیر روزانه Kc در نمودار ضریب گیاهی زعفران و با توجه به مقادیر روزانه تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده، مقادیر تبخیر و تعرق گیاه زعفران (ET_c) به دست

آمد. مجموع ETC روزانه در شهرستان‌های زاوه و تربت‌حیدریه بر اساس داده‌های سال جاری و داده‌های ده ساله به ترتیب ۴۸۲/۶ و ۴۰۳/۸ میلی‌متر و مجموع ETC روزانه در شهرستان گناباد بر اساس داده‌های سال جاری و داده‌های ده ساله به ترتیب ۶۷۶ و ۴۷۱/۵ میلی‌متر به دست آمد مقادیر مورد بحث در جدول ۲ نشان داده شده است.

حجم آب آبیاری و عملکرد زعفران در روش‌های مختلف آبیاری

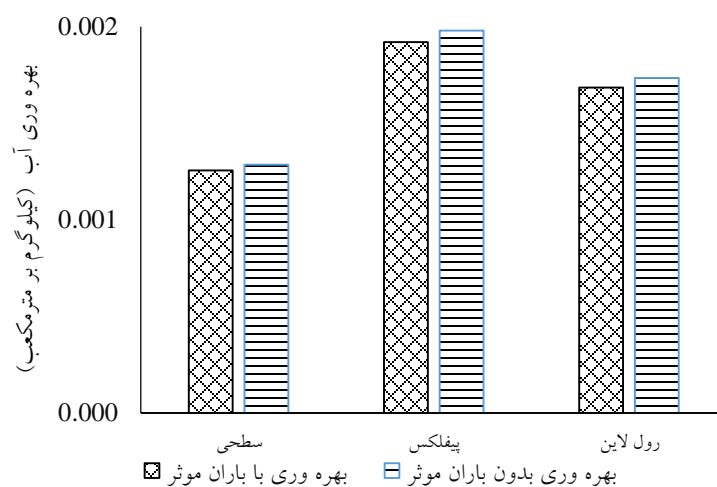
با توجه به اینکه سه روش آبیاری سطحی، رول لاین و پیفلکس در کشت زعفران در شهرستان‌های تربت‌حیدریه و زاوه مورد استفاده قرار گرفته بود، لذا حجم آب آبیاری، عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در کشت زعفران در این سه روش آبیاری با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین حجم آب آبیاری زعفران متعلق به آبیاری سطحی با حجم ۴۶۹۱ مترمکعب در هکتار و کمترین آن مربوط به آبیاری پیفلکس با حجم ۳۷۱۳ مترمکعب در هکتار است. آبیاری با رول لاین با حجم آب آبیاری ۳۹۰۰ مترمکعب در هکتار رتبه دوم را دارا است. شکل ۱ بیانگر این موضوع می‌باشد. یعقوبی و همکاران (۱۳۹۴) میزان آب مصرفی زعفران در مزارع مختلف شهرستان قاین را بین ۳۶۵۸ تا ۴۸۳۲ مترمکعب بر هکتار گزارش نموده‌اند. در مقایسه عملکرد زعفران در هر یک از روش‌های آبیاری، بیشترین عملکرد زعفران در آبیاری با لوله‌های پیفلکس به میزان ۷/۴ کیلوگرم در هکتار و کمترین عملکرد در آبیاری سطحی به میزان ۶ کیلوگرم بر هکتار مشاهده شد. در شکل ۱ عملکرد و حجم آب آبیاری زعفران در روش‌های آبیاری مقایسه شده‌اند.



شکل ۱. مقایسه عملکرد و حجم آب آبیاری زعفران در روش‌های آبیاری

بهره‌وری مصرف آب زعفران بدون باران مؤثر و با باران مؤثر در روش‌های مختلف آبیاری

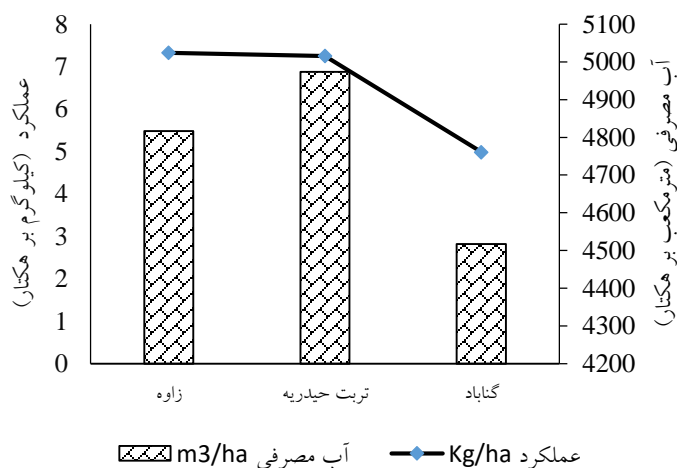
از تقسیم متوسط عملکرد زعفران بر حجم آب اندازه‌گیری شده، بهره‌وری مصرف آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. بیشترین بهره‌وری مصرف آب به میزان ۰/۰۰۱۹۸ کیلوگرم بر مترمکعب در آبیاری با لوله‌های پیفلکس و کمترین بهره‌وری در روش آبیاری سطحی به میزان ۰/۰۰۱۲۹ کیلوگرم بر مترمکعب حاصل شد (شکل ۲). با در نظر گرفتن باران مؤثر در سال انجام تحقیق و اضافه نمودن آن به حجم آب اندازه‌گیری شده، مقدار واقعی آب آبیاری حاصل خواهد شد. بیشترین بهره‌وری مصرف آب با در نظر گرفتن باران مؤثر، مربوط به روش آبیاری با لوله‌های پیفلکس به میزان ۰/۰۰۱۹۲ کیلوگرم بر مترمکعب و کمترین آن مربوط به روش آبیاری سطحی به میزان ۰/۰۰۱۲۶ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. شکل ۲ بیانگر مقایسه بهره‌وری مصرف آب در روش‌های آبیاری با باران مؤثر و بدون باران مؤثر می‌باشد.



شکل ۲. مقایسه بهره‌وری مصرف آب در روش‌های آبیاری با باران مؤثر و بدون باران مؤثر

حجم آب آبیاری و عملکرد زعفران در شهرستان‌های مورد مطالعه

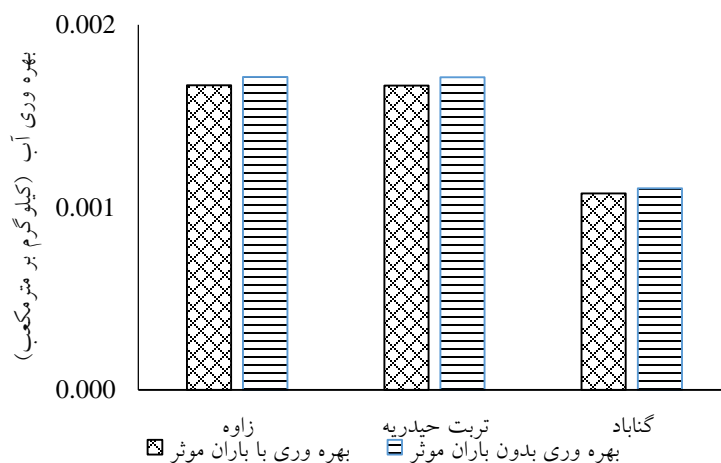
مقایسه حجم آب آبیاری زعفران در سه شهرستان مورد مطالعه زاوه، گناباد و تربت‌حیدریه نشان می‌دهد که بیشترین حجم آب آبیاری زعفران متعلق به شهرستان تربت‌حیدریه با حجم ۴۹۷۴ مترمکعب در هکتار و کم‌ترین آن مربوط به گناباد با حجم ۴۵۱۷ مترمکعب در هکتار است. شهرستان زاوه با حجم آب آبیاری ۴۸۱۶ مترمکعب در هکتار رتبه دوم را دارا است (شکل ۳). بیشترین عملکرد زعفران در شهرستان‌های زاوه و تربت‌حیدریه به میزان ۷/۳ کیلوگرم در هکتار و کم‌ترین عملکرد در گناباد به میزان ۵ کیلوگرم بر هکتار مشاهده شد. شکل ۳ بیانگر عملکرد و حجم آب آبیاری زعفران در شهرستان‌های مورد مطالعه است.



شکل ۳. عملکرد و حجم آب آبیاری زعفران در شهرستان‌های مورد مطالعه

بهره‌وری مصرف آب در زعفران بدون باران مؤثر و با باران مؤثر در شهرستان‌های مورد مطالعه

بیشترین بهره‌وری مصرف آب در شهرستان زاوه به میزان $0/001714$ کیلوگرم بر مترمکعب و کم‌ترین بهره‌وری در گناباد به میزان $0/001103$ کیلوگرم بر مترمکعب حاصل شد. بهره‌وری مصرف آب در تربت‌حیدریه برابر با $0/001713$ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد (شکل ۴). شمس‌آبادی و همکاران (۱۳۹۴) میزان بهره‌وری فیزیکی آب $0/001846$ کیلوگرم بر مترمکعب و میزان بهره‌وری اقتصادی آب 100970 ریال بر هر مترمکعب گزارش کردند. بیشترین بهره‌وری مصرف آب مربوط به شهرستان زاوه به میزان $0/001669$ کیلوگرم بر مترمکعب و کم‌ترین آن مربوط به شهرستان گناباد به میزان $0/001076$ کیلوگرم بر مترمکعب است. در نتایج حاصل از بهره‌وری با باران مؤثر نسبت به حالت بدون بارندگی مؤثر، کاهش جزئی وجود دارد. شکل ۴ بیانگر مقایسه مصرف آب در شهرستان‌های مورد مطالعه با باران مؤثر و بدون باران مؤثر است.



شکل ۴. مقایسه بهره‌وری مصرف آب در شهرستان‌های مورد مطالعه با باران مؤثر و بدون باران مؤثر

نیاز خالص آبیاری بر اساس داده‌های سال انجام تحقیق و داده‌های ده‌ساله اخیر

با کسر باران مؤثر (Re) از تبخیر و تعرق زعفران (ETC) نیاز خالص آب آبیاری، با استفاده از داده‌های سال انجام تحقیق و داده‌های ده‌ساله محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که در هر سه شهرستان مورد مطالعه، نیاز خالص در سال انجام تحقیق از نیاز خالص محاسبه شده با داده‌های ده‌ساله اخیر بیشتر است و بیشترین نیاز خالص آب آبیاری مربوط به شهرستان گناباد است بطوریکه نیاز خالص در شهرستان گناباد در سال جاری $471/5$ میلی‌متر و بر اساس داده‌های ده‌ساله اخیر $394/5$ میلی‌متر است. مقادیر مورد بحث در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. نیاز خالص آبیاری زعفران بر اساس داده‌های سال انجام تحقیق و داده‌های ده‌ساله اخیر (برحسب mm)

شهرستان	تبخیر و تعرق سال جاری	باران مؤثر سال جاری	نیاز خالص سال جاری	تبخیر و تعرق ده‌ساله	باران مؤثر ده‌ساله	نیاز خالص ده‌ساله
زاوه و تربت‌حیدریه	۴۸۲/۶	۱۲۹/۲	۳۵۳/۴	۴۰۳/۸	۱۵۹/۵	۲۴۴/۳
گناباد	۶۷۶/۰	۸۷/۲	۵۸۸/۷	۴۷۱/۵	۷۷/۰	۳۹۴/۵

راندمان کاربرد بر اساس آمار یک‌ساله و ده‌ساله

با توجه به نیاز خالص آب آبیاری با توجه به حجم آب مصرفی، راندمان کاربرد در هر یک از شهرستان‌های مورد مطالعه بر اساس داده‌های سال انجام تحقیق و داده‌های ده‌ساله محاسبه شد (جدول ۴). راندمان کاربرد بر اساس آمار سال جاری در شهرستان تربت‌حیدریه و زاوه به ترتیب

برابر با ۷۱ و ۷۳ درصد است و در شهرستان گناباد این مقدار به بیش از ۱۰۰ درصد یعنی در حدود ۱۳۰ درصد رسیده است علت این امر به دلیل کم آبیاری شدید به دلیل خشک شدن منابع آب و افزایش نیاز خالص آب آبیاری بر اثر گرمای بیش از حد در سال جاری است. راندمان کاربرد بر اساس آمار ده ساله در شهرستان های زاوه، تربت حیدریه و گناباد به ترتیب برابر با ۵۱، ۴۹ و ۸۷ درصد به دست آمد که با نتایج به دست آمده توسط عباسی و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد.

جدول ۴. راندمان کاربرد بر اساس آمار یک ساله و ده ساله هواشناسی در شهرستان های مورد مطالعه

شهرستان	حجم آب مصرفی (متوسط وزنی)	نیاز خالص بر اساس آمار ده ساله	نیاز خالص بر اساس آمار یک ساله	راندمان کاربرد (آمار ده ساله)	راندمان کاربرد (آمار یک ساله)
زاوه	۴۸۱۶	۲۴۴۳	۳۵۳۴	۵۱	۷۳
تربت	۴۹۷۴	۲۴۴۳	۳۵۳۴	۴۹	۷۱
گناباد	۴۵۱۷	۳۹۴۰	۵۸۸۷	۸۷	۱۳۰

حجم کل آب آبیاری و متوسط حجم آب آبیاری زعفران

حجم آب آبیاری اندازه گیری شده و سطح زیر کشت زعفران در شهرستان های مورد مطالعه در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به حجم آب آبیاری و سطح زیر کشت، متوسط وزنی حجم آب آبیاری ۴۲۹۶ مترمکعب در هکتار به دست آمد. حجم کل آب آبیاری در شهرستان های زاوه، تربت حیدریه و گناباد به ترتیب ۵۰/۱۷۴، ۳۷/۱۰۲ و ۱۶/۲۶۱ میلیون مترمکعب به دست آمد. همان طور که ملاحظه می شود، بیشترین حجم آب در شهرستان زاوه برای کشت زعفران مصرف شده است. یعقوبی و همکاران (۱۳۹۴) میزان آب مصرفی زعفران در مزارع مختلف شهرستان قاین را بین ۳۶۵۸ تا ۴۸۳۲ مترمکعب بر هکتار گزارش نموده اند.

جدول ۴. متوسط حجم آب آبیاری اندازه گیری شده و سطح زیر کشت شهرستان های مورد مطالعه

شهرستان	متوسط حجم آب آبیاری (m ³ /ha)	سطح زیر کشت (ha)	حجم کل آب آبیاری (میلیون مترمکعب)
زاوه	۴۲۷۵	۱۱۷۶۰	۵۰/۲۷۴
تربت حیدریه	۴۲۳۳	۸۷۶۵	۳۷/۱۰۲
گناباد	۴۵۱۷	۳۶۰۰	۱۶/۲۶۱

بحث

خشک سالی و کم آبی در ایران یک واقعیت اقلیمی است و با توجه به روند روزافزون نیاز بخش های مختلف به آب، مشکل خشک سالی در سال های آینده حادث تر نیز خواهد شد. در چنین شرایطی یکی از راهکارهای مؤثر و عملی استفاده بهینه و صرفه جویی در مصرف آب است. مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی که بخش عمده ای از مصارف آب در ایران و جهان را نیز شامل می شود، می تواند بسیار مؤثر و راهگشا باشد. تخمین نسبتاً دقیق و یا تعیین شاخص های مدیریت مصرف آب از جمله مقدار آب کاربردی، راندمان آبیاری و بهره وری آب محصولات زراعی و باغی مختلف در کشور از مهم ترین ابزارها و شاخص های کلیدی در برنامه ریزی های کلان مربوط به تأمین، تخصیص و مصرف اصولی از آب در بخش های مختلف از جمله کشاورزی است.

بنابراین، هدف اصلی از این طرح تحقیقاتی، اندازه‌گیری مستقیم و مزرعه‌ای آب آبیاری زراعت زعفران تحت مدیریت کشاورزان است. بدین ترتیب، حجم آب مصرف‌شده برای تولید زعفران در شهرستان‌های عمده استان خراسان رضوی (ترت‌حیدریه، زاوه و گناباد) در ۱۸ پرسشنامه اندازه‌گیری شد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق نشان داد که در آبیاری کشت زعفران، از بین سه روش آبیاری سطحی، رول لاین و پیفلکس، کشاورزان مناطق مورد مطالعه با روش پیفلکس کم‌ترین حجم آب آبیاری و با روش سطحی بیشترین حجم آب آبیاری را به گیاه می‌دهند. زیرا نتایج نشان داد که بیشترین حجم آب آبیاری زعفران متعلق به آبیاری سطحی و کم‌ترین آن مربوط به آبیاری پیفلکس است. از طرفی بیشترین عملکرد زعفران در آبیاری با لوله‌های پیفلکس به میزان ۷/۴ کیلوگرم در هکتار و کم‌ترین عملکرد در آبیاری سطحی به میزان ۶ کیلوگرم بر بود. در نتیجه بیشترین بهره‌وری مصرف آب به میزان ۰/۰۰۱۹۸ کیلوگرم بر مترمکعب در آبیاری با لوله‌های پیفلکس و کم‌ترین بهره‌وری در روش آبیاری سطحی به میزان ۰/۰۰۱۲۹ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد.

مقایسه حجم آب آبیاری زعفران در سه شهرستان مورد مطالعه زاوه، گناباد و ترت‌حیدریه نشان می‌دهد که بیشترین حجم آب آبیاری زعفران متعلق به شهرستان ترت‌حیدریه و کم‌ترین آن مربوط به گناباد است. از طرفی بیشترین عملکرد زعفران در شهرستان‌های زاوه و ترت‌حیدریه و کم‌ترین عملکرد در گناباد مشاهده شد. در مجموع، بیشترین بهره‌وری مصرف آب در شهرستان زاوه به میزان ۰/۰۰۱۷۱۴ کیلوگرم بر مترمکعب و کم‌ترین بهره‌وری در گناباد به میزان ۰/۰۰۱۱۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب حاصل شد. بهره‌وری مصرف آب در ترت‌حیدریه برابر با ۰/۰۰۱۷۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد.

راندمان کاربرد بر اساس آمار سال جاری در شهرستان ترت‌حیدریه، زاوه و گناباد به ترتیب برابر با ۷۱، ۷۳ و ۱۳۰ درصد و بر اساس آمار ده‌ساله به ترتیب برابر با ۴۹، ۵۱ و ۸۷ درصد به دست آمد. با توجه به حجم آب آبیاری و سطح زیر کشت، متوسط وزنی حجم آب آبیاری ۴۲۹۶ مترمکعب در هکتار به دست آمد. حجم کل آب آبیاری در شهرستان‌های زاوه، ترت‌حیدریه و گناباد به ترتیب ۵۰/۱۷۴، ۳۷/۱۰۲ و ۱۶/۲۶۱ میلیون مترمکعب به دست آمد.

منابع

- ابریشمی، محمد حسن. (۱۳۶۶). شناخت زعفران. انتشارات توس.
- احمدی، محسن، خاشعی سیوکی، عباس، و سیاری، محمد حسن. (۱۳۹۵). بررسی مدل مناسب تعیین نیاز آبی زعفران (*Crocus sativus* L) و تعیین میزان تنش‌های آبی وارده. نشریه علمی- پژوهشی بوم‌شناسی کشاورزی، ۸(۴)، ۵۰۵-۵۲۰.
<https://dx.doi.org/10.22067/jag.v8i4.40517>
- جعفرزاده، احمد، خاشعی سیوکی، عباس، و شهیدی، علی. (۱۳۹۴). مدلسازی اثرات تغییر اقلیم روی نیاز آبی زعفران در خراسان جنوبی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی. نشریه پژوهش‌های زعفران، ۳(۲)، ۱۷۴-۱۶۳-۲۹۲.
<https://dx.doi.org/10.22077/jsr.2015.292.163-174>
- رجبی، زهره، غیور، حسنعلی، بهیار، محمدباقر، عزتیان، ویکتوریا، و گندم‌کار، امیر. (۱۳۹۴). محاسبه تبخیر و تعرق زعفران با استفاده از پهن‌مونتیت و نیاز آبی در استان اصفهان. مجله تحقیقات جغرافیایی، ۳۰(۱)، ۲۵۲-۲۳۹.
<http://georesearch.ir/article-1-658-fa.html>
- شمس‌آبادی، وحید، محمدیان فر، افسانه، و عبدی، سعید. (۱۳۹۴). بررسی بهره‌وری مصرف آب در محصول زعفران (مطالعه موردی شهرستان باخرز). اولین همایش ملی مدیریت کشاورزی با کاربرد الگوی زراعی، همدان. <https://civilica.com/doc/478203>
- صادقی طیس، صادق، خاشعی سیوکی، عباس، پور رضا بیلوندی، محسن، و هاشمی، سید رضا. (۱۳۹۵). تأثیر معیارهای اجتماعی، سیاسی و اقتصادی در بهینه‌سازی الگوی کشت زعفران با استفاده از الگوریتم جهش ترکیبی قورباغه. نشریه پژوهش‌های زعفران، ۳(۲)، ۱۳۳-۱۳۳.
<https://dx.doi.org/10.22077/jsr.2015.289.133>

- عباسی، فریبرز، سهراب، فرحناز، و عباسی، نادر. (۱۳۹۵). ارزیابی راندمان آب آبیاری در ایران. نشریه تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۷، (۶۷)، ۱۲۸-۱۱۳. <https://dx.doi.org/10.22092/aridse.2017.109617>
- علیزاده، امین، ساری، نسرین، احمدیان، جواد، و محمدیان، آزاده. (۱۳۸۸). بررسی مناسب‌ترین زمان شروع آبیاری زراعت زعفران در استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی. مجله آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۳(۱)، ۱۱۸-۱۰۹. <https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.1539>
- فلاح قاله‌ری، غلام عباس، و احمدی، حمزه. (۱۳۹۴). برآورد آستانه‌های فنولوژیکی کشت زعفران در استان اصفهان براساس آمار درجه حرارت روزانه. نشریه علمی پژوهشی زراعت و فناوری زعفران، ۳(۱)، ۶۵-۴۹. <https://dx.doi.org/10.22048/jsat.2015.9612>
- کمبته تدوین برنامه راهبردی زعفران. (۱۳۸۸). برنامه راهبردی زعفران. سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی.
- کوچکی، علیرضا، رضوانی مقدم، پرویز، فلاحی، حمیدرضا، و اقحوانی شجری، مهسا. (۱۳۹۵). بررسی خصوصیات بنه‌های دختری زعفران (*L. Crocus sativus*) در پاسخ به تاریخ کاشت، مدیریت آبیاری و کاشت گیاهان همراه. نشریه علمی- پژوهشی زراعت و فناوری زعفران، ۴(۱)، ۱۸-۳. <https://dx.doi.org/10.22048/jsat.2016.11895>
- کیخا مقدم، پریسا، کامگار حقیقی، علی اکبر، سپاسخواه، علی رضا، و شاهرخ زند، پارسا. (۱۳۹۲). تعیین ضریب گیاهی یگانه، دوگانه و تبخیر- تفرق بالقوه گیاه زعفران تکامل یافته. نشریه علمی هواشناسی کشاورزی، ۱(۱)، ۱۳-۱. http://www.agrimet.ir/article_87663.html
- مسافری ضیاءالدینی، حسن. (۱۳۸۰). اثر رژیم‌های مختلف آبیاری بر عملکرد زعفران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی. دانشگاه فردوسی مشهد.
- یعقوبی، فاطمه، جامی ال احمدی، مجید، بخشی، محمدرضا، و سیاری زهان، محمد حسن. (۱۳۹۴). مقایسه شاخص‌های کارایی فنی و اقتصادی مصرف آب در تولید گندم و زعفران در شهرستان قاینات. نشریه علمی- پژوهشی زراعت و فناوری زعفران، ۴(۳)، ۲۳۶-۲۲۵. <https://dx.doi.org/10.22048/jsat.2015.11898>

References

- Abbasi, F., Sohrab, F., & Abbasi, N. (2017). Evaluation of Irrigation Efficiencies in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17(67), 113-120. <https://dx.doi.org/10.22092/aridse.2017.109617> [Persian]
- Abrishami, M.H. (1987). Recognition of saffron. Tus Publications. [In Persian]
- Ahmadi, M., Khashei Siuki, A., & Sayyari, M. (2016). Comparison of Efficiency of Different Equations to Estimate the Water Requirement in Saffron (*Crocus sativus* L. (Case Study: Birjand Plain, Iran)). *Journal of Agroecology*, 8(4), 505-520. <https://dx.doi.org/10.22067/jag.v8i4.40517> [In Persian]
- Alizadeh, A., Sayari, N., Ahmadian, J., & Mohamadian, A. (2009). Study for zoning the most appropriate time of irrigation of saffron (*Crocus Sativus*) in Khorasan Razavi, north and southern provinces. *Water and Soil*, 23 (1), 109-118. <https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.1539> [In Persian]
- Behdani, M.A., Nassiri Mahallati, M., & Koocheki, A. (2008). Evaluation of Irrigation Management of Saffron at Agroecosystem Scale in Dry Region of Iran. *Asian Journal of Plant Sciences*, 7(1), 22-25. <https://dx.doi.org/10.3923/ajps.2008.22.25>
- Fallahghalghary, G., & Ahmadi, H. (2015). The estimation of phenological thresholds of Saffron cultivation in Isfahan province based on the daily temperature statistics. *Saffron agronomy and technology*, 3(1), 49-65. <https://dx.doi.org/10.22048/jsat.2015.9612> [In Persian]

- Jafarzadeh, A., Khashei-Siuki, A., & Shahidi, A. (2015). Modeling of climate change effects on saffron water requirement in south Khorasan province by GIS. *Journal of Saffron Research*, 3(2), 163-174. <https://dx.doi.org/10.22077/jsr.2015.292> [In Persian]
- Koocheki, A., Moghaddam, P., Fallahi, H., & Aghhavani-Shajari, M. (2016). The Study of Saffron (*Crocus Sativus L.*) Replacement Corms Growth in Response to Planting Date, Irrigation Management and Companion Crops. *Saffron agronomy and technology*, 4(1), 3-18. <https://dx.doi.org/10.22048/jsat.2016.11895> [In Persian]
- Keykhamoghadam, P., Kamgar Haghghi, A., Sepaskhah, A., & Shahrokh Zand, P. (2013). Determination of Single and Dual Crop Coefficients and Potential Evapotranspiration of Developed Saffron. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1(1), 1-13. http://www.agrimet.ir/article_87663.html [In Persian]
- Mosaferi Zia Al-Dini, H. (2001). The effect of different irrigation regimes on saffron yield. Master Thesis in Irrigation and Drainage. Ferdowsi University of Mashhad. [In Persian]
- Rajabi, Z., Behyar, M.B., Ghayoor, H.A., Ezatian, V., & Gandomkar, A. (2015). Estimation saffron evapotranspiration by Penman Monteith method and it s Water require in Isfahan province. *GeoRes*, 30 (1), 239-252. <http://georesearch.ir/article-1-658-fa.html> [In Persian]
- Sadeghi Tabas, S., Khashei Siuki, A., Pourreza Bilondi, M., & Hashemi, S. (2015). Effects of social, political and economic criteria on optimization of saffron cropping pattern by using shuffled frog leaping algorithm. *Journal of Saffron Research*, 3(2), 123-133. <https://dx.doi.org/10.22077/jsr.2015.289> [In Persian]
- Saffron Strategic Plan Development Committee. (2009). Saffron Strategic Plan. Agricultural Education and Extension Research Organization, Agricultural Research and Training Center and Natural Resources of Khorasan Razavi. [In Persian]
- Sepaskhah, A.R., & Yarami, N. (2009). Interaction effects of irrigation regime and salinity on flower yield and growth of saffron. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 84(2), 216-222. <https://doi.org/10.1080/14620316.2009.11512507>
- Shamsabadi, W., Mohammadian Far, A., & Abdi, S. (2015). Investigation of water consumption efficiency in saffron product (case study of Bakhrez city). The first national conference on agricultural management using the agricultural model. Hamedan. <https://civilica.com/doc/478203> [In Persian]
- Yaqobi, F., Jami Al-Ahmadi, M., Bakhshi, M.R., & Sayari Zahan, M.H. (2015). Comparison of technical and economic efficiency indicators of water consumption in wheat and saffron production in Ghaenat city. *Journal of Saffron Agriculture and Technology*, 3(4), 225 - 237. <https://dx.doi.org/10.22048/jsat.2015.11898> [In Persian]
- Yarami, N., Kamgar-Haghghi, A.A., Sepaskhah, A.R., & Zand-Parsa, Sh. (2011). Determination of the potential evapotranspiration and crop coefficient for saffron using a water-balance. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 57(7), 727-740. <https://doi.org/10.1080/03650340.2010.485985>



Sediment rating curve estimation using robust regression

Meysam Salarijazi¹ , Khalil Ghorbani² , Mohammad Abdolhosseini³ , Amir-Ahmad Dehghani⁴ 

¹ Corresponding Author, Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: meysam.salarijazi@gmail.com

² Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: ghorbani.khalil@yahoo.com

³ Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: abdolhosseini@gau.ac.ir

⁴ Professor, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: amirahmad.dehghani@yahoo.com

ABSTRACT

Introduction

The sediment rating curve only requires river discharge data to estimate the suspended sediment load of the river; its equation form is simple and understandable. The mentioned characteristics of the sediment rating curve have led to this method being the most widely used model for estimating the suspended sediment load. Application of sediment rating curve often faced with a high error in the estimation of suspended sediment load; therefore, different studies have been done to reduce this limitation. The most common reform in sediment rating curve has been applied in providing correction factors, but in this study, different estimations of sediment rating curve coefficients using robust estimators have been evaluated. In this study, we assumed that the available data had good accuracy and robust regression can improve the precision of estimates of sediment rating curve. This research aims to apply and assess robust least trimmed square and MM estimation for sediment rating curve's coefficients estimations and compare the results against the application of conventional ordinary least square methods.

Methodology

Estimation of the river sediment load has an essential role in the environmental management of watersheds. Different hydraulic and hydrologic methods have been developed to estimate the sediment load in rivers. However, the sediment rating curve method is widespread considered because of its simple calculation and easy understanding. River suspended sediment load estimation is faced with a high level of error. Like other methods of sediment load estimation, the suspended sediment rating curve method has these limitations. Improving the suspended sediment load estimation can lead to higher reliability of the access to information in environmental and hydrological planning. Application of robust estimations can improve sediment rating curve estimation considering the impact of outliers in the conventional application of ordinary least square estimation of sediment rating curve. Four hydrometry data series were used to investigate the effect of conventional ordinary least square error estimation and MM and least trimmed square robust estimations. Different estimations (considering numerical precision criteria) in four data series are compared.

Results and discussion

Comparison of different estimations for investigated hydrometric recorded data is interpreted using numerical goodness of fit criteria, i.e., RMSE and MAE. The best estimates are MM considering coefficient of determination and least trimmed square assessing MAE, while ordinary least square estimation has the best precision of fitness based on RMSE. Investigation of estimated regression lines using different estimators shows that robust estimation results can be similar or different in comparison with ordinary least square estimation. Also, robust estimation improved suspended sediment load for high discharge values in some cases. In other cases, it led to a decrease in estimation precision for high discharge values and an increase in precision for low discharge values.

Conclusions

The robust regressions, i.e., least trimmed square and MM, can improve ordinary least square estimation in sediment rating curve analysis. The estimated sediment rating curve using robust regression can be led to similar results, overestimation, or underestimation in comparison with the ordinary least square application.

Keywords: Sediment Rating Curve, Estimation, Ordinary Least Squares (OLS), Least Trimmed Square (LTS), MM.

Article Type: Research Article

Article history: Received: 06 February 2022 Revised: 15 April 2022 Accepted: 30 April 2022 ePublished: 29 May 2022

Cite this article: Salarijazi, M., Ghorbani, Kh., Abdolhosseini, M & Dehghani, A.A. (2022). Sediment rating curve estimation using robust regression, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(1), 52-66. DOI: 10.22126/atwe.2022.7472.1013





بر آورد منحنی سنجه رسوب با استفاده از رگرسیون استوار

میثم سالاری جزی^۱✉، خلیل قربانی^۲، محمد عبدالحسینی^۳، امیر احمد دهقانی^۴

^۱ نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه:

meysam.salarijazi@gmail.com

^۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: ghorbani.khalil@yahoo.com

^۳ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: abd.phd@gmail.com

^۴ استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: amirahmad.dehghani@yahoo.com

چکیده

تخمین بار رسوب معلق یکی از اقدامات اولیه برای مدیریت و برنامه ریزی منابع آب و محیط زیست است. رویکردهای تخمین بار رسوب معلق را می توان به دودسته رویکرد هیدرولیکی و هیدرولوژیکی تقسیم بندی کرد. رویکرد هیدرولیکی در اغلب موارد دارای دقت بیشتری نسبت به رویکرد هیدرولوژیکی است اما نیازمند داده ها و اطلاعات بیشتر است که دسترسی به این اطلاعات و داده ها در اکثر فعالیت های عملی محدود است. رویکرد هیدرولوژیکی به دلیل آنکه نیاز به داده های کمتری دارد و ساده تر است بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. منحنی سنجه رسوب شناخته شده ترین روش در رویکرد هیدرولوژیکی برای تخمین بار رسوب معلق است که یک فرم رابطه توانی (یا فرم خطی بر اساس داده های تبدیل لگاریتمی شده) است که بار رسوب معلق را به دبی جریان رودخانه مرتبط می سازد. روش متداول تعیین منحنی سنجه استفاده از برآورد حداقل مربعات معمولی است که این برآورد به شکل مؤثر تحت تأثیر داده های پرت قرار می گیرد. روش های برآورد نیرومند روش های آماری هستند که برای غلبه بر محدودیت های برآورد حداقل مربعات معمولی توسعه پیدا کرده اند. در این تحقیق کاربرد دو برآورد MM و حداقل مربعات پیراسته برای تعیین منحنی سنجه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با روش متداول حداقل مربعات معمولی مقایسه شده است. برای مقایسه این سه برآوردگر از داده های چهار ایستگاه هیدرومتری باغ، انگ دره، انجیراب و جفانکده در استان گلستان استفاده شده که دارای ۳۳ تا ۲۷۹ جفت داده ثبت شده هستند. از معیارهای ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین قدر مطلق خطا به عنوان معیارهای آماری در کنار معیار گرافیکی برای مقایسه نتایج استفاده شده است. بررسی معیارهای آماری دقت برازش نشان داد که معادلات تخمین زده شده از برآوردهای رگرسیون استوار کارایی مناسبی دارند و دارای این قابلیت هستند که تخمین حاصل از کاربرد برآورد حداقل مربعات معمولی را بهبود دهند. بررسی گرافیکی نتایج نشان می دهد که برآوردهای رگرسیون استوار می توانند مشابه یا متفاوت با برآورد حداقل مربعات معمولی باشند.

کلمات کلیدی: منحنی سنجه رسوب، برآورد، حداقل مربعات معمولی، حداقل مربعات پیراسته، MM.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۷ بهمن ۱۴۰۰ اصلاح: ۲۶ فروردین ۱۴۰۱ پذیرش: ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۱ چاپ الکترونیکی: ۰۸ خرداد ۱۴۰۱

استناد: سالاری جزی، م، قربانی، خ، عبدالحسینی، م، و دهقانی، ا.ا. (۱۴۰۱). برآورد منحنی سنجه رسوب با استفاده از رگرسیون استوار، فناوری های پیشرفته در

بهره وری آب، ۳(۱)، ۵۲-۶۶، شناسه دیجیتال: 10.22126/atwe.2022.7472.1013



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

از آنجاکه خسارات وارده توسط رسوبات رودخانه‌ای به طبیعت، کشاورزی و سازه‌های آبی ساخته شده در حریم رودخانه‌ها بسیار گسترده و وسیع و زیان‌آور است، برآورد صحیح کمی آن از اهداف مهم محققین و مهندسان در این رابطه است. فرسایش، انتقال رسوب، و رسوب‌گذاری از مباحث بسیار مهم در مدیریت حوزه‌های آبریز هستند. این مسائل را می‌توان با برقراری و توسعه برنامه‌های اندازه‌گیری مقدار رسوب انتقالی در رودخانه‌ها مورد بررسی قرار داد. اخیراً از دیدگاه زیست‌محیطی، نقش رسوبات معلق در انتقال عناصر غذایی، سموم و همچنین نشاء یا بی‌رسوبات و آلاینده‌های غیر نقطه‌ای مورد توجه بیشتری قرار گرفته و ارزش و اهمیت این داده‌ها را دوچندان کرده است. رسوبات رودخانه‌ای به دو صورت منتقل می‌شوند. یا این مواد درون جریان آب غوطه‌ور هستند و همراه با آب در حرکت هستند که به آن‌ها مواد رسوبی معلق گفته می‌شود و به میزان مواد رسوبی معلق را که در واحد زمان از یک مقطع رودخانه عبور کند، بار معلق می‌نامند، یا اینکه به یکی از صور لغزش، غلتیدن، پرش حرکت می‌نمایند که به آن‌ها بار بستر می‌گویند. روش اندازه‌گیری بار معلق که بر پایه اندازه‌گیری غلظت رسوب معلق و دبی جریان استوار است، روشی مطمئن ولی مستلزم اندازه‌گیری پیوسته است که معمولاً تنها بر ای رودخانه‌های مهم و دائمی مقدور است. از آنجائیکه بسیاری از حوزه‌های آبریز در اکثر کشورها از جمله ایران فاقد ایستگاه‌هایی برای رسوب سنجی پیوسته و منظم هستند، استفاده از مدل‌های تجربی و روش‌های آماری برآورد رسوب معلق انتقالی رودخانه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. مدل‌های منحنی سنج که روشی با قابلیت درون‌یابی و نیز برون‌یابی تلقی می‌شوند از روش‌های آماری برآورد رسوب معلق محسوب می‌شود. در مدل‌های منحنی سنج ارقام محدود مربوط به اندازه‌گیری‌های غلظت رسوب در طول دوره زمانی مورد دلخواه از طریق ایجاد رابطه مابین دبی رسوب و دبی رودخانه و تعمیم این رابطه به آمار جریان رودخانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در عین حال برآورد رسوب از طریق این معادله همواره با مقداری خطا همراه است. با توجه به محدودیت‌های روابط تجربی (آماری) بین دبی جریان رودخانه و بار رسوب معلق و نیز خطاهای متداول در این روش ضروری است رویکردهای بهبود این گونه از روش‌ها مورد بررسی قرار بگیرد.

رسوب و بار رسوبی بخش مهمی از مطالعات منابع آب را تشکیل می‌دهد. انتقال رسوب با تأثیرات مختلف بر رودخانه‌ها، مخازن، سیلاب‌دشت‌ها، محیط‌های اکولوژیکی و فرآیندهای زیست‌محیطی مورد بررسی محققین در زمینه‌های مختلف قرار گرفته است. بررسی‌های علمی در مورد انتقال رسوب معلق رودخانه‌ها قدمت زیادی دارد و در طی این مدت تکنیک‌ها و روش‌های اندازه‌گیری رسوب نیز توسعه و تکامل پیدا نمود. در زمینه برآورد بار رسوبی مطالعات زیادی انجام شده است. شاید بتوان در یک دسته‌بندی کلی این مطالعات را در دسته تحلیل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی جای داد. تحلیل‌های هیدرولیکی نیازمند به پارامترهای بیشتری برای محاسبات هستند و به همین دلیل نیازمند صرف زمان و هزینه بیشتر نسبت به روش‌های هیدرولوژیکی هستند. شاید بتوان گفت به دلایل محدودیت‌های روش‌های هیدرولیکی، اهمیت روش‌های هیدرولوژیکی نسبت به روش‌های هیدرولیکی در برآورد بار رسوب معلق رودخانه‌ها بیشتر است. دلیل این امر این است که روش‌های هیدرولوژیکی نسبت به روش‌های هیدرولیکی در عمل برای محاسبه ساده‌تر هستند و نیاز به صرف هزینه و زمان کمتری دارند و یک برآورد مناسب ارائه می‌کنند. به علت اهمیت روش‌های هیدرولوژیکی تحقیقات زیادی بر این زمینه متمرکز شده است و روش‌های پیشنهادی با در نظر گرفتن ضرایب اصلاحی متنوع منجر به بهبود روش‌های هیدرولوژیکی شده است. با توجه به محدودیت‌های نظری روش‌های متداول هیدرولوژیکی این تحقیق تلاش می‌کند تا در رویکردی متفاوت، روش رگرسیون استوار را در برآورد منحنی سنج برآورد بار رسوب معلق ارزیابی کند.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در زمینه بکارگیری منحنی سنج رسوب در برآورد مقدار بار رسوب معلق تحقیقات متفاوتی در نقاط مختلف دنیا انجام شده است. فرگوسن^۱ (۱۹۸۷) در تحقیقات خود نشان داده است که مدل منحنی سنج توانی بار رسوب معلق را حدود ۵۰ درصد کمتر از مقدار واقعی آن برآورد می‌کند. هرویتز^۲ (۲۰۰۲) با بررسی داده‌های متعلق به رودخانه میسیسیپی به این نتیجه رسید که کاربرد منحنی سنج برای تخمین بار رسوب منجر به برآورد کمتر از میزان واقعی می‌شود و هرچه طول دوره آماربرداری بیشتر و فواصل بین اندازه‌گیری‌ها

¹ Ferguson

² Horowitz

کمتر باشد مقادیر خطا در برآورد بار رسوب کمتر خواهد شد. اولیون و آچیت^۱ (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای دیگر نشان دادند که مقادیر پیش‌بینی شده بار رسوب معلق با استفاده از روابط رگرسیونی ۲۰ تا ۲۵ درصد بیشتر از مقادیر واقعی است، نیز طبق داده‌های در دسترس برآورد دقیق‌تر نیاز به دوره‌های طولانی مدت ثبت داده دارد و در ادامه پیشنهاد دادند تغییرات آب و هوایی نیز در تخمین بار رسوب معلق در نظر گرفته شود. صادقی و همکاران (۲۰۰۸) در ارزیابی و تفسیر منحنی‌های سنجه رسوب برای یک منطقه جنگل کاری شده در ژاپن و با بکارگیری داده‌های ثبت شده نشان داده‌اند، استفاده از تبدیل ریشه چهارم داده‌های دبی جریان و بار رسوب معلق در منحنی سنجه رسوب عملکرد مناسبی داشته و استفاده از این مدل برای برآورد رسوب و جریان دبی رودخانه‌ها در مناطق کوچک موفق ارزیابی نمودند. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که ارتباط بین بار رسوب معلق و دبی جریان به عواملی مانند شرایط فیزیکی منطقه و خصوصیات خاک منطقه جنگل کاری شده بستگی داشته است.

اریب منحنی سنجه از دو عامل منشأ می‌گیرد. عامل اول به علت تغییر شکل معادله از حالت لگاریتمی به حالت طبیعی مدل رگرسیون خطی است که در اصل مربوط به ذات منحنی سنجه است. عامل دوم اریب، ناشی از عمل برون‌یابی برای برآورد رسوب دبی‌های بالاست که در ارتباط با کمیت و کیفیت داده‌ها بوده و باعث می‌شود رسوب برآوردی خطای زیادی داشته باشد (آیدانزا و ناپلیتانو، ۲۰۰۶). در این زمینه تحقیقات متمرکز بر ارائه ضرایب اصلاحی بوده است. در تحقیقی روش فائو توسط جونز و همکاران (۱۹۸۱) برای تعدیل ارقام و نزدیک کردن مقادیر محاسباتی به مقادیر مشاهده‌ای برای مناطق خشک و نیمه‌خشک مطرح شده است. در این روش ضریب اول منحنی سنجه رسوب اصلاح می‌شود. همچنین روش تخمین گر شبه بیشینه درست‌نمایی توسط فرگوسن (۱۹۸۷) برای اصلاح اثر تبدیل لگاریتمی با فرض توزیع نرمال خطاهای باقی‌مانده به کار گرفته شده است و بیش‌تر در مورد اریب منفی ذاتی منحنی سنجه به کاربرده می‌شود. روش اصلاح‌گر توسط دوآن^۳ (۱۹۸۳) در مورد برازش جذر مربع و یا جذر مکعب داده‌ها استفاده می‌شود. این روش که به ضریب اصلاحی غیر پارامتری نیز معروف است با رد توزیع نرمال خطاهای باقی‌مانده، برای حذف اریبی داده‌ها ارائه شده است. برآوردگر ناریب با حداقل واریانس توسط کوهن و همکاران^۴ (۱۹۸۹) برای برازش لگاریتم خطی ارائه شده است. در این روش برای هر یک از مقادیر دبی رسوب مشاهده‌ای، یک ضریب اصلاحی محاسبه می‌شود و میانگین آن‌ها به عنوان ضریب اصلاحی کلی انتخاب می‌گردد. همچنین کائو و همکاران^۵ (۲۰۰۵) برای تصحیح منحنی‌های سنجه رسوب در رودخانه‌های تایوان از یک ضریب اصلاحی بر مبنای تحلیل باقی‌مانده‌ها استفاده کرده‌اند. تحقیقات اشاره شده از تحقیقات پایه و مبنای در این بخش هستند که تأکید بر برآورد منحنی سنجه رسوب دارند و بنابراین لازم است تلاش شود تا نتیجه هر یک از اصلاحات فوق بر ارزیابی بار رسوب سالانه مورد بررسی قرار گیرد. سالاری جزی و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر کاربرد روش‌های شبه بیشینه درست‌نمایی و ضریب اصلاحی را در بهبود برآورد منحنی سنجه رسوب در سری داده‌های منتخب در استان گلستان مورد بررسی قرار داده و بهبود عملکرد منحنی سنجه رسوب تحت تأثیر کاربرد روش‌های بیان شده را نتیجه‌گیری نموده‌اند. مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن، شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی در مقایسه با منحنی سنجه رسوب جهت تخمین بار رسوب معلق و با به‌کارگیری داده‌های بلندمدت رودخانه تالار مورد ارزیابی قرار گرفت (امام‌قلی زاده و کریمی، ۲۰۱۹). نتایج این مطالعه بیانگر برآوردهای قابل اطمینان مدل‌های هوش مصنوعی بخصوص برنامه‌ریزی بیان ژن در مقایسه با منحنی سنجه رسوب بوده است.

طبق بررسی‌های انجام شده توسط محققین این مطالعه کاربرد روش‌های رگرسیون استوار در مطالعات مهندسی آب و محیط‌زیست بسیار محدود بوده است و تاکنون مطالعه‌ای در مورد کارایی این روش در بهبود احتمالی تخمین بار رسوب معلق رودخانه انجام نشده است. بنابراین در این مطالعه کاربرد و بررسی دو روش متفاوت از رویکرد رگرسیون استوار در مقایسه با منحنی سنجه متداول، برای تخمین بار رسوب معلق را می‌توان به عنوان مهم‌ترین نوآوری تحقیق در نظر گرفت. با توجه به مطالب بیان شده می‌توان به طور خلاصه اهداف تحقیق را به صورت موارد ذیل برشمرد: مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه منحنی سنجه رسوب، بررسی و تخمین منحنی سنجه رسوب با استفاده از تبدیل داده‌ها و برآورد متداول حداقل مربعات معمولی، بررسی و تخمین منحنی سنجه رسوب با استفاده از

¹ Achite & Ouillon

² Iadanza & Napolitano

³ Duan

⁴ Cohn et al

⁵ Kao et al

تبدیل داده‌ها و برآورد استوار MMM، بررسی و تخمین منحنی سنج رسوب با استفاده از تبدیل داده‌ها و برآورد استوار حداقل مربعات پیراسته و مقایسه نتایج برآورد مدل خطی منحنی سنج رسوب در برآوردهای مختلف حداقل مربعات معمولی، MM و حداقل مربعات پیراسته بر اساس معیارهای عددی و همچنین گرافیکی دقت برازش.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده

مطالعه کارایی روش‌های مختلف برآورد بار رسوب معلق رودخانه نیازمند آن است که نتایج حاصل از اعمال هر یک از این روش‌ها، بر سری‌های مختلف داده‌های ثبت‌شده که دارای ویژگی‌های مختلف هیدرولوژیکی و آماری است، بررسی گردد. بدین منظور در این مطالعه از چهار سری داده ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری باغو، انجیراب، النگ دره و جفاکنده در استان گلستان استفاده شده است. مشخصه‌های هر یک از سری‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱. مشخصه‌های سری‌های داده مورد استفاده

نام ایستگاه	تعداد مشاهدات	میانگین دبی جریان (CMS)	میانگین بار رسوب معلق (Ton/Day)
باغو	۲۷۹	۰/۴۴۵۳	۱۷/۲۴۲۶
انجیراب	۳۳	۰/۴۸۱۹	۴۶/۱۹۱۸
النگ دره	۱۲۲	۰/۱۳۷۷	۰/۷۲۶۶
جفاکنده	۶۲	۰/۵۷۰۵	۵۲۷/۲۶۰۶

برآورد حداقل مربعات معمولی (تک متغیره)

یک مدل رگرسیون خطی معمولی برای متغیر مستقل X و متغیر وابسته Y به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$Y_i = \beta + \alpha x_i + e_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

که در آن Y_i متغیر تصادفی وابسته نام، β, α پارامترهای مدل رگرسیون و e_i خطای تصادفی و n تعداد جفت مشاهدات (x, y) است. دو پارامتر α و β را ضرایب رگرسیون می‌نامند که β عرض از مبدأ و α شیب خط رگرسیون است. در رگرسیون حداقل مربعات معمولی برای برآورد پارامترهای مدل، مجموع مربعات خطا (باقیمانده‌ها) و یا به عبارتی مجموع مربعات تفاوت بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر پیش‌بینی شده حداقل می‌گردد. این فرم ریاضی را می‌توان به صورت ذیل نمایش داد.

$$\min (Y - \hat{Y})^2 = \min \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (2)$$

ضرایب رگرسیون با روابط زیر برآورد می‌گردند.

$$\alpha = \frac{\sum x_i y_i - \frac{(\sum x_i)(\sum y_i)}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$\beta = \bar{y} - \alpha \bar{x} \quad (4)$$

که در روابط مذکور $\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$ و $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$ هستند. بررسی فرضیات مرتبط با باقیمانده‌های مدل معیار مهمی در تعیین صحت مدل خطی است که در اغلب موارد نادیده انگاشته می‌شود. این مفروضات عبارتند از اینکه e_i ها دارای توزیع نرمال، مستقل از یکدیگر و دارای

واریانس یکسان هستند. همچنین در صورت عدم صحت مدل خطی تعدادی مدل‌های غیرخطی ساده نیز وجود دارند که با استفاده از تبدیل‌های ریاضی به مدل خطی تبدیل می‌شوند.

برآورد حداقل مربعات پیراسته^۱

رگرسیون حداقل مربعات پیراسته یکی از روش‌های شناخته‌شده در رویکرد رگرسیون استوار است (مائس و همکاران،^۲ ۲۰۰۹-چان و همکاران،^۳ ۲۰۱۰). روش برآورد استوار حداقل مربعات پیراسته توسط روسیوف^۴ (۱۹۸۴) به فرم ذیل توسعه داده و ارائه گردید (شوماخر و همکاران،^۵ ۲۰۰۲-وام و ویداکوچ،^۶ ۲۰۰۷).

$$f = \min \sum_{i=1}^h e_i^2 \quad (5)$$

که $e_{(1)}^2, e_{(2)}^2, \dots, e_{(n)}^2$ مربعات باقیمانده‌های (خطاهای) مرتب‌شده از مقادیر کوچک به مقادیر بزرگ هستند و h باید بر اساس پیراستن مقادیر داده‌ها برآورد گردد. h ثابت پیرایش است و در بازه $(n/2 \leq h \leq n)$ قرار دارد و به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که بزرگ‌ترین $n-h$ باقیمانده نتواند برآورد مدل را تحت تأثیر قرار دهد (وام و ویداکوچ،^۶ ۲۰۰۷). با توجه به چینش داده‌های پرت و نیز مقدار h رگرسیون حداقل مربعات پیراسته می‌تواند خیلی کارآیی داشته باشد. درواقع اگر مقادیر داده‌های پرت کاملاً پیراسته شوند این روش از نظر محاسباتی معادل با رگرسیون خطی معمولی است. نیز اگر داده‌های پرت در سری داده‌ها موجود باشد که توسط رگرسیون حداقل مربعات پیراسته نتواند پیرایش شود این روش کارا و مؤثر نخواهد بود. همچنین اگر تعداد بیشتری از داده‌ها نسبت به داده‌های پرت در فرایند محاسبات پیرایش گردند در آن صورت اطلاعات مهمی در محاسبات از دست خواهد رفت (شوماخر و همکاران،^۵ ۲۰۰۲).

برآورد MM

هوبر (۱۹۷۳ و ۱۹۸۱) دسته‌ای از برآوردگرها را بانام برآوردگر M^Y توسعه داد که ایده اصلی آن جابجایی مربعات باقیمانده‌ها با تابعی دیگر از باقیمانده‌ها به‌صورت ذیل است.

$$f = \min \sum_{i=1}^n \rho(e_i^2) \quad (6)$$

که یک تابع متقارن با یک حداقل یکتا در صفر است. برآورد M با استفاده از حداقل مربعات دوباره وزن دهی شده تکراری (IRLS) محاسبه می‌شود. درروش IRLS ابتدا یک برازش اولیه محاسبه می‌شود و سپس یک مجموعه از وزن‌ها بر مبنای برازش اولیه محاسبه می‌گردد. تکرارها ادامه می‌یابد تا اینکه یک تعداد معین از تکرارها پایان پذیرد یا یک معیار همگرایی برآورده شود. برآورد MM یک نوع خاصی از برآورد M است که توسط یوهای^۹ (۱۹۸۷) توسعه داده شد. در برآورد MM یک برآورد M استوار به‌صورت ذیل است.

$$\sum_{i=1}^n \rho \left(\frac{y_i - x_i^T \beta}{s} \right); c \quad (7)$$

که s یک برآورد مقیاس استوار برای باقیمانده‌ها است و $\rho(\cdot; c)$ یک تابع وزن محدب باقیمانده‌ها با ثابت میزان‌سازی c^1 است که یک تابع خسارت محدودشده متقارن است. یک انتخاب جایگزین برای برآورد به‌صورت زیر است.

$$\sum_{i=1}^n x_i \psi \left(\frac{y_i - x_i^T \beta}{s} \right); c \quad (8)$$

¹Least Trimmed Squares (LTS)

² Maes et al

³ Chun et al

⁴ Rousseeuw

⁵ Schumacker et al

⁶ Kvam & Vidakovic

⁷M-Estimator

⁸Iteratively Reweighted Least Squares

⁹ Yohai

¹⁰ Tuning

در این رابطه ψ یک تابع یکنواخت است. برآورد MM شامل فرایند سه مرحله‌ای است. در مرحله اول یک برآوردگر تفکیک بالا استوار محاسبه می‌شود. برآورد S برای گام اول استفاده می‌شود. در گام بعدی یک برآورد M استوار با استفاده از باقیمانده برآورد S گام اول محاسبه می‌شود. در گام سوم پارامترهای نهایی برآورد M رگرسیون محاسبه می‌شود.

معیارهای دقت برازش

برای مقایسه نتایج برآوردهای مختلف نیاز به معیارهایی است تا بتوان نتایج برآوردهای مختلف را با یکدیگر مقایسه نمود. در این مطالعه برای ارزیابی مقایسه برآوردهای مختلف از معیارهای ذیل استفاده می‌گردد.

$$R^2 = \frac{\left[\sum X_i y_i - \frac{(\sum X_i)(\sum y_i)}{n} \right]^2}{\left[\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \right] \left[\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \right]} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (11)$$

ضریب تبیین R^2 معیاری است که قدرت رابطه خطی بین متغیر مستقل X و متغیر وابسته Y را نمایش می‌دهد. مقدار این معیار بین ۰ و ۱ قرار می‌گیرد و هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده این است که رابطه خطی به شکل مناسبی می‌تواند رابطه بین متغیر وابسته و مستقل را نمایش بدهد. ریشه میانگین مربعات خطا^۱ RMSE یک معیار دقت برازش مقایسه‌ای است که از نظر عددی دارای حداقل برابر با صفر است اما از سمت مقادیر بالاتر محدود شده نیست. معیار میانگین قدر مطلق خطا یا MAE معیاری است که مانند RMSE از کران پایین به صفر محدود می‌شود اما از کران بالا محدود شده نیست. ویژگی مشخص این معیار آن است که انتظار خطا را به‌طور متوسط نشان می‌دهد و از این نظر برای پژوهشگران اهمیت زیادی دارد.

یافته‌ها

درک کارایی کاربرد هر یک از روش‌های برآورد حداقل مربعات معمولی، MM و حداقل مربعات پیراسته نیازمند کاربرد آن در سری داده‌های واقعی و تفسیر نتایج آن‌ها است. در این مطالعه از سری داده‌های چهار ایستگاه هیدرومتری شامل النگ دره، انجیراب، باغو و جفاکنده استفاده شده است و نتایج به‌دست‌آمده برحسب معیارهای گرافیکی و عددی دقت برازش تفسیر شده است. در ذیل به تفکیک سری داده‌های موردبررسی نتایج به‌دست‌آمده از اعمال هر یک از برآوردهای حداقل مربعات معمولی، MM و حداقل مربعات پیراسته ارائه شده است.

بررسی نتایج سری داده‌های النگ دره

معیارهای عددی دقت برازش و نیز شیب و عرض از مبدأ حاصل از برازش خطوط رگرسیونی با برآوردهای مختلف برای سری داده‌های النگ دره در جدول ۲ ارائه شده است و مدل‌های خطی تخمین زده‌شده از برآوردهای مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مقدار ضرایب نشان می‌دهد برآورد حداقل مربعات معمولی منجر به بیشترین تخمین شیب خط شده است اما دو برآورد MM و حداقل مربعات پیراسته مقدار شیب خط را کمتر از برآورد حداقل مربعات معمولی تخمین زده‌اند که در این میان مقدار شیب خط تخمین زده‌شده از برآورد حداقل مربعات پیراسته کمتر از مقدار متناظر در برآورد حداقل مربعات معمولی و بیشتر از مقدار متناظر در برآورد MM است. همچنین برآورد حداقل مربعات معمولی منجر به تخمین بیشترین مقدار عرض از مبدأ شده است. برآوردهای حداقل مربعات پیراسته و MM به ترتیب در رتبه‌های بعدی جای می‌گیرند. از طرفی دیگر تنها مقدار عرض از مبدأ تخمین زده‌شده توسط برآورد حداقل مربعات معمولی دارای علامت مثبت است و مقادیر عرض از مبدأ تخمین زده‌شده توسط برآوردهای رگرسیون استوار برخلاف برآورد حداقل مربعات معمولی دارای علامت

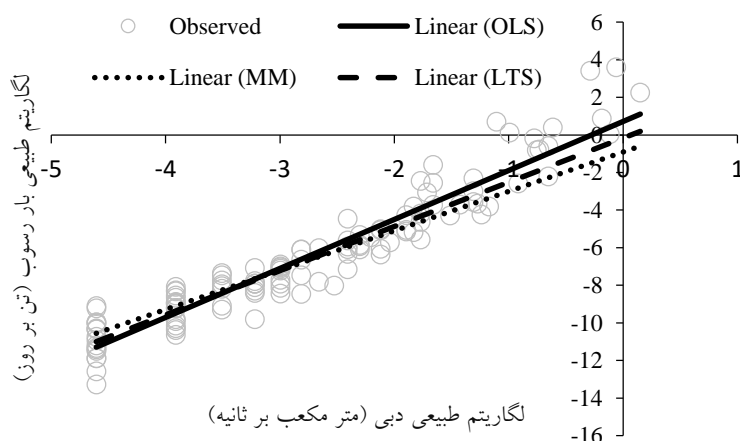
^۱Root Mean Square Error

^۲Mean Absolute Error

منفی هستند. همچنین مشخص است تفاوت تخمین شیب خط بین برآوردهای حداقل مربعات معمولی و MM محسوس است. بررسی ضریب تبیین بیانگر آن است که بهترین تخمین‌های خطوط رگرسیون به ترتیب به صورت MM، حداقل مربعات پیراسته و حداقل مربعات معمولی است در حالیکه معیار ریشه میانگین مربعات خطا بهترین تخمین‌های خطوط رگرسیون را به صورت حداقل مربعات معمولی، حداقل مربعات پیراسته و MM در نظر می‌گیرد. همچنین معیار میانگین قدر مطلق خطا بهترین تخمین‌ها را به صورت حداقل مربعات پیراسته، حداقل مربعات معمولی و MM نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن معیارهای فوق در مجموع می‌توان کاربرد برآوردهای رگرسیون استوار را در این سری منجر به بهبود تخمین مدل خطی دان است. بررسی شکل ۱ نیز بیانگر آن است که شیب خطوط رگرسیون در برآوردهای مختلف دارای اختلاف محسوس است و برآوردهای رگرسیون استوار در مقادیر بالاتر دبی مقدار رسوب را کمتر و در مقادیر کمتر دبی مقدار دبی رسوب را بیشتر از برآورد حداقل مربعات معمولی تخمین می‌زنند.

جدول ۲. ضرایب مدل خطی و معیارهای عددی دقت برازش (النگ دره)

	a	b	R ²	RMSE (Ton/Day)	MAE(Ton/Day)
OLS	۲/۶۰۶۳	۰/۷۱۵۹	۰/۹۰۷۱	۱/۰۵۹۲	۰/۸۳۵۴
MM	۲/۰۹۲۹	-۰/۹۱۳۵	۰/۹۱۵۳	۱/۲۵۹۰	۰/۸۷۴۲
LTS	۲/۳۵۴۵	-۰/۱۵۳۹	۰/۹۱۰۶	۱/۱۱۸۹	۰/۸۳۱۳



شکل ۱. مدل‌های خطی تخمین زده شده با برآوردهای مختلف (النگ دره)

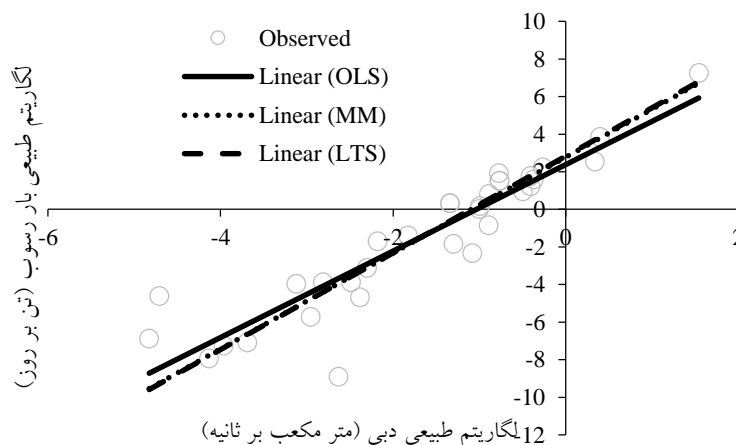
بررسی نتایج سری داده‌های انجیراب

معیارهای عددی دقت برازش به همراه ضرایب مدل خطی برای مدل‌های خطی تخمین زده شده توسط برآوردهای حداقل مربعات معمولی، MM و حداقل مربعات پیراسته اعمال شده بر سری داده‌های ایستگاه هیدرومتری انجیراب در جدول ۳ ارائه شده است. بررسی شیب خط نشان می‌دهد که به ترتیب برآوردهای حداقل مربعات پیراسته، MM و حداقل مربعات معمولی دارای بیشترین بزرگی شیب خط تخمین زده شده بوده‌اند و همین‌الگو در تخمین مقدار عرض از مبدأ برای خطوط مختلف رگرسیون نیز برقرار بوده است. بررسی معیار ضریب تبیین نشان می‌دهد هر دو برآورد رگرسیون استوار منجر به بهبود دقت مدل خطی تخمین زده شده نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی شده‌اند و برآورد حداقل مربعات پیراسته کمی بهتر از برآورد MM بوده است. بررسی معیار ریشه میانگین مربعات خطا نشان می‌دهد که برآوردهای رگرسیون استوار دارای دقت کمتر از برآورد حداقل مربعات معمولی بوده است. اما معیار میانگین قدر مطلق خطا برخلاف معیار ریشه میانگین مربعات خطا و همسو با معیار ضریب تبیین نشان می‌دهد که برآوردهای رگرسیون استوار منجر به بهبود دقت برازش در مقایسه با برآورد حداقل مربعات معمولی شده‌اند و در بین روش‌های مورد بررسی رگرسیون استوار برآورد حداقل مربعات پیراسته دارای دقت کمی بهتر نسبت به برآورد MM است. نمودارهای خطوط رگرسیون تخمین زده شده از برآوردهای مختلف برای سری داده‌های ایستگاه هیدرومتری انجیراب

در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که این شکل نشان می دهد خط تخمین زده شده از برآورد MM دارای وضعیتی بین خطهای تخمین زده شده از برآوردهای حداقل مربعات معمولی و حداقل مربعات پیراسته است که البته به برآورد حداقل مربعات پیراسته بسیار نزدیک تر است. مطابق شکل مشخص است که در مقادیر بالاتر دبی رودخانه در سری داده انجیراب هر دو برآورد رگرسیون استوار منجر به برآورد بیشتر دبی بار رسوب معلق در مقایسه با برآورد حداقل مربعات معمولی شده اند و به عبارتی می توانند به شکل مناسب تری به تخمین بار رسوب معلق در شرایط سیلابی نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی بپردازند. البته باید توجه داشت که در مقادیر پایین دبی جریان رودخانه در سری انجیراب برآوردهای MM و حداقل مربعات پیراسته مقدار بار رسوب معلق را کمتر از برآورد حداقل مربعات معمولی تخمین می زنند.

جدول ۳. ضرایب مدل خطی و معیارهای عددی دقت برازش (انجیراب)

	a	B	R ²	RMSE (Ton/Day)	MAE(Ton/Day)
OLS	۲/۲۹۹۱	۲/۳۷۳۱	۰/۸۲۲۴	۱/۴۵۶۸	۱/۰۱۴۳
MM	۲/۵۵۰۳	۲/۷۷۰۶	۰/۸۴۵۹	۱/۵۰۵۱	۰/۹۷۲۵
LTS	۲/۵۷۱۵	۲/۸۲۲۵	۰/۸۴۶۸	۱/۵۱۳۳	۰/۹۷۱۷



شکل ۲. مدل های خطی تخمین زده شده با برآوردهای مختلف (انجیراب)

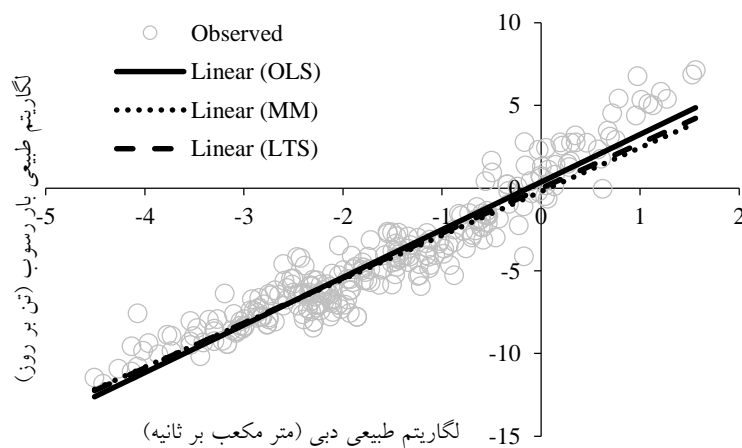
بررسی نتایج سری داده های باغو

معیارهای عددی دقت برازش برآوردهای مختلف مدل خطی بکار گرفته شده در این تحقیق یعنی برآوردهای حداقل مربعات معمولی، MM و حداقل مربعات پیراسته در جدول ۴ ارائه شده است. بررسی مقدار شیب خط مدل خطی به روشنی نشان می دهد که شیب خط تخمین زده شده توسط برآوردهای رگرسیون استوار کمی کمتر از مقدار تخمین زده شده توسط برآورد حداقل مربعات معمولی است. البته باید در نظر داشت که برآورد حداقل مربعات پیراسته منجر به تخمین مقدار بزرگ تر شیب در مقایسه با برآورد MM شده است هر چند این تفاوت آن چنان محسوس نیست. از طرف دیگر بررسی مقدار عرض از مبدأ تخمین زده شده توسط برآوردهای مختلف نشان دهنده مقادیر منفی برای برآوردهای رگرسیون استوار و مقدار مثبت برای برآورد حداقل مربعات معمولی است. بررسی معیار ضریب تبیین نشان می دهد هر دو برآورد رگرسیون استوار دقت برازش را نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی کاهش داده اند که البته این کاهش بسیار جزئی است و در بین برآوردهای رگرسیون استوار دقت برآورد حداقل مربعات پیراسته اندکی بیشتر از برآورد MM بوده است. بررسی معیار ریشه میانگین مربعات خطا نیز منجر به نتایج مشابه با بررسی معیار ضریب تبیین می شود اما بررسی معیار میانگین قدر مطلق خطا بیانگر این نکته است که تخمین صورت گرفته بر اساس برآورد حداقل مربعات پیراسته موجب بهبود نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی شده اما برآورد MM نتیجه ضعیف تری نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی داشته است. البته تفاوت بین مقادیر مختلف این معیار در برآوردهای مختلف بسیار جزئی است. بررسی شکل ۳ به وضوح نشان می دهد که برآوردهای صورت گرفته با کاربرد رگرسیون استوار دارای تفاوت با برآورد صورت گرفته از طریق کاربرد

روش حداقل مربعات معمولی است و بین برآوردهای رگرسیون استوار یعنی برآوردهای حداقل مربعات پیراسته و MM تفاوت جزئی وجود دارد. از طرفی برآورد حداقل مربعات پیراسته مدل خطی را بین برآوردهای حداقل مربعات معمولی و MM اما نزدیکتر به MM قرار می‌دهد. در مقادیر بالاتر دبی جریان رودخانه مقدار بار رسوب معلق تخمین شده از طریق برآورد حداقل مربعات معمولی به مقادیر مشاهداتی نزدیکتر است اما در مقادیر کمتر دبی جریان رودخانه این تخمین‌های زده‌شده از طریق برآورد MM است که نسبت به سایر برآوردها به مقادیر مشاهداتی بار معلق رسوب نزدیکتر است.

جدول ۴. ضرایب مدل خطی و معیارهای عددی دقت برازش (باغو)

	a	b	R ²	RMSE (Ton/Day)	MAE(Ton/Day)
OLS	۲/۸۷۵۵	۰/۳۶۰۱	۰/۹۰۱۹	۱/۲۰۸۵	۰/۹۴۴۰
MM	۲/۶۵۱۵	-۰/۲۰۵۷	۰/۸۹۱۵	۱/۲۵۷۸	۰/۹۴۸۲
LTS	۲/۷۱۲۳	-۰/۰۱۴۹	۰/۸۹۵۶	۱/۲۳۱۱	۰/۹۴۰۷



شکل ۳. مدل‌های خطی تخمین زده‌شده با برآوردهای مختلف (باغو)

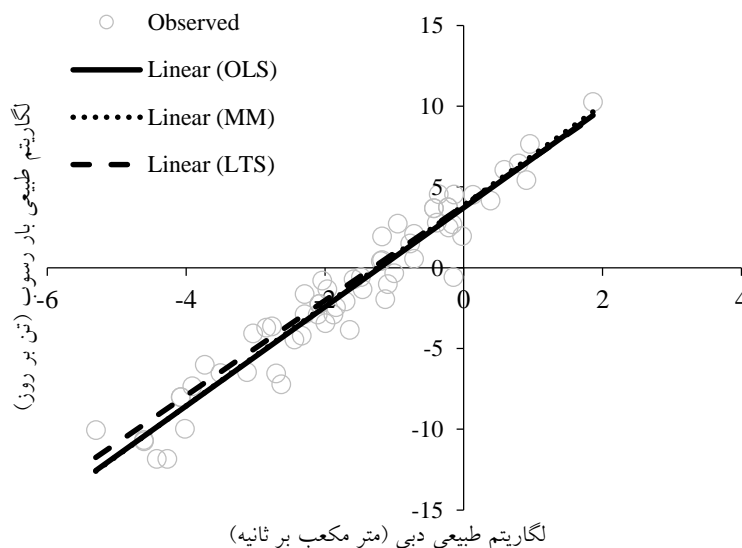
بررسی نتایج سری داده‌های جفاکنده

در این مطالعه برای مورد چهارم داده‌های واقعی مورد بررسی از سری داده‌های ایستگاه هیدرومتری جفاکنده استفاده شد. نتایج عددی حاصل از کاربرد برآوردهای مختلف برای تخمین معادله فرم خطی منحنی سنج رسوب در جدول ۵ ارائه شده است که شامل ضرایب معادله خط و سه معیار عددی دقت برازش است. بر طبق نتایج مقدار بزرگی شیب خط تخمین زده‌شده در برآورد MM دارای بیشترین مقدار در این سری داده است و بعد از آن به ترتیب ضرایب تخمین زده‌شده از برآوردهای حداقل مربعات معمولی و حداقل مربعات پیراسته قرار می‌گیرند. به‌وضوح مشخص است که از این حیث این نتایج دارای تفاوت با سری‌های داده‌های قبلی است زیرا در موارد قبلی شیب خط تخمین زده‌شده با برآورد حداقل مربعات معمولی از هر دو شیب خط تخمین زده‌شده با برآوردهای رگرسیون استوار بیشتر یا کمتر بوده است در حالیکه در این سری داده این موضوع روی نداده است بنابراین می‌شود نتیجه گرفت که لزوماً برآوردهای رگرسیون استوار در مقایسه با برآورد حداقل مربعات معمولی منجر به شیب خط کاملاً متفاوت و با تغییرات محسوس نمی‌شوند. اگرچه از نظر تئوری این موضوع کاملاً مشخص است اما این تجربه در سری داده‌های جفاکنده نیز درواقع تأییدی ساده بر این موضوع است. بررسی بزرگی مقدار عرض از مبدأ تخمین زده‌شده در برآوردهای مختلف مشخص می‌کند که هر دو برآورد رگرسیون استوار منجر به تخمین مقادیر بزرگ‌تر عرض از مبدأ در مقایسه با برآورد حداقل مربعات معمولی شده‌اند و نیز از طرف دیگر بزرگی مقدار عرض از مبدأ تخمین زده‌شده توسط برآورد MM به مقدار جزئی از مقدار متناظر تخمین زده‌شده توسط برآورد حداقل مربعات پیراسته بیشتر است. بررسی معیار دقت برازش ضریب تبیین نشان می‌دهد که برآورد

MM از خانواده برآورد رگرسیون استوار منجر به افزایش دقت تخمین مدل خطی نسبت به برآورد متداول حداقل مربعات معمولی شده در حالیکه برآورد حداقل مربعات پیراسته به مقدار جزئی دقت برازش را نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی کاهش داده است. از طرفی بررسی معیار ریشه میانگین مربعات خطا نشان می‌دهد که اگرچه تفاوت دقت برازش برآوردهای حداقل مربعات معمولی و MM کاملاً جزئی است اما این برآورد حداقل مربعات معمولی است که منجر به بهترین دقت برازش شده و برآورد حداقل مربعات پیراسته نتیجه ضعیف‌تری نسبت به دو برآورد دیگر داشته است. اما بررسی معیار دقت برازش میانگین قدر مطلق خطا بیان می‌کند که هر دو برآورد رگرسیون استوار یعنی برآوردهای MM و حداقل مربعات پیراسته منجر به دقت بیشتر برازش در مقایسه با حداقل مربعات معمولی در این سری شده‌اند. با در نظر گرفتن معیارهای بیان شده می‌توان نتیجه گرفت در مجموع برآوردهای رگرسیون استوار موجب بهبود دقت برازش در مقایسه با برآورد حداقل مربعات معمولی در برآورد مدل خطی منحنی سنج رسوب در سری داده‌های ایستگاه جفاکنده شده‌اند. مدل‌های خطی تخمین زده شده با استفاده از برآوردهای مورد مطالعه در این تحقیق یعنی حداقل مربعات معمولی، MM و حداقل مربعات پیراسته با کاربرد سری داده‌های ایستگاه هیدرومتری جفاکنده در شکل ۴ به نمایش در آمده است. بررسی شکل ۴ نشان می‌دهد مقادیر عرض از مبدأ به یکدیگر بسیار نزدیک هستند و تخمین‌های بار رسوب معلق در مقادیر بالاتر دبی جریان توسط سه برآورد مورد بررسی در این مطالعه دارای مقادیر نزدیک به یکدیگر هستند اگرچه باید در نظر گرفت تفاوت محدودی که بین تخمین‌های برآوردهای مختلف وجود دارد منجر می‌شود که در دبی‌های بالاتر جریان رودخانه برآورد MM دارای تخمین‌های بالاتر از برآورد حداقل مربعات معمولی و برآورد حداقل مربعات معمولی دارای تخمین‌های بالاتری از برآورد حداقل مربعات پیراسته است هرچند این اختلاف جزئی است. اما اگر مقادیر پایین تر دبی جریان رودخانه در نظر گرفته شود مشخص می‌گردد که تخمین‌های حاصل از برآوردهای حداقل مربعات معمولی و MM بسیار به یکدیگر نزدیک و کمی متفاوت از برآورد انجام شده توسط حداقل مربعات پیراسته است.

جدول ۵. ضرایب مدل خطی و معیارهای عددی دقت برازش (جفاکنده)

	a	b	R ²	RMSE (Ton/Day)	MAE(Ton/Day)
OLS	۳/۰۷۴۱	۳/۷۲۷۳	۰/۹۲۸۱	۱/۳۱۴۲	۱/۰۷۵۸
MM	۳/۱۰۸۲	۳/۸۷۱۰	۰/۹۲۹۲	۱/۳۱۸۱	۱/۰۵۸۳
LTS	۲/۹۴۵۵	۳/۸۶۳۸	۰/۹۱۴۱	۱/۳۷۵۹	۱/۰۶۱۳



شکل ۴. مدل‌های خطی تخمین زده شده با برآوردهای مختلف (جفاکنده)

بحث

منحنی سنج رسوب بار معلق به علت سهولت استفاده به شکل وسیعی برای تخمین بار رسوب معلق مورد توجه قرار گرفته است. مهم‌ترین ویژگی این روش این است که صرفاً از داده‌های دبی جریان رودخانه استفاده می‌کند و این موضوع در واقع مهم‌ترین مزیت نسبی این روش است زیرا به حداقل داده متغیر مستقل ثبت شده نیازمند است. بدیهی است که همچنان که سادگی و نیاز به حداقل داده مهم‌ترین مزیت تحلیل منحنی سنج رسوب به حساب می‌آید اما هم‌زمان این روش را دارای محدودیت در دقت تخمین نیز می‌کند. به‌رحال روش‌های زیادی برای بهبود تخمین بار رسوب معلق توسعه یافته‌اند اما در کنار بهبود دقت برازش دارای این محدودیت ذاتی هستند که نیاز به متغیرهای مستقل بیشتری برای تخمین بار رسوب معلق دارند و در کاربردهای عملی این یک محدودیت جدی و غیرقابل اغماض است. در این مطالعه سعی شده است تا با در نظر گرفتن داده‌های تبدیل شده (تبدیل لگاریتم طبیعی) به بررسی تخمین صورت گرفته با استفاده از برآورد متداول حداقل مربعات معمولی پرداخته شده و کاربرد برآوردهای رگرسیون استوار مانند MM و حداقل مربعات پیراسته مورد توجه و ارزیابی قرار گیرد. به‌طور مشخص بهبود اندک در دقت برآورد مدل خطی منحنی سنج رسوب می‌تواند پس از تبدیل دوباره به داده اصلی موجب بهبود قابل ملاحظه در دقت مدل برآورد شده گردد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه برآورد منحنی سنج رسوب با استفاده از داده‌های تبدیل شده (لگاریتم طبیعی) صورت گرفت و در ابتدا برآورد متداول حداقل مربعات معمولی بکار گرفته شد و ضرایب مدل تبدیل یافته خطی و نیز معیارهای دقت برازش برآورد گردید و سپس همین روند برای برآوردهای رگرسیون استوار یعنی برآوردهای MM و حداقل مربعات پیراسته تکرار شد. با استفاده از سری داده‌های ثبت شده در چهار ایستگاه هیدرومتری یعنی سری داده‌های النگ دره، باغو، انجیراب و جفاکنده محاسبات صورت گرفت و نتایج ذیل به دست آمد.

۱- بررسی شیب خط رگرسیون نشان می‌دهد که برآورد MM در دو سری داده (باغو و النگ دره) منجر به کاهش برآورد بزرگی شیب خط نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی شده و در دو سری دیگر (انجیراب و جفاکنده) مقدار شیب خط را بیشتر از مقدار تخمین زده شده از برآورد حداقل مربعات معمولی تعیین کرده است. همچنین برآورد حداقل مربعات پیراسته مقدار شیب را در یک سری داده (انجیراب) کمتر از مقدار تخمین زده شده توسط برآورد حداقل مربعات معمولی تخمین زده و در سه سری دیگر مقدار بزرگی بیشتری برای شیب خط ارائه کرده است.

۲- بررسی مقایسه‌ای شیب خط برآورد شده توسط برآوردهای رگرسیون استوار نشان می‌دهد به‌غیر از سری داده جفاکنده که مقدار شیب تخمین زده شده توسط برآورد حداقل مربعات پیراسته کمتر از مقدار متناظر تخمین زده شده با برآورد MM است، در سایر سری‌های مورد بررسی برآورد حداقل مربعات پیراسته منجر به تخمین مقدار بیشتر شیب خط نسبت به مقدار تخمین زده شده توسط برآورد MM شده است.

۳- بررسی مقادیر تخمین زده شده عرض از مبدأ نشان می‌دهد برآورد MM مقدار این پارامتر را در دو سری داده (النگ دره و باغو) کمتر از برآورد حداقل مربعات معمولی تخمین زده است و برای دو سری دیگر (انجیراب و جفاکنده) این رفتار بالعکس است. نیز برآورد حداقل مربعات پیراسته مقدار عرض از مبدأ را برای دو سری (انجیراب و جفاکنده) بیشتر از مقدار متناظر در برآورد حداقل مربعات معمولی تخمین زده اما در دو سری دیگر (باغو و النگ دره) مقدار تخمین زده شده از برآورد حداقل مربعات معمولی از مقدار متناظر برآورد حداقل مربعات پیراسته بیشتر است.

۴- بررسی مقایسه‌ای مقادیر عرض از مبدأ تخمین زده شده با برآوردهای رگرسیون استوار نشان می‌دهد تنها در سری داده جفاکنده مقدار عرض از مبدأ تخمین زده شده از برآورد MM از تخمین صورت گرفته بر اساس برآورد حداقل مربعات پیراسته بزرگ‌تر و در سه سری دیگر کوچک‌تر است.

۵- با در نظر گرفتن ضریب تبیین مشخص می‌شود که در سری داده باغو مقدار ضریب تبیین در برآورد MM نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی کاهش یافته و در سه سری دیگر نتایج بهبود ضریب همبستگی را نشان می‌دهد. در برآورد حداقل مربعات پیراسته مقدار ضریب تبیین در دو سری انجیراب و النگ دره نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی افزایش و در دو سری باغو و جفاکنده کاهش را نشان می‌دهد.

۶- با مقایسه ضریب تبیین برآوردهای رگرسیون استوار مشخص می‌شود در سری‌های النگ دره و جفاکنده مقدار ضریب تبیین برآورد MM از برآورد حداقل مربعات پیراسته بیشتر است اما در سری‌های باقیمانده یعنی باغو و انجیراب دقت برازش برآورد حداقل مربعات پیراسته بیشتر از برآورد MM بوده است.

۷- بررسی معیار ریشه میانگین مربعات خطا نشان می‌دهد که در هر چهار سری موردبررسی هر دو برآورد رگرسیون استوار دقت برآورد مدل خطی را نسبت به برآورد متداول حداقل مربعات معمولی کاهش داده‌اند.

۸- مقایسه معیار ریشه میانگین مربعات خطا بین مدل‌های خطی برآورد شده توسط رگرسیون استوار بیان می‌کند که در دو سری داده (النگ دره و باغو) دقت برآورد حداقل مربعات پیراسته از برآورد MM بالاتر است و در دو سری دیگر (انجیراب و جفاکنده) دقت برآورد MM بهتر است.

۹- بررسی معیار میانگین قدر مطلق خطا بیان می‌کند در برآورد MM در سری داده‌های انجیراب و جفاکنده دقت مدل نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی بهتر شده و در دو سری دیگر (باغو و النگ دره) کاربرد برآورد MM منجر به دقت پایین‌تری نسبت به برآورد حداقل مربعات معمولی شده است. نیز کاربرد برآورد حداقل مربعات پیراسته در هر چهار سری داده نشان داده که دقت مدل نسبت به کاربرد برآورد حداقل مربعات معمولی افزایش یافته است.

۱۰- مقایسه معیار میانگین قدر مطلق خطا بین مدل‌های خطی برآورد شده توسط برآوردهای رگرسیون استوار نشان می‌دهد که به جز یک سری داده (جفاکنده) در سایر سری داده‌ها دقت برآورد حداقل مربعات پیراسته بهتر از برآورد MM بوده است.

۱۱- بررسی نمودار مدل‌های خطی برآورد شده نشان می‌دهد برای دو سری داده (باغو و انجیراب) برآوردهای رگرسیون استوار به یکدیگر بسیار نزدیک و دارای تفاوت قابل مشاهده با برآورد حداقل مربعات معمولی هستند، برای سری (النگ دره) رفتار سه مدل خطی باهم متفاوت و برای یک سری دیگر باقیمانده (جفاکنده) برآوردهای MM و حداقل مربعات معمولی نزدیک به یکدیگر و با تفاوت قابل مشاهده نسبت به حداقل مربعات پیراسته هستند.

۱۲- بررسی موقعیت مدل‌های خطی برآورد شده با برآوردهای مختلف نشان می‌دهد برای دو سری داده (باغو و النگ دره) موقعیت برآورد حداقل مربعات پیراسته در بین برآوردهای MM و حداقل مربعات معمولی است، برای یک سری (انجیراب) موقعیت برآورد MM بین برآوردهای حداقل مربعات معمولی و حداقل مربعات پیراسته (ولی نزدیک به حداقل مربعات پیراسته)، و برای یکسری داده باقیمانده (جفاکنده) موقعیت برآورد حداقل مربعات معمولی بین برآوردهای MM و حداقل مربعات پیراسته قرار دارد. نیز مشخص است نتایج تخمین‌های برآوردهای مختلف در سری داده‌های جفاکنده در کران بالایی داده‌های دبی و در سری داده‌های باغو در کران پایینی داده‌های دبی به یکدیگر نزدیک هستند.

با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق پیشنهادهای ذیل ارائه می‌گردد. رویکرد کلی پیشنهادی مندرج مطالعه‌ای گسترده‌تر در مورد کاربرد برآوردهای استوار در مبحث تخمین بار رسوب معلق رودخانه است.

۱- با توجه به اینکه در این مطالعه از چهار سری داده استفاده گردید پیشنهاد می‌شود که در مطالعه‌ای جامع‌تر تعداد بیشتری از سری‌های داده ثبت شده موردبررسی قرار گیرد. نیز سری‌های منتخب دارای تنوع بیشتری از نظر ویژگی‌های آماری باشند.

۲- سری داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از سری‌های ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری استان گلستان بوده است. پیشنهاد می‌شود سری‌های حوضه‌های آبریز منتخب در مطالعات تکمیلی دارای ویژگی‌های مختلف اقلیمی، شرایط متنوع‌تر هیدرولوژیکی و با در نظر گرفتن تنوع در مشخصه‌های فیزیوگرافیکی، پوشش خاک و کاربری اراضی موردبررسی واقع شوند.

۳- در این مطالعه از دو برآورد رگرسیون استوار (حداقل مربعات پیراسته و MM) استفاده شده است. پیشنهاد می‌شود در کنار این دو برآورد از دیگر برآوردهای رگرسیون استوار در مطالعات بعدی بهره گرفته شود.

تقدیر و تشکر

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی تحت عنوان برآورد منحنی سنجه رسوب با استفاده از رگرسیون نیرومند (شماره شناسه ۴۴-۳۲۴-۹۳) در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شده است. مولفین از این دانشگاه بابت حمایت جهت انجام پژوهش سپاسگزاری می نمایند.

References

- Achite, M., & Ouillon, S. (2007). Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973-1995). *Journal of Hydrology*, 343(3), 187-202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.026>
- Alp, M., & Cigizoglu, H.K. (2007). Suspended sediment load simulation by two artificial neural network methods using hydrometeorological data. *Environmental Modelling & Software*, 22(1), 2-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.09.009>
- Arabkhedri, M., Lai, F.S., Ibrahim, N.A., & Mohamad-Kasim, M.R. (2009). Effect of Adaptive Cluster Sampling Design on Accuracy of Sediment Rating Curve Estimation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(2), 142-151. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0000171>
- Bowlby, H.D., & Gibson, A.J.F. (2015). Environmental effects on survival rates: robust regression, recovery planning and endangered Atlantic salmon. *Ecology and evolution*, 5(16), 3450-3461. <https://doi.org/10.1002/ece3.1614>
- Chun, J.A., Cooke, R.A., Kang, M.S., Choi, M., Timlin, D., & Park, S.W. (2010). Runoff losses of suspended sediment, nitrogen, and phosphorus from a small watershed in Korea. *Journal of environmental quality*, 39(3), 981-990. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0226>
- Cohn, T.A., Delong, L.L., Gilroy, E.J., Hirsch, R.M., & Wells, D.K. (1989). Estimating constituent loads. *Water resources research*, 25(5), 937-942. <https://doi.org/10.1029/WR025i005p00937>
- Duan, N. (1983). Smearing estimate: a nonparametric retransformation method. *Journal of the American Statistical Association*, 78(383), 605-610. <https://doi.org/10.2307/2288126>
- Emamgholizadeh, S., & Demneh, R.K. (2019). A comparison of artificial intelligence models for the estimation of daily suspended sediment load: a case study on the Telar and Kasilian rivers in Iran. *Water Supply*, 19(1), 165-178. <https://doi.org/10.2166/WS.2018.062>
- Ferguson, R.I. (1987). Accuracy and precision of methods for estimating river loads. *Earth surface processes and landforms*, 12(1), 95-104. <https://www.doi.org/10.1002/ESP.3290120111>
- Horowitz, A.J. (2002). The use of rating (transport) curves to predict suspended sediment concentration: a matter of temporal resolution. In *Turbidity and other Sediment Surrogates Workshop*. April.
- Hu, B., Wang, H., Yang, Z., & Sun, X. (2011). Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) basin and their implications. *Quaternary International*, 230(1), 34-43. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.quaint.2009.08.018>
- Huber, P.J. (1973). Robust regression: asymptotics, conjectures and Monte Carlo. *The Annals of Statistics*, 799-821. <https://www.jstor.org/stable/2958283>
- Huber, P.J. (1981). *Robust Statistics*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc. <https://www.wiley.com/en-us/Robust+Statistics%2C+2nd+Edition-p-9780470129906>
- Iadanza, C., & Napolitano, F. (2006). Sediment transport time series in the Tiber River. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(18), 1212-1227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2006.05.005>

- Kao, S., Lee, T., & Milliman, J. D. (2005). Calculating highly fluctuated suspended sediment fluxes from mountainous rivers in Taiwan. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 16(3), 653. [https://doi.org/10.3319/TAO.2005.16.3.653\(T\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2005.16.3.653(T))
- Kisi, O. (2005). Suspended sediment estimation using neuro-fuzzy and neural network approaches/Estimation des matières en suspension par des approches neurofloues et à base de réseau de neurones. *Hydrological Sciences Journal*, 50(4). <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.4.683>
- Kisi, O., Haktanir, T., Ardiclioglu, M., Ozturk, O., Yalcin, E., & Uludag, S. (2009). Adaptive neuro-fuzzy computing technique for suspended sediment estimation. *Advances in Engineering Software*, 40(6), 438-444. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.advengsoft.2008.06.004>
- Kisi, O., Karahan, M. E., & Şen, Z. (2006). River suspended sediment modelling using a fuzzy logic approach. *Hydrological Processes*, 20(20), 4351-4362. <https://doi.org/10.1002/hyp.6166>
- Kvam, P. H., & Vidakovic, B. (2007). *Nonparametric statistics with applications to science and engineering* (Vol. 653). John Wiley & Sons.
- Maes, J., Vliegen, J., Van de Vel, K., Janssen, S., Deutsch, F., De Ridder, K., & Mensink, C. (2009). Spatial surrogates for the disaggregation of CORINAIR emission inventories. *Atmospheric Environment*, 43(6), 1246-1254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.11.040>
- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Palleiro, L., & Taboada-Castro, M.T. (2010). Temporal changes in suspended sediment transport in an Atlantic catchment, NW Spain. *Geomorphology*, 123(1), 181-188. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.015>
- Rousseeuw, P.J. (1984). Least median of squares regression. *Journal of the American statistical association*, 79(388), 871-880. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1984.10477105>
- Sadeghi, S. H. R., Mizuyama, T., Miyata, S., Gomi, T., Kosugi, K., Fukushima, T., & Onda, Y. (2008). Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed. *Geoderma*, 144(1), 198-211. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.11.008>
- Salarijazi, M., Abdolhosseini, M., Ghorbani, K., & Eslamian, S. (2016). Evaluation of quasi-maximum likelihood and smearing estimator to improve sediment rating curve estimation. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 6(4), 359-370. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2016.079352>
- Schumacker, R. E., Monahan, M. P., & Mount, R. E. (2002). A comparison of OLS and robust regression using S-PLUS. *Multiple Linear Regression Viewpoints*, 28(2), 10-13. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc>
- Smoliński, A., Walczak, B., & Einax, J.W. (2003). Robust multivariate calibration in environmental studies. *Analytical letters*, 36(10), 2317-2336. <http://dx.doi.org/10.1081/AL-120023722>
- Sokol, Z. (2003). The use of radar and gauge measurements to estimate areal precipitation for several Czech river basins. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 47(3), 587-604. <https://doi.org/10.1023/A:1024715702575>
- Yohai, V.J. (1987). High breakdown-point and high efficiency robust estimates for regression. *The Annals of Statistics*, 642-656. <https://doi.org/10.1214/aos/1176350366>
- Zhang, S., Lu, X.X., Higgitt, D.L., Chen, C.T.A., Han, J., & Sun, H. (2008). Recent changes of water discharge and sediment load in the Zhujiang (Pearl River) Basin, China. *Global and Planetary Change*, 60(3), 365-380. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.04.003>



Evaluating the efficiency of AquaCrop model for Corn plant underwater and fertilizer management (Case study: Shush city)

Saeed Pooladgar¹ , Javanshir Azizi Mobaser^{2✉} , Javad Ramazani Moghadam³ , Ali Asghari⁴ 

¹ M.Sc. Graduated in irrigation and drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: saeed_pooladgar@yahoo.com

² Corresponding Author, Associate Professor. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: ja.mobaser22@gmail.com

³ Assistant Professor. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: J_ramezani@uma.ac.ir

⁴ Professor. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: ali_asghari@yahoo.com

ABSTRACT

Introduction

The ever-expanding management needs have led to computer models play important role in modern agricultural management. The Aqua Crop model is one of these models, which is designed to simulate crop performance by the Food and Agriculture Organization (FAO), taken from the review articles of the Journal of Irrigation and Drainage No. 33, prepared by Dornbas and Kasam (1979). Was, expanded, and developed. Among the specifications of the Aqua Crop model in comparison with similar models, we can mention its simplicity, high capability, and good accuracy.

Methodology

This research was conducted in Bilal village of Shush city of Khuzestan Province in 2014. The climate of the region is hot and dry and the annual rainfall is about 250 mm. The main cultivation of this city is Corn. Regarding the importance of this product in the city of Shush, we can be content with the fact that in 1394, it has been the first place in Corn production in the province. This research is in the form of split plots with the main treatment of Urea fertilizer (including 100, 80, and 50% of the fertilizer required for Corn (N0, N1, and N2)) and sub-treatment of irrigation water (including irrigation of 100, 80 and 50% of water requirement) with four replications. According to the results, the model had the highest sensitivity to the two parameters of flowering and seed pod filling periods. Also, in model calibration to simulate Corn yield, normalized water productivity (WP) and canopy growth coefficient (CGC) values of 31 (g / m²) and 24.2% were obtained, respectively.

Results and discussion

Flowering time and pod filling time were the most sensitive parameters of the model (with moderate-high sensitivity). Therefore, more care should be taken in measuring these parameters, because otherwise, the model simulation error may increase sharply. Also, the model had no sensitivity to the time of germination of seeds. The statistical results show that the best simulation occurred in the N0E1 treatment with the least stress. As the stress increased, the simulation and observation values became more different. In treatments where 50% fertilizer stress was applied, the simulation values are very different from the observed values. Simulation is not appropriate in these treatments and the Aqua Crop model has not been able to predict product performance under these stresses.

Conclusions

According to the results of this study, the best and weakest Corn yield simulations were related to N0E1 and N2E0 treatments, respectively. The results also showed the accuracy of performance simulation in N0E1 treatment, based on CE, RMSE, d, ME, and CRM statistical indices which are -0.2, 0.32, 0.73, 3.37, and 0.01 respectively, was higher than in other treatments. Therefore, the Aqua Crop model has a more suitable simulation when water and fertilizer stresses are low. In general, according to the results of this study, the efficiency of the Aqua Crop model for grain Corn cultivation in Shush city was considered appropriate and this model can be used to manage water in Corn fields.

Keywords: Corn, simulation, urea fertilizer, water management.

Article Type: Research Article

Article history: Received: 09 February 2022 Revised: 28 April 2022 Accepted: 16 May 2022 published: 29 May 2022

Cite this article: Pooladgar, S., Azizi Mobaser, J., Ramazani Moghadam, J., & Asghari, A. (2022). Evaluating the efficiency of AquaCrop model for Corn plant underwater and fertilizer management (Case study: Shush city). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(1), 67-84, DOI: 10.22126/ATWE.2022.7483.1014

Publisher: Razi University

© The Author(s).





ارزیابی کارایی مدل AquaCrop برای گیاه ذرت تحت مدیریت آب و کود (مطالعه موردی: شهرستان شوش)

سعید پولادگر^۱، جوانشیر عزیزی مبصر^۲، جواد رضانی مقدم^۳، علی اصغری^۴

دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: saeed_pooladgar@yahoo.com

آنویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: ja.mobaser22@gmail.com

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

استاد، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: ali_asghari@yahoo.com

چکیده

امروزه بهینه‌سازی مصرف آب از اولویت‌های اصلی کشاورزی است. چنانچه مدیریت آب در مزرعه بهبود یابد کارایی مصرف آب نیز افزایش پیدا می‌کند. مدیریت آب در مزرعه را می‌توان با کمک مدل‌های شبیه‌سازی به‌صورت بهینه انجام داد. در این تحقیق کارایی مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد گیاه ذرت در شرایط مختلف مدیریت آب و کود مورد ارزیابی قرار گرفت. این تحقیق در قالب طرح کرت‌های خرد شده با تیمار اصلی کود اوره (شامل ۱۰۰، ۸۰ و ۵۰ درصد کود مورد نیاز گیاه ذرت (N0، N1 و N2)) و تیمار فرعی مقدار آب آبیاری (شامل آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه E1، E0 و E2)) با چهار تکرار اجرا شد. مطابق نتایج، مدل بیش‌ترین حساسیت را نسبت به دو پارامتر به‌زمان گل‌دهی و زمان پر شدن غلاف دانه‌ها داشت. همچنین در واسنجی مدل برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت، مقادیر بهره‌وری آب نرمال شده (WP) و ضریب رشد پوشش (CGC) به‌ترتیب برابر ۳۱ (گرم بر مترمربع) و ۲۴/۲ درصد به‌دست آمدند. علاوه بر این مطابق نتایج این تحقیق، بهترین و ضعیف‌ترین شبیه‌سازی عملکرد ذرت به‌ترتیب مربوط به تیمارهای NOE1 و NOE2 بود. همچنین نتایج نشان داد که میزان دقت شبیه‌سازی عملکرد در تیمار NOE1، بر اساس شاخص‌های آماری CE، RMSE، ME، d، CRM و ME که به‌ترتیب برابر ۰/۲، ۰/۳۲، ۰/۷۳، ۰/۳۷ و ۰/۰۱ به‌دست آمد بیش‌تر از سایر تیمارها بود. بنابر این مدل آکواکراپ هنگامی که تنش‌های آبی و کود کم بود، شبیه‌سازی مناسب‌تری خواهد داشت. در مجموع، مطابق نتایج این تحقیق، کارایی مدل آکواکراپ برای کشت ذرت دانه‌ای در منطقه‌ی شهرستان شوش مناسب ارزیابی شد و می‌توان از این مدل برای مدیریت آب در مزارع ذرت استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: ذرت، شبیه‌سازی، کود اوره، مدیریت آب.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۰ بهمن ۱۴۰۰ اصلاح: ۰۸ اردیبهشت ۱۴۰۱ پذیرش: ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۱ چاپ الکترونیکی: ۰۸ خرداد ۱۴۰۱

استناد: پولادگر، س.، عزیزی مبصر، ج.، رضانی مقدم، ج.، و اصغری، ع. (۱۴۰۱). ارزیابی کارایی مدل AquaCrop برای گیاه ذرت تحت مدیریت آب و کود (مطالعه موردی: شهرستان شوش). *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۲(۱)، ۸۴-۶۷. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2022.7483.1014



مقدمه

گسترش روزافزون نیازهای مدیریتی باعث شده که مدل‌های رایانه‌ای نقش پر رنگی در مدیریت کشاورزی مدرن ایفا نمایند (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۶). در تهیه این مدل‌ها، برای شبیه‌سازی رشد گیاهی از تحلیل‌های کمی سیستماتیک استفاده می‌شود و با توجه به اهداف محقق می‌توانند در زمینه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی به کار گرفته شوند (هنسجیک^۱ و همکاران، ۱۹۹۹). مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصول، ابزاری هستند که می‌توانند برای تخمین عملکرد، آب مورد نیاز و نیازهای غذایی گیاه در شرایط مختلف به کار گرفته شوند (وان ایترسام^۲ و همکاران، ۲۰۰۳). در واقع مدل به عنوان ابزاری تحلیل‌گر برای مطالعه اثر مدیریت سیستم‌های کشت روی حاصل‌خیزی محصول و محیط استفاده می‌شود (مومنی و همکاران، ۱۳۷۷). این مدل‌ها اثرات کمی منابع آب و هوایی، خصوصیات گیاهی و فاکتورهای مدیریتی و نیاز آبی را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهند (وو^۳، ۲۰۰۸). مدل آکواکراپ^۴ یکی از این مدل‌ها است که به منظور شبیه‌سازی عملکرد محصولات توسط سازمان خوار و بار جهانی (FAO^۵) برگرفته از مقالات مروری مجله آبیاری و زهکشی شماره ۳۳ که توسط دورنیاس و کاسام^۶ (۱۹۷۹) تهیه شده بود، بسط و توسعه یافته است (سعیدی و همکاران، ۱۴۰۰). از جمله مشخصات مدل آکواکراپ در مقایسه با مدل‌های مشابه می‌توان به سادگی، توانمندی بالا و دقت مناسب آن توسط دورنیاس و کاسام (۱۹۷۹) اشاره نمود.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

هنگ و همکاران^۷ (۲۰۰۹) با استفاده از اطلاعات مربوط به گیاه ذرت در سه ناحیه مختلف از نظر آب و هوایی مدل آکواکراپ را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که مدل مراحل رشد، عملکرد محصول، سطح سایه انداز و کل ماده خشک را در شرایط بدون تنش آبی و تنش آبی متوسط در حد قابل قبول شبیه‌سازی می‌کند، اما در وضعیت تنش آبی شدید نتایج مدل رضایت بخش نبود. آریانا و همکاران^۸ (۱۳۸۸) مطالعاتی روی مدل آکواکراپ انجام دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد در صورتی که واسنجی به خوبی انجام شود مدل قادر به شبیه‌سازی مقادیر ماده خشک، رطوبت خاک و سطح سایه‌انداز گیاه با دقت مناسبی خواهد بود. در تونس، وانوتوچ و راس^۹ (۲۰۱۱) مطالعه‌ای در رابطه با تأثیر تغییر اقلیم (بارندگی، تبخیر و تعرق و دما) بر عملکرد گندم با استفاده از مدل آکواکراپ انجام دادند، که نتیجه تحقیق آنها نشان داد در مقایسه با اطلاعات پایه، عملکرد گندم در دوره زمانی سال‌های ۲۰۴۶ تا ۲۰۶۵ کاهش پیدا می‌کند. سینگ و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۳) از مدل آکواکراپ در ایالت بنگال غربی هندوستان برای شبیه‌سازی عملکرد گندم، برای ۱۰ واریته مختلف استفاده نمودند. این محققین از اطلاعات مشاهده‌ای فصل زراعی ۲۰۰۹-۲۰۰۸ برای واسنجی و از اطلاعات فصل ۲۰۱۰-۲۰۰۹ برای صحت‌سنجی استفاده کردند. عملکرد گندم با استفاده از اطلاعات مشاهده‌ای ۳/۹ تن در هکتار بود در حالیکه مدل آکواکراپ عملکرد گندم را ۴/۰۱ تن در هکتار شبیه‌سازی کرد.

دانکن و نوبرت^{۱۱} (۲۰۱۵) در کشور اوگاندا با استفاده از مدل آکواکراپ بر روی گیاه ذرت تحقیقاتی را انجام دادند. آنها با استفاده از این مدل به شبیه‌سازی روند تولید محصول ذرت تا سال ۲۰۵۰ پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که تا سال ۲۰۵۰ در کشور اوگاندا برای مناطقی با سرعت گرمایش بالا و بارندگی کم، میزان تولید محصول ذرت با کاهش ۴/۷ درصدی روبرو خواهد شد و برای مناطقی با سرعت گرمایش کم و بارندگی زیاد، میزان تولید محصول ذرت به مقدار ۳/۵ درصد افزایش خواهد یافت. ولس و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۲) مدل آکواکراپ را برای محصول کاواسا در کشورهای کلمبیا، نیجریه و توگو با استفاده از بانک اطلاعات موجود واسنجی کردند، که نتایج رضایت‌بخش بود. توکلی و همکاران (۱۳۹۱) مدل آکواکراپ را برای شبیه‌سازی تولید محصول، میزان رطوبت خاک و تخمین درصد سطح سایه‌انداز در بالادست سد کرخه مورد ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که مدل آکواکراپ ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی کشت محصول تحت روش‌های کم‌آبیاری و همچنین کشت دیم است. خلیلی و همکاران (۱۳۹۳) با کمک مدل گیاهی آکواکراپ به شبیه‌سازی عملکرد گندم در خراسان شمالی پرداختند. آن‌ها برای واسنجی مدل، از داده‌های هواشناسی روزانه و برداشت محصول در دو سال زراعی ۸۷-۸۶ و ۸۸-۸۷

¹ Hengsdijk et al

² Van Ittersum

³ Wu

⁴ AquaCrop

⁵ Food and Agriculture Organization

⁶ Doorenbos and kasam

⁷ Hang et al

⁸ Araya et al

⁹ Vanuytrecht and Raes

¹⁰ Singh et al

¹¹ Duncan and Nobert

¹² Wellens et al

استفاده کردند. نتایج بیانگر قابلیت مدل در پیش‌بینی عملکرد محصول بود، به طوری که ضرایب تبیین، میانگین مجذور مربعات خطای استاندارد و نرمال به ترتیب برابر ۰/۸۶، ۰/۰۶۲ و ۵/۲۳۵ به دست آمد. مهرآذر و همکاران (۱۳۹۴) نیز در پژوهشی عملکرد ذرت را تحت شرایط تنش شوری با کمک مدل آکواکراپ شبیه‌سازی کردند. این آزمایش در قالب بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. تیمارها شامل پنج سطح شوری آب آبیاری (صفر، ۴/۵۳، ۹/۰۶، ۱۳/۵۹ و ۱۸/۱۳ میلی‌موس بر سانتی‌متر) و دو زمان نمونه‌برداری با چهار تکرار بود. مقادیر شاخص‌های آماری بیانگر دقت مناسب مدل آکواکراپ در پیش‌بینی عملکرد ذرت تحت شرایط آزمایشی بود. کمینه و بیشینه مقادیر خطا به ترتیب مربوط به تیمارهای صفر و ۱۸/۱۳ میلی‌موس بر سانتی‌متر بود. همچنین حسینی و همکاران (۱۳۹۴) عملکرد سویا تحت شرایط مدیریت کم‌آبیاری و شوری را با کمک مدل آکواکراپ ارزیابی نمودند.

شعبانی و همکاران (۱۳۹۸) عملکرد گیاه سویا با استفاده از مدل آکواکراپ تحت تنش شوری ارزیابی نمودند و دریافتند که مدل عملکرد را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. سعیدی و همکاران (۱۴۰۰) در برآورد روند تغییرات رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت، تحت تنش‌های شوری و حاصلخیزی از مدل آکواکراپ استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل‌های گیاهی باید امکان وجود تنش‌های محیطی را در نظر داشته و برای شرایط واقعی مناطق تحت کشت توسعه یابند. وو و همکاران (۲۰۲۲) از مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد، سطح سایه انداز و نیاز آبی گیاه ذرت در شرایط مختلف مدیریت آبیاری و کود استفاده نمودند و دریافتند که مدل در شرایط بدون تنش شبیه‌سازی دقیق‌تری دارد. فنگ و همکاران^۱ (۲۰۲۲) رشد رویشی ذرت را با استفاده از مدل آکواکراپ در شمال چین در شرایط آبیاری قطره‌ای و پوشش مالچ شبیه‌سازی کردند و دریافتند که برای دستیابی به نتایجی دقیق باید شرایط مدیریت مزرعه کامل در نظر گرفته شود. همچنین شیرازی و همکاران (۱۴۰۰) عملکرد و زیست‌توده ۹ رقم گندم و ۲ رقم ذرت توسط مدل آکواکراپ ارزیابی شد و نتایج نشان داد که در هنگام شبیه‌سازی در شرایط تنش آبی مدل دارای محدودیت‌هایی است.

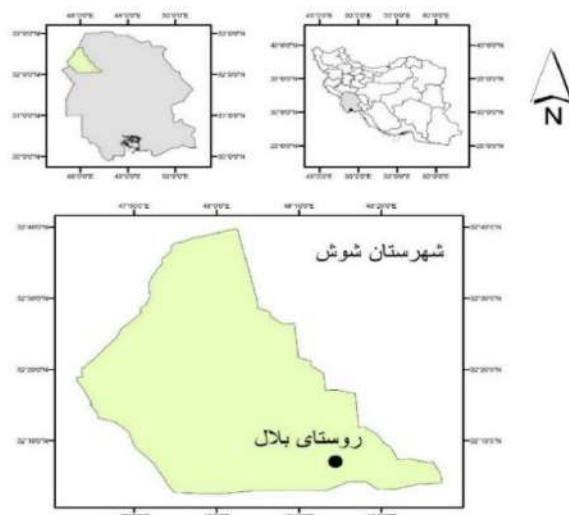
در این تحقیق، تیمارها شامل سطوح آبیاری و مقادیر شوری بودند. نتایج تحلیل حساسیت مدل بیانگر حساسیت بیش‌تر مدل بر روی پارامترهای بیشینه پوشش گیاهان و ضریب کاهش تاج پوشش گیاهان نسبت به سایر پارامترها بود. بنابراین با توجه به مطالعات و تجربیات گذشته در داخل و خارج ایران، می‌توان نتیجه گرفت که مدل آکواکراپ به دلیل استفاده آسان، محدود بودن پارامترهای ورودی و شبیه‌سازی در حد قابل قبول، می‌تواند به عنوان ابزار مناسبی برای تخمین عملکرد محصولات کشاورزی در شرایط مختلف آبیاری و راهکارهای مختلف مدیریت مزرعه برای افزایش کارایی مصرف آب مورد استفاده قرار گیرد. از طرفی مدل آکواکراپ در هر منطقه، برای گیاهان مختلف و شبیه‌سازی عملکرد آن‌ها نیاز به واسنجی و صحت‌سنجی دارد تا بتوان سناریوهای مختلف مدیریت مزرعه را مورد بررسی قرار داد. بنابراین در این تحقیق مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد محصول ذرت برای سطوح مختلف آبیاری و کود اوره در شرایط آب و هوایی شهرستان شوش واسنجی و صحت‌سنجی آن مورد ارزیابی قرار گرفت.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در روستای بلال شهرستان شوش از توابع استان خوزستان در سال ۱۳۹۳ انجام شد که اقلیم منطقه گرم و خشک و بارندگی سالیانه در حدود ۲۵۰ میلی‌متر است. کشت اصلی این شهرستان گیاه ذرت است. در رابطه با اهمیت این محصول در شهرستان شوش می‌توان به این نکته اکتفا کرد که در سال ۱۳۹۴ مقام نخست تولید ذرت در استان را به خود اختصاص داده است. موقعیت جغرافیایی شهرستان شوش در شکل (۱) آرایه شده است.

^۱ Feng et al



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

به دلیل اهمیت مشخصات آب و هوایی و خاک منطقه، اطلاعات مربوط به این دو عامل در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است.

جدول ۱. اطلاعات هواشناسی منطقه مورد مطالعه

ماه	دمای بیشینه (°C)	دمای کمینه (°C)	مقادیر بارندگی (mm)	میانگین رطوبت نسبی (%)	ساعات آفتابی (hr)
مرداد	۴۵/۴	۲۶	-	۴۶/۸	۸/۹
شهریور	۴۲	۲۲/۵	-	۵۰	۸/۹
مهر	۳۷	۱۷	۱۵/۵	۴۵/۵	۸
آبان	۲۸	۱۳	۸/۵	۶۲	۶

جدول ۲. ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

پارامتر	عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر	عمق ۳۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر
بافت خاک	لومی - رسی	لومی - رسی
هدایت هیدرولیکی اشباع (mm d^{-1})	۱۳۴	۱۳۴
رطوبت حجمی اشباع (%)	۴۵/۵۷	۴۵/۵۷
رطوبت حجمی در ظرفیت مزرعه (%)	۲۸	۲۸
رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی (%)	۵/۶	۵/۶
پتانسیم قابل جذب (ppm)	۱۸۳	۱۹۰
نیتروژن (%)	۰/۶۲	۰/۷۳
درصد ماده آلی (%)	۲/۲۶	۲/۷۲
PH	۷/۱۱	۷/۷۲

مطابق اعداد جدول (۱)، کمینه و بیشینه مقادیر دما در فصل کشت ذرت در منطقه مورد مطالعه برابر ۱۳ و ۴۵/۴ درجه سانتی‌گراد و به ترتیب مربوط به ماه‌های آبان و مرداد بود. مجموع بارندگی در طول فصل کشت ۲۴ میلی‌متر بود که این بارندگی‌ها صرفاً در دو ماه مهر و آبان، به ترتیب با مقادیر ۱۵/۵ و ۸/۵ میلی‌متر رخ داد. به احتمال زیاد، به دلیل کمبودن میزان بارندگی در طول فصل کشت، اثر بارش‌ها در میزان رشد گیاه ذرت ناچیز بوده

است. همچنین بر اساس داده‌های جدول (۱)، مقادیر رطوبت نسبی بین ۴۵ تا ۶۲ درصد متغیر بودند. همچنین خصوصیات خاک در اعماق صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متر در جدول (۲)، ارایه شده است.

مطابق اعداد جدول (۲) بافت خاک لومی رسی و تغییرات خصوصیات خاک در لایه ۱۰۰ سانتی‌متری سطح خاک ناچیز بود. از طرفی خاک محل انجام تحقیق (با میانگین شوری ۰/۵۴۳ دسی‌زیمنس بر متر) دارای وضعیت مناسبی برای کشت ذرت بود. مقادیر رطوبت حجمی نیز در نقاط رطوبتی اشباع، ظرفیت مزرعه و پژمردگی به ترتیب برابر ۴۵/۵ (به روش ستون آب آویزان)، ۲۸ و ۵/۶ (به روش صفحات فشاری) درصد به دست آمد.

با توجه به کشت وسیع ذرت در منطقه‌ی مورد مطالعه، در این تحقیق از یک رقم متداول در منطقه یعنی ذرت دانه‌ای رقم ۷۰۴ سینگل کراس استفاده شد. روش کاشت به صورت جوی پشته‌ای، با فواصل ۷۵ سانتی‌متر و تراکم کشت ۷۰ هزار بوته در هکتار انجام شد. جوی و پشته‌ها در کرت‌هایی به طول ۵ متر و عرض مفید ۴/۵ قرار داشتند و کرت‌ها از هم به فاصله یک جوی پشته به صورت نکاشت اجرا شدند. مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل با کمک تشت تبخیر به دست آمد. سپس با استفاده از مقادیر ضریب گیاهی در مراحل مختلف رشد، تبخیر و تعرق گیاه به دست آمد. در نهایت عمق آب آبیاری برای تیمارهای مختلف، با استفاده از تبخیر و تعرق گیاه و خصوصیات خاک مزرعه، مطابق جدول (۳) محاسبه شد. اعمال تیمارهای تنش آبی از آبیاری سوم به بعد و پس از سه برگی شدن بوته‌ها انجام شد.

جدول ۳. مقادیر آبیاری و کوددهی در سه سطح مختلف

شماره آبیاری	تاریخ آبیاری	سطوح آبیاری (میلی‌متر)			سطوح کود (کیلوگرم بر هکتار)		
		E0	E1	E2	N1	N2	N3
اول	۱۳۹۳/۴/۳۰	۱۵	۱۵	۱۵	۱۹۰	۱۵۲	۹۵
دوم	۱۳۹۳/۵/۵	۲۹	۲۹	۲۹	-	-	-
سوم	۱۳۹۳/۵/۱۴	۳۳	۲۶/۴	۱۶/۵	-	-	-
چهارم	۱۳۹۳/۵/۲۵	۳۵	۲۸	۱۷/۵	۱۶۸	۱۳۴/۴	۸۴
پنجم	۱۳۹۳/۶/۵	۷۸	۶۲/۴	۳۹	-	-	-
ششم	۱۳۹۳/۶/۱۷	۱۰۸	۸۶/۴	۵۴	-	-	-
هفتم	۱۳۹۳/۶/۲۹	۶۰	۴۸	۳۰	۹۰	۷۲	۴۵
هشتم	۱۳۹۳/۷/۹	۵۵	۴۴	۲۷/۵	-	-	-
نهم	۱۳۹۳/۷/۲۱	۳۵	۲۸	۱۷/۵	-	-	-

جهت کنترل مقادیر آب نفوذی به زمین از پارشال فلوم‌هایی که در بالادست و پایین‌دست مزرعه‌ی تحقیقاتی تعبیه شده بود استفاده گردید. آبیاری‌های اول تا سوم با دور آبیاری یک هفته و از آبیاری سوم به بعد دور آبیاری حدود دو هفته در نظر گرفته شد (با توجه به محدودیت تحویل آب به مزرعه). مقادیر کود اوره در سه سطح ۱۰۰، ۸۰ و ۵۰ درصد کود عرف منطقه به مصرف گیاه رسید. کود اوره به صورت کود سرک و در سه نوبت در هکتار). مقادیر کود اوره در سه سطح ۱۰۰، ۸۰ و ۵۰ درصد کود عرف منطقه به مصرف گیاه رسید. کود اوره به صورت کود سرک و در سه نوبت در اختیار گیاه قرار گرفت (جدول ۳). سطح سایه‌انداز در طول دوره‌ی رشد مطابق روند زیر اندازه‌گیری شد. مساحت سایه‌ی بوته‌های ذرت در نیم‌روز برای تیمارهایی که از آبیاری و کود کامل برخوردار بودند اندازه‌گیری شد. سپس از تقسیم این مساحت به مساحت کرت، درصد سطح سایه‌انداز به دست آمد. لازم به ذکر است که حدود ۴۰ روز بعد از شروع کشت، سطح سایه‌انداز در مزرعه ۱۰۰٪ شد که مقادیر اندازه‌گیری شده در جدول (۴) ارایه شده است.

جدول ۴. مقادیر سطح سایه‌انداز در فصل کشت

تعداد روز پس از کاشت	سطح سایه‌انداز (%)
۱۰	۵
۲۰	۱۵
۳۰	۸۰
۳۶	۱۰۰

به‌منظور افزایش دقت نمونه‌برداری، دو پشته‌ی وسط هر تیمار انتخاب شدند و داده‌های مورد نظر در جهت طولی (حدود دو متر) برداشت شد. با کمک این‌روش، اثرات جانبی (واحه‌ای) بر روی هر یک از تیمارها به حداقل می‌رسد. پس از برداشت دانه‌های بلال، وزن خشک دانه‌های هر تیمار به‌طور جداگانه وزن شد. مدل آکواکراپ برای محدوده وسیعی از گیاهان زراعی و شرایط آب و هوایی و توپوگرافی قابل استفاده است و در عین این-که مدلی ساده و کار کردن با آن راحت است خروجی‌های آن نیز از دقت خوبی برخوردار هستند (ریس و همکاران، ۲۰۰۹).



شکل ۲. منوی اصلی مدل آکواکراپ

در شکل (۲) نمایی از منوی اصلی مدل آکواکراپ ارائه شده است. در مدل آکواکراپ از روش فائو- پنمن- مانتیث برای تخمین مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شده است. این روش توسط سازمان خوار و بار کشاورزی سازمان ملل متحد ارائه شده و معتبرترین روش تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل است. علت دیگر انتخاب این روش توسط مدل آکواکراپ اساس و ماهیت فیزیکی آن است، به‌علاوه در این‌روش پارامترهای فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی گیاه لحاظ شده است. در این مدل، مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل از رابطه (۱) به دست آمده و بعد از ضرب در ضریب گیاهی (در هر مرحله رشد گیاه) مقدار تبخیر و تعرق واقعی گیاه محاسبه می‌شود (آلن و همکاران^۱، ۱۹۹۸).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

¹ Allen et al

که در رابطه (۱)، ET_0 : تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن (mmd^{-1}) ، Δ : شیب منحنی فشار بخار $(\text{KPa}^\circ\text{C}^{-1})$ ، R_n : تشعشع خالص در سطح پوشش گیاهی $(\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1})$ ، G : شار گرمای داخل خاک $(\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1})$ ، γ : ثابت رطوبتی $(\text{KPa}^\circ\text{C}^{-1})$ ، T : متوسط دمای روزانه هوا در ارتفاع ۲ متری سطح زمین $(^\circ\text{C})$ ، u_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (ms^{-1}) و $e_s - e_a$: کمبود فشار بخار (KPa) است.

این مدل از طریق تفکیک کردن تبخیر و تعرق حقیقی به تبخیر از سطح خاک (E) و تعرق از سطح گیاه زراعی (T_r) و تفکیک عملکرد نهایی محصول (Y) به مقدار ماده خشک (B) و شاخص برداشت (HI) استنتاج شده است. تفکیک تبخیر و تعرق حقیقی به تبخیر از سطح خاک و تعرق از سطح گیاه زراعی باعث می شود که از تأثیر دادن آب مصرفی که صرف تولید نمی شود جلوگیری گردد. همچنین تفکیک عملکرد نهایی محصول به مقدار ماده خشک و شاخص برداشت اجازه می دهد روابط پایه ای بین عوامل محیطی و B ، همچنین عوامل محیطی و HI قابل تمایز خواهد بود. رابطه (۲) به عنوان هسته مدل AquaCrop در برآورد رشد گیاهان عمل می کند (راس و همکاران، ۲۰۰۹):

$$B = WP \cdot \sum T_r \quad (2)$$

در رابطه (۲)، T_r : تعرق محصول (mm) و WP : پارامتر بهره وری آب (kgmm^{-1}) یا (kgm^{-2}) که مقدار تعرق صورت گرفته در دوره زمانی که مقدار معینی ماده خشک تولید شده است. اندام هوایی گیاه منبعی برای تعرق واقعی گیاهی تعریف شده و مقدار تعرق آن متناسب با پارامتر بهره وری آب (WP) است. شاخص برداشت با HI نشان داده می شود که با استفاده از مقدار عملکرد (Y) و مقدار ماده خشک تولیدی (B) بر اساس رابطه (۳) تعریف می شود (راس و همکاران، ۲۰۰۹):

$$HI = Y/B \quad (3)$$

مدل آکواکراپ با سایر مدل های مشابه که روی مبحث آب تمرکز دارند متفاوت است. در این مدل از سطح سایه انداز به جای شاخص سطح برگ (CC) استفاده شده است. همچنین از مقدار شاخص نورمال شده بهره وری آب برای تعیین تعرق واقعی و غلظت CO_2 (که به مدل توانایی زیادی برای برون یابی در مکان ها و فصل های مختلف می بخشد) استفاده شده است (محمدمدی و همکاران، ۱۳۹۳). در این مدل، مقدار سطح سایه انداز از زمان جوانه زدن تا زمانی که به حد نهایی خود برسد با استفاده از دو معادله در دو بخش شبیه سازی می شود. رابطه (۴) برای پوشش سبز اولیه و رابطه (۵) برای بیشینه پوشش سبز، یا ضریب رشد حداکثری استفاده می شود:

$$CC = CC_0 e^{-CGC \cdot t} \quad (4)$$

$$CC = CC_X - (CC_X - CC_0) \cdot e^{-CGC \cdot t} \quad (5)$$

در روابط (۴) و (۵)، CC : سطح سایه انداز در زمان t ، CC_0 : سطح سایه انداز اولیه، CGC : ضریب رشد سطح سایه انداز به صورت قسمت در روز، CC_X : سطح سایه انداز بیشینه و t : زمان (بر حسب روز) است.

کارایی مدل

در این تحقیق، کارایی مدل با استفاده از شاخص های آماری، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، ضریب کارایی مدل (CE)، شاخص سازگاری ویلموت (d)، حداکثر خطا (ME) و ضریب باقیمانده (CRM) که روابط ریاضی آن ها در زیر ارائه شده است مورد ارزیابی قرار گرفت:

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2} \quad (7)$$

¹ Biomass

² Harvest Index

$$d = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \quad (8)$$

$$ME = \frac{\text{Max}|S_i - M_i|}{\bar{M}} \times 100 \quad (9)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (10)$$

پارامترهای S_i و M_i : به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده، n : تعداد مشاهدات و \bar{M} : میانگین مقادیر M_i است. مطلوبیت شاخص‌های ME و $RMSE$ در نزدیک بودن آن به صفر است. دامنه تغییرات شاخص‌های CE و d از $-\infty$ تا $+1$ است که مقدار آن‌ها هر چه به یک نزدیکتر باشد نشان‌دهنده کارایی بهتر مدل است. شاخص CRM نشان‌دهنده برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد مقادیر شبیه‌سازی شده مدل در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده است (سینگ و همکاران، ۲۰۰۸)

در این تحقیق، آنالیز حساسیت مدل آکواکراپ بر اساس روشی که توسط لیو و همکاران^۱ (۲۰۰۷) و هنگ و همکاران (۲۰۰۷) پیشنهاد شده است، انجام شد.

یافته‌ها

آنالیز حساسیت مدل آکواکراپ

در این روش، بر اساس دامنه تغییرات ضریب حساسیت، میزان حساسیت مدل به هر پارامتر به صورت زیاد، متوسط، کم و بدون حساسیت تعیین شده است. بازه‌های مختلف ضریب حساسیت، تعیین شدت حساسیت و نتایج آنالیز حساسیت مدل آکواکراپ در جدول (۵) ارائه شده است.

^۱ Liu et al

جدول ۵. ضریب و آنالیز حساسیت برخی پارامترهای ورودی مدل آکواکراپ

دامنه تغییرات	$S_e=0$	$0 < S_e < 0.3$	$0.3 < S_e < 1/5$	$S_e > 1/5$
شدت حساسیت	بدون حساسیت	حساسیت کم	حساسیت متوسط	حساسیت زیاد
پارامترهای ورودی مدل	مقدار S_e در حالت +۲۵٪	مقدار S_e در حالت -۲۵٪	درجه حساسیت	
K_{cb}	K_{cb}	متوسط		
تراکم کشت	تراکم کشت	کم		
رشد پوشش تاجی (CCG)	۰/۲۵	کم - متوسط		
بهره‌وری آب نرمال شده (WP)	۱/۴۵	متوسط		
شاخص برداشت (HI)	۰/۱۲	کم - متوسط		
زمان سبز شدن بذرها	۰/۰۰	ندارد		
زمان رشد سبزینه‌ای گیاه	۰/۰۹	کم		
زمان گل‌دهی	۰/۸۴	متوسط - زیاد		
زمان تشکیل غلاف	۰/۰۵	کم		
زمان پر شدن غلاف توسط دانه	۰/۷۱	متوسط - زیاد		
تعداد روز از کاشت تا ماکزیمم عمق ریشه	۰/۰۴	کم		
زمان از کاشت بذرها تا گل‌دهی	۰/۰۶	کم		
زمان رسیدگی فیزیولوژیکی	۰/۱	کم		
هدایت هیدرولیکی اشباع عمودی	۰/۰۰	کم		

مطابق نتایج جدول (۵)، زمان گل‌دهی و زمان پر شدن غلاف توسط دانه‌ها حساس‌ترین پارامترهای مدل (دارای درجه حساسیت متوسط - زیاد) بودند. بنابراین باید دقت بیشتری در اندازه‌گیری این پارامترها لحاظ نمود، زیرا در غیر این صورت ممکن است خطای شبیه‌سازی مدل به شدت افزایش یابد. همچنین مدل نسبت به زمان سبز شدن دانه‌ها دارای هیچ حساسیتی نبود. سایر پارامترها با درجه حساسیت کم تا متوسط در جدول (۵) مشخص شده‌اند.

نتایج آنالیز حساسیت این مدل (در شبیه‌سازی کشت گندم) توسط محمدی و همکاران (۱۳۹۳) بیانگر این بود که مدل کمترین حساسیت را نسبت به پارامترهای ضریب رشد پوشش (CGC) و زمان سبز شدن بذرها و بیشترین حساسیت را نسبت به شاخص برداشت و بهره‌وری آب نرمال شده دارد که مؤید نتایج این تحقیق است.

نتایج عملکرد محصول

همه ورودی‌های مدل آکواکراپ قابل اندازه‌گیری و تعیین دقیق نیستند و یا تعیین دقیق آن‌ها نیازمند هزینه و زمان زیاد هستند. بنا بر این مدل توسط برخی از پارامترهای گیاهی دارای حساسیت بیشتر (مراجعه شود به جدول ۵) با استفاده از تیمار شاهد واسنجی شد (جدول ۶). البته مقادیر برخی از پارامترها (مطابق با پیشنهاد منوال مدل) به صورت پیش فرض مدل در نظر گرفته شدند که جهت اختصار در جدول (۶) ارایه نشده است. مطابق جدول (۶) مقادیر واسنجی مدل برای WP، CGC و HI جهت شبیه‌سازی عملکرد ذرت به ترتیب برابر ۳۱ (گرم بر مترمربع)، ۲۴/۲ و ۵۰ درصد به دست آمد.

جدول ۶. مقادیر واسنجی پارامترهای گیاهی

پارامتر	مقدار واسنجی	واحد
WP	۳۱	gr. m ⁻²
GDD	۱۰ - ۲۹/۵	°C
CGC	۲۴/۲	%
CDC	۱/۰۷۴	%
HI	۵۰	%

در مطالعات مشابه، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۴) در واسنجی مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت، مقادیر بهره‌وری آب نرمال شده (WP)، بیشینه سطح پوشش گیاهی (CCX) و ضریب رشد پوشش (CGC) را به ترتیب ۲۹/۷ (گرم بر مترمربع)، ۸۴ و ۱۲/۴ به دست آوردند. همچنین حسن‌لی و همکاران (۱۳۹۳) نیز بعد از واسنجی مدل آکواکراپ برای گیاه ذرت، مقادیر CGC، HI و WP را به ترتیب برابر ۱۶، ۴۸ و ۳۳/۷ گرم بر مترمربع پیشنهاد کردند.

جدول ۷. مقادیر عملکرد واقعی و شبیه‌سازی شده (تن در هکتار)

تیمار	تکرار اول	تکرار دوم	تکرار سوم	تکرار چهارم	میانگین	مقادیر شبیه‌سازی
N0E0	۱۵	۱۴/۸۳۳	۱۴/۶	۱۴/۸۱۱	۱۴/۸۱	۱۴/۸
N0E1	۱۳/۸۶۶	۱۳/۶۶۶	۱۴/۱۳۳	۱۳/۳۳۳	۱۳/۷۵	۱۳/۶۲۱
N0E2	۱۱	۹/۱۶۶	۹/۵۳۳	۱۰/۳۳۳	۱۰/۰۱	۹/۳
N1E0	۱۴/۸۶۶	۱۴/۳	۱۴/۶	۱۴/۶۳۳	۱۴/۶	۱۲/۷۹۱
N1E1	۱۴/۱۶۶	۱۴/۰۶۶	۱۳/۷۳۳	۱۳/۹	۱۳/۹۷	۱۲/۳۲۸
N1E2	۱۰/۶۶۶	۱۰/۸۳۳	۹/۸۶۶	۹/۴۶۶	۱۰/۲۱	۹/۶۹۶
N2E0	۱۳/۸۳۳	۱۴/۶۶۶	۱۳/۹۳۳	۱۴	۱۴/۱۱	۷/۴۱۱
N2E1	۱۳/۶۶۶	۱۲/۸۶۶	۱۳	۱۲/۴	۱۲/۹۸	۷/۵۳۴
N2E2	۹/۱۶۶	۱۰	۸/۵	۹/۲۲۲	۹/۲۲	۶/۸۲۲

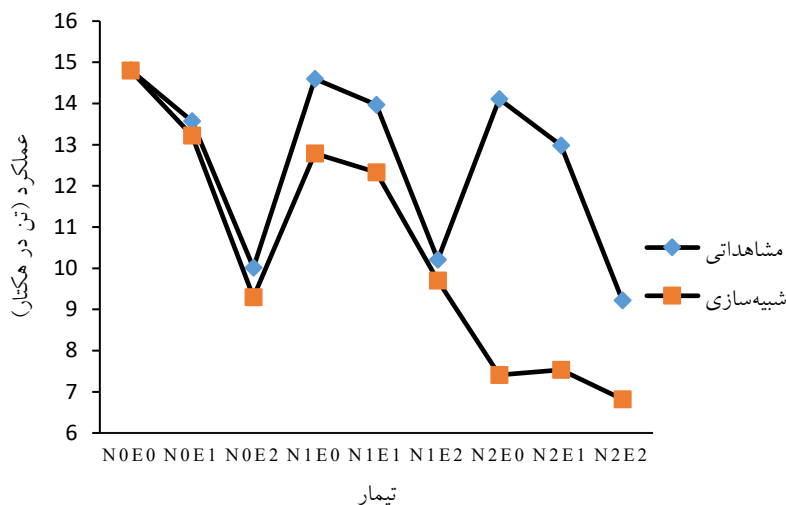
نتیجه پژوهش امیری و همکاران (۱۳۹۵) نیز بیانگر این بود که مدل در پیش‌بینی عملکرد گندم دارای دقت مناسبی است به طوری که مقدار خطای نرمال شده کمتر از پنج درصد بود.

این مقادیر متفاوت در تحقیقات مختلف، بیانگر نیاز مبرم به واسنجی و اعتبارسنجی مدل آکواکراپ می‌باشد. در نهایت بعد از واسنجی مدل، مقادیر عملکرد برای کلیه تیمارهای تحقیق (به جز تیمار شاهد که برای واسنجی استفاده شده بود) شبیه‌سازی شد. نتایج عملکرد تولید محصول به تفکیک تیمارهای اعمال شده به همراه مقادیر شبیه‌سازی شده در جدول (۷) ارائه شده است.

با توجه به جدول (۷) مشاهده می‌شود که در تیمارهای با تنش ۵۰٪ کود، مقادیر شبیه‌سازی تفاوت نسبتاً زیادی با مقادیر مشاهده‌ای دارند و مدل نتیجه‌ی قابل قبولی برای این شرایط ارائه نکرده است. در واقع واکنش مدل به شرایط تنش کود خیلی شدیدتر از شرایط واقعی بوده است، ولی اثر تنش آبی ناچیز بود.

در تحقیقی که توسط قمری و همکاران (۱۳۸۸) انجام شد، مشخص گردید که در مقادیر مصرف بالای کود، اثر تنش خشکی بر عملکرد شدیدتر بوده است. همچنین حسینی و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقات خود بر روی عملکرد سویا با کمک مدل آکواکراپ متوجه شدند با کاهش مقدار آب آبیاری، درصد خطای مدل در پیش‌بینی عملکرد سویا افزایش یافت.

مطابق شکل (۳)، مقادیر شبیه‌سازی شده در بیش‌تر تیمارها کمتر از مقادیر واقعی به‌دست آمد. این موضوع توسط مقادیر شاخص‌های CE و d که در جدول (۸) ارایه شده‌اند، نیز قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود در تیمارهای N0E1، N1E0، N0E2، N1E1 و N1E2 شبیه‌سازی نسبتاً مناسب بوده و روند مقادیر مشاهده‌ای را طی کرده است.



شکل ۳. مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای عملکرد (نمودار)

جدول ۸. مقایسه‌ی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی عملکرد (با شاخص‌های آماری)

تیمارها	CE	RMSE	d	ME	CRM
N0E1	-۰/۲	۰/۳۲	۰/۷۳	۳/۷۳	۰/۰۱
N0E2	-۰/۹۹	۱	۰/۲۶	۱۶/۹۹	۰/۰۷
N1E0	-۸۰/۶۹	۱/۸۲	-۰/۶۹	۱۴/۲۲	۰/۱۲
N1E1	-۹۸/۶۴	۱/۶۵	-۰/۵۲	۱۳/۱۶	۰/۱۲
N1E2	-۰/۸۳	۰/۷۶	۰/۴۵	۱۱/۱۴	۰/۰۵
N2E0	-۴۱۷/۵۲	۶/۷۱	-۵/۴۴	۵۱/۴۳	۰/۴۷
N2E1	-۱۴۴/۶۶	۵/۴۷	-۴/۱۶	۴۷/۲۳	۰/۴۲
N2E2	-۲۰/۴	۲/۴۶	-۱/۱۷	۳۴/۴۶	۰/۲۶

اما در تیمارهای N2E0، N2E1 و N2E2 نمودارهای شبیه‌سازی و مشاهده‌ای کاملاً با هم اختلاف داشته و از روند مشخصی تبعیت نمی‌کنند. اختلاف موجود بین مقادیر اندازه‌گیری و مشاهده‌ای توسط شاخص‌های آماری موجود در جدول (۸) مشاهده می‌گردد. با توجه به جدول (۸) ملاحظه می‌شود که تمام شاخص‌های آماری نشان از عدم شبیه‌سازی مناسب در تیمارهای N2E0، N2E1 و N2E2 دارد. اما در سایر تیمارها کم و بیش شبیه‌سازی مناسب است.

مقادیر CE هر چه به یک نزدیک‌تر باشند شبیه‌سازی مناسب‌تر است و با توجه به داده‌های جدول (۸)، پارامتر CE دارای تغییرات زیاد بوده و بازه‌ی وسیعی از مقادیر (-۴۱۷/۵۲ تا -۰/۲) را شامل شده است. با این حال در سه تیمار N0E1، N0E2 و N1E2 مقادیر CE بین صفر و -۱ به دست آمده است و شبیه‌سازی خوبی تشخیص داده شده است. مقادیر RMSE هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد شبیه‌سازی بهتری رخ داده است. طبق جدول (۸) غیر از سه تیمار آخر، برای سایر تیمارها مقادیر RMSE نسبتاً قابل قبول بوده و شبیه‌سازی مناسب ارزیابی می‌شود.

مقادیر d نیز برای پنج تیمار اول نسبتاً مناسب بوده و به یک نزدیک است اما برای سه تیمار آخر مقادیر قابل قبول نیست. شاخص ME برای تیمار $NOE1$ بهترین عملکرد را نشان می‌دهد و برای سه تیمار آخر مقادیر خطای زیاد را ارزیابی می‌کند. برای سایر تیمارها نیز خطایی بین ۱۱ تا ۱۷ محاسبه شده است. در نهایت شاخص CRM در بین شاخص‌های آماری محاسبه شده از کمترین حساسیت برخوردار بوده و بازه‌ی اعداد به دست آمده کوچک است. برای پنج تیمار اول مقادیر مطلوب‌تری نسبت به سه تیمار آخر به دست آمده است.

در مجموع نتایج آماری نشان می‌دهد که بهترین شبیه‌سازی در تیمار $NOE1$ که کم‌ترین تنش در آن وارد شده، اتفاق افتاده است. هر چه تنش وارد افزایش یافته، مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای اختلاف بیشتری پیدا کرده‌اند. در تیمارهایی که تنش ۵۰ درصد کود اعمال شده، مقادیر شبیه‌سازی اختلاف بسیار زیادی با مقادیر مشاهده‌ای دارند و طبق شاخص‌های آماری که در جدول (۸) محاسبه شده است، در این تیمارها شبیه‌سازی مناسب نیست و مدل آکواکراپ توانایی پیش‌بینی عملکرد محصول تحت این تنش‌ها را نداشته است.

مهرآذر و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی که به شبیه‌سازی عملکرد ذرت با کمک مدل آکواکراپ تحت شرایط تنش‌شوری پرداختند، مقادیر R^2 ، $RMSE$ و MAE به ترتیب برابر ۰/۸۳، ۰/۷۱ و ۰/۵۸ به دست آمد. در کل، نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر بیش‌برآورد مدل بود (مدل عملکرد محصول را اندکی بیشتر از واقعیت) برآورد می‌کرد. همچنین مطابق نتایج با بازاده و ساراتبری (۱۳۸۹)، مدل آکواکراپ توانست مقادیر عملکرد محصول سوپا را با خطای نسبی ۲ تا ۴/۶ درصد شبیه‌سازی کند. در تحقیق آن‌ها، مقادیر شاخص‌های آماری EF ، $RMSE$ و ME به ترتیب برابر ۰/۸۳، ۴/۴۲ و ۵/۹۷ به دست آمد. همچنین نتیجه تحقیق حیدری نیا و همکاران (۱۳۹۴) نشان داد که مدل آکواکراپ اگر چه با افزایش شوری دقت آن کم شد اما عملکرد دانه، زیست توده و سطح سایه‌انداز را به خوبی شبیه‌سازی کرد. به طور کلی طبق نتایج این تحقیق و مطالعات قبلی، در صورت واسنجی و صحت سنجی مناسب، مدل آکواکراپ توانایی خوبی در شبیه‌سازی عملکرد گیاه داشته که البته در شرایط تنش شدید آب و کود هنوز نیاز به اصلاح این مدل وجود دارد.

بحث

در این تحقیق کارایی مدل آکواکراپ در پیش‌بینی عملکرد گیاه ذرت در شرایط مختلف مدیریت آب و کود مورد ارزیابی قرار گرفت. این تحقیق در قالب طرح کرت‌های خرد شده با تیمار اصلی کود اوره (شامل ۱۰۰، ۸۰ و ۵۰ درصد کود مورد نیاز گیاه ذرت (N_2 و N_1 ، N_0) و تیمار فرعی مقدار آب آبیاری (شامل آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه (E_2 و E_1 ، E_0) با چهار تکرار اجرا شد.

نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان داد مدل آکواکراپ به تنش کود حساسیت بیشتری نسبت به تنش آبی داشت که خیلی با واقعیت مطابقت نداشت. در نهایت می‌توان گفت که در صورت رعایت کلیه فرآیندهای تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی به صورت مناسب و دقیق، می‌توان از مدل آکواکراپ انتظار شبیه‌سازی روند تغییرات رشد و عملکرد قابل قبول داشت (البته به جز شرایط تنش رطوبتی و کودی شدید). با توجه به تاثیر پارامترهای اقلیمی که هم بر مقدار نیاز آبی و دوره رشد گیاه ذرت موثر است، همچنین نوع خاک که در مناطق مختلف متفاوت است، پیشنهاد می‌گردد از ضرایب مراحل دوره رشد و ضرایب مقدار رشد این تحقیق به عنوان اعداد اولیه و پیش‌فرض استفاده شود ولی نتایج مربوط عملکرد کلی و زیست توده قابل تعمیم نیست.

تشکر و قدردانی

از اداره جهاد کشاورزی شهرستان شوش به دلیل همکاری در تأمین بخشی از امکانات مورد نیاز این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- ابراهیمی پاک، نیازعلی، اگدرنژاد، اصلان، و خدادادی دهکردی، داود. (۱۳۹۷). ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت تیمارهای کم‌آبیاری و کاربرد سطوح مختلف سوپر جاذب. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۸(۳)، ۱۸۴-۱۶۶.
http://www.waterjournal.ir/article_74092.html
- ابراهیمی، میلاد، وردی نژاد، وحیدرضا، و مجنونی هریس، ابوالفضل. (۱۳۹۴). شبیه‌سازی رشد ذرت تحت مدیریت‌های مختلف آب و نیتروژن با مدل AquaCrop. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۲(۲)، ۲۲۰-۲۰۷.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2015.55926.207-220>
- امیری، ابراهیمی، بحرانی، عبد...، خرسند، افشین، و حق جو، مهتا. (۱۳۹۵). ارزیابی مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه و بیوماس گندم، تحت تنش کم‌آبی. نشریه دانش آب و خاک، ۲۵(۴.۲)، ۲۲۹-۲۱۷.
https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4639.html
- ایزدی، زهره، نصرالهی، علی حیدر، و حقیقتی، بیژن. (۱۳۹۷). ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد سیب‌زمینی تحت تنش آبی. مجله تحقیقات خاک و آب ایران، ۴۹(۱)، ۱۸۰-۱۷۱.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2017.232438.667675>
- بابازاده، حسین، و سرانی تبریزی، مهدی. (۱۳۹۱). ارزیابی مدل AquaCrop تحت شرایط مدیریت کم‌آبیاری سویا. دو ماهنامه آب و خاک(علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۶(۲)، ۲۳۹-۲۲۹.
<https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.14156>
- حسن لی، محمد، افراسیاب، پیمان، و ابراهیمیان، حامد. (۱۳۹۴). ارزیابی مدل های AquaCrop و SALTMED در تخمین عملکرد محصول ذرت و شوری خاک. ماهنامه تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، ۴۶(۳)، ۴۹۸-۴۸۷.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2015.56738>
- حسینی، سیده طیبه، خوش روش، مجتبی، ضیاتباراحمدی، میرخالق، و قدمی فیروزآبادی، علی. (۱۳۹۵). ارزیابی عملکرد سویا با مدل AquaCrop تحت تاثیر مدیریت شوری و کم‌آبیاری. فصلنامه پژوهش آب در کشاورزی (علوم آب و خاک)، ۳۰(۳)، ۳۶۱-۳۷۲.
<https://dx.doi.org/10.22092/jwra.2016.107156>
- حیدری نیا، مولود، برومند نسب، سعید، ناصری، عبدعلی، و الباجی، محمد. (۱۳۹۶). ارزیابی مدل AquaCrop در تخمین عملکرد ذرت و شوری خاک تحت شرایط مدیریت‌های مختلف زراعی و آبیاری با آب شور. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۸(۱)، ۶۱-۴۹.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2017.61340>
- خلیلی، نجمه، داوری، کامران، عزیزاده، امین، کافی، محمد، و انصاری، حسین. (۱۳۹۴). شبیه‌سازی عملکرد گندم دیم با استفاده از مدل گیاهی آکواکراپ، مطالعه موردی ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم سیسب، خراسان شمالی. مجله آب و خاک، ۲۸(۵)، ۹۳۰-۹۳۹.
<https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.34927>
- رحیمی خوب، حدیثه، سهرابی، تیمور، و دلشاد، مجتبی. (۱۳۹۹). تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاه ریحان در مدل AquaCrop تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۶)، ۱۳۴۱-۱۳۵۱.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2020.298460.668516>
- سعیدی، رضا، رضانی اعتدالی، هادی، ستوده نیا، عباس، نظری، بیژن، و کاویانی، عباس. (۱۳۹۰). ارزیابی مدل AquaCrop در برآورد روند تغییرات رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت، تحت تنش‌های شوری و حاصلخیزی. مجله تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۴(۱)، ۱۹۵-۲۱۰.
<https://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.2473.1652>
- شعبانی، اسماعیل، ذاکری نیا، مهدی، و حسام، موسی. (۱۳۹۸). ارزیابی کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد سویا رقم ویلیامز در استان گلستان تحت تنش شوری ناشی از آب دریای خزر و سطوح مختلف آبیاری. علوم مهندسی و آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، ۴۲(۲)، ۴۹-۶۲.
<https://dx.doi.org/10.22055/jise.2017.18343.133262>

- عطایی، پریسا، رحیمی خوب، علی، و عرب، مصطفی. (۱۳۹۸). ارزیابی کارایی روش نیمه کمی مدل AquaCrop برای پیش‌بینی رشد تریچه با سطوح مختلف کود نیتروژن. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰(۶)، ۱۵۵۳-۱۵۶۷.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2019.270122.668063>
- قمری، محسن، اندرزیان، بهرام، بخشنده، عبدالمهدی، قرینه، محمدحسین، و فتحی، قرت اله. (۱۳۹۰). شبیه‌سازی اثرات تنش خشکی و نیتروژن بر عملکرد، آب و کارایی مصرف نیتروژن ذرت با استفاده از مدل شبیه‌سازی CERES-Maize. مجله علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی، ۳(۱۱)، ۳۱-۲۱.
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.2008403.1390.3.11.2.1>
- محمدی، مسعود، داوری، کامران، قهرمان، بیژن، انصاری، حسین، و حق وردی، امیر. (۱۳۹۴). واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره تحت تنش همزمان شوری و خشکی. نشریه علمی-پژوهشی پژوهش آب در کشاورزی، ۲۹(۳)، ۲۹۵-۲۹۵.
<https://dx.doi.org/10.22092/jwra.2015.103054.277>
- مومنی، رضوانه، بهبهانی، محمودرضا، نظری فر، محمد هادی، و آزادگان، بهزاد. (۱۳۹۰). ارزیابی سناریوهای افزایش بهره‌وری مصرف آب گندم دیم در حوزه کرخه با استفاده از آنالیزهای مدیریتی مدل رشد گیاهی CropSyst. مدیریت آب و آبیاری، ۱(۱)، ۳۹-۴۰.
https://journals.ut.ac.ir/article_23383.html
- مهرآذر، آیدا، سلطانی، جابر، و رحمتی، امید. (۱۳۹۵). ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی واکنش عملکرد ذرت تحت تنش شوری. نشریه علمی-پژوهشی آب و خاک، ۳۰(۵)، ۱۴۳۹-۱۴۲۶.
<https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.43858>

References

- Allen, R., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No, 56.
https://www.researchgate.net/publication/235704197_Crop_evapotranspiration-Guidelines_for_computing_crop_water_requirements-FAO_Irrigation_and_drainage_paper_56
- Amiri, E., Bahrani, A., Khorsand, A., & Haghjoo, M. (2016). Evaluating AquaCrop Model Performance to Predict Grain Yield and Wheat Biomass, Under Water Stress. *Water and Soil Science*, 25(4/2), 217-229. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4639.html [Persian]
- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K. M., Kebede, A., & Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water-deficient and irrigated barley (*Hordeumvulgare*). *Agricultural Water Management*. 97(11), 1838-1846.
<https://econpapers.repec.org/scripts/redir.pf?u=http%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2FS0378-3774%2810%2900226-X;h=repec:eee:agiwat:v:97:y:2010:i:11:p:1838-1846>
- Araya, A., Keesstra, S. D., & Stroosnijder, L. (2010). Simulating yield response to water of Teff (*Eragrostistef*) with FAO's AquaCrop model. *Field Crops Research*. 116, 196-204.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2009.12.010>
- Ataei, P., Rahimikhoob, A., & Arab, M. (2019). Performance Evaluation of the AquaCrop Semi-Quantitative Method for Prediction of Radish Growth under Different Levels of Nitrogen Fertilizer. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6), 1553-1567.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2019.270122.668063> [Persian]
- Babazadeh, H., & Sarai Tabrizi, M. (2012). Assessment of AquaCrop model under soybean deficit irrigation management conditions. *Journal of Water and Soil*. 26 (2), 329-339.
<https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.14156> [Persian]
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No, 33.
[https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjtlaadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=552874](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjtlaadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=552874)
- Duncan, k., & Nobert, J. (2015). Assessment of the impact of climate change and adaptation strategies on maize production in Uganda. *Physics and chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 93, 1-9.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2015.09.005>

- Ebrahimi, M., Verdinejad, V., & Mjnooni - Heris, A. (2015). Dynamic Simulation through Aqua Crop of Maize Growth under Different Management Decisions of Water Application and Nitrogen Fertilizer Use. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(2), 207-220.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2015.55926> [Persian]
- Ebrahimipak, N., Egdarnejad, A., & Khodadadi Dehkordi, D. (2018). Evaluation of AquaCrop Model to Simulate Corn Yield under Water deficit and Superabsorbent application. *Irrigation and Water Engineering*, 8(3), 166-184. http://www.waterjournal.ir/article_74092.html [Persian]
- Feng, D., Li, G., Wang, D., Wulazibieke, M., Cai, M., Kang, J., Yuan, Z., & Xu, H. (2022). Evaluation of AquaCrop model performance under mulched drip irrigation for maize in Northeast China. *Agricultural Water Management*, 261, 107372. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021>
- Ghamari, M., Andarzian, B., Bakhshandeh, A.M., Gharineh, M. H., & Fathi, GH. (2011). Simulating Effects of Drought and Nitrogen Stress On Yield, Water and Nitrogen Use Efficiency of Corn Using Ceres-Maize Simulating Model. *Crop Physiology Journal*, 3 (11), 21-31.
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.2008403.1390.3.11.2.1> [Persian]
- Hassanli, M., Afrasiab, P., Ebrahimian, H. (2015). Evaluation of AquaCrop vs SALTMED Models to Estimate Crop Yield and Soil Salinity. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(3), 487-498.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2015.56738> [Persian]
- Heidarinia, M., Boroomand Nasab, S., Naseri, A., & Albaji, M. (2017). AquaCrop model evaluation to estimate of Maize yield and soil salinity under different agriculture managements and irrigation with saline water. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(1), 49-61.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2017.61340> [Persian]
- Heng, L., Hsiao, T.C., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO aquaCrop model for irrigated and water-deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101, 488-498.
<http://dx.doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs>
- Hengsdijk, H., Bouman, B.A.M., Nieuwenhuyse, A., & Jansen, H.G.P. (1999). Quantification of land use systems using technical coefficient generators: a case study for the Northern Atlantic zone of Costa Rica. *Agricultural Systems*, 61(2), 109-121. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(99\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(99)00041-4)
- Hosseini, S., Khoshravesh, M., Ziatabar Ahmadi, M., & Ghadami Firouzabadi, A. (2016). Evaluation of Soybean Yield by Aquacrop Model Under Salinity and Deficit Irrigation Management. *Journal of Water Research in Agriculture*, 30 (3), 361-372. <https://dx.doi.org/10.22092/jwra.2016.107156> [Persian]
- Izadi, Z., Nasrollahi, A., & Haghghati, B. (2018). Evaluation of the AquaCrop model to simulation of the potato growth and yield under water stress. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(1), 171-180. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2017.232438.667675> [Persian]
- Kelly, T.D. & Foster, T. (2021). AquaCrop-OSPy: Bridging the gap between research and practice in crop-water modeling. *Agricultural Water Management*, 254, 106976.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106976>
- Khalili, N., Davary, K., Alizadeh, A., Kafi, M., & Ansari, H. (2015). Simulation of Rainfed Wheat Yield using AquaCrop Model, Case Study: Sisab Rainfed Researches Station, Northern Khorasan. *Water and Soil*, 28(5), 930-939. <https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.34927> [Persian]
- Liu, H.F., Genard, M., Guichard, S., & Bertin, N. (2007). Model-assisted analysis of tomato fruit growth about carbon and water fluxes. *Journal of experimental botany*, 58(13), 3567-3580.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erm202>

- 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. <https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.43858> [Persian]
- Mohamadi, M., Davari, K., Ghahraman, B., Ansari, H., & Haghverdi, A. (2015). Calibration and Validation of AquaCrop Model for Simulation of Spring Wheat Yield under Simultaneous Salinity and Water Stress. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29 (3), 277-295. <https://dx.doi.org/10.22092/jwra.2015.103054> [Persian]
- Momeni, R., Behbahani, M., Nazari far, M., & Azadegan, B. (2011). Evaluation of Increasing Water Productivity Scenarios for Rain-Fed Wheat by Management Analysis of CropSyst Crop Model in Karkheh Basin. *Water and Irrigation Management*, 1(1), 29-40. https://journals.ut.ac.ir/article_23383.html [Persian]
- Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., Ghameshlou, A.N. & Khoshravesh, M., (2021). The evaluation of DRAINMOD-S and AquaCrop models for simulating the salt concentration in soil profiles in areas with saline and shallow water table. *Journal of Hydrology*, 598, 126259. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126259>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101, 438-447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Rahimikhoob, H., Sohrabi, T., & Delshad, M. (2020). Sensitivity Analysis of Basil Crop Growth Parameters in the Aquacrop Model under Different Nitrogen Fertilizer Stresses. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(6), 1341-1351. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2020.298460.668516> [Persian]
- 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. <https://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.2473.1652> [Persian]
- Shabani, E., Zakerinia, M., & Hesam, M. (2019). Evaluating the Efficacy of Aquacrop Model Performance in Simulating Soybean Yield (Williams Cultivar) in Golestan Province Under Salt Stress Caused by Caspian Sea Water and Different Levels of Irrigation. *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(2), 49-62. <https://dx.doi.org/10.22055/jise.2017.18343.1332>[Persian]
- Shirazi, S.Z., Mei, X., Liu, B. & Liu, Y. (2021). Assessment of the AquaCrop Model under different irrigation scenarios in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 257, 107120. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107120>
- Singh, A., Saha, S., & Mondal, S. (2013). Modeling irrigated wheat production using the FAO Aquacrop model in west Bengal, India. Published online in Wiley Online Library. *Journal of Irrigation and Drainage*, 62, 50-56. <https://doi.org/10.1002/ird.1722>
- Singh, A.K., Tripathy, R., & Chopra, U.K. (2008). Evaluation of CERES Wheat and crop system models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management*, 95, 776-786. <https://ideas.repec.org/a/eee/agiwat/v95y2008i7p776-786.html>
- Tavakoli, A.R., Mahdavi Moghadam, M., & Sepaskhah, R. (2015). Evaluation of the Aquacrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. *Agricultural water management*, 161, 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.020>
- Van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., Van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L., & Goudriaan, J. (2003). On applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 201-234. [http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00106-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00106-5)
- Vanuytrecht, E., & Raes, D. (2011). Assessment of the 'CO2 fertilization effect' on crops with the Aquacrop model. *Geophysical Research Abstracts*, 13, EGU2011-5917-2. <https://meetingorganizer.copernicus.org>

- Wellens, J., Raes, D., Fereres, E., Diels, J., Copppe, C., Adiele, J.G., Ezui, K.S.G., Becerra, L.A., Selvaraj, M.G., Dercon, G., & Heng, L.K. (2022). Calibration and validation of the FAO AquaCrop water productivity model for cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Agricultural Water Management*, 263(C), 107491. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107491>
- Wolka, K., Biazin, B., Martinsen, V., & Mulder, J. (2021). Soil and water conservation management on hill slopes in southwest Ethiopia. II. Modeling effects of soil bunds on surface runoff and maize yield using AquaCrop. *Journal of Environmental Management*, 296, 113-187. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113187>
- Wu, D. (2008). Impact of spatial-temporal variations of climatic variables on summer maize yield in North China Plain. *European Journal of Agronomy*, 24(3), 226-235. <https://dx.doi.org/10.22069/ijpp.2012.601>
- Wu, H., Yue, Q., Guo, P., Xu, X., & Huang, X. (2022). Improving the AquaCrop model to achieve direct simulation of evapotranspiration under nitrogen stress and joint simulation-optimization of irrigation and fertilizer schedules. *Agricultural Water Management*, 266, 107599. <https://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.030>



Estimation and study of intrusion of exploitation wells to identify vulnerable areas of the aquifer (Case study: Ravansar-Sanjabi aquifer of Kermanshah)

Milad Farmanifard¹ , Mehdi Najafi Biameh² , Farzaneh Mohamadi³ , Fathollah Mohsenipoor⁴ 

¹ Corresponding Author, Ph. D graduated of Irrigation and Drainage, Expert of Kermanshah Regional Water Company, Office of Basic Studies of Water Resources, Kermanshah, Iran. E-mail: milad.farmanifard@gmail.com

² M. Sc graduated of Mining Engineering, Expert of Kermanshah Regional Water Company, Deputy of Protection and Operation, Kermanshah, Iran. E-mail: m_bistoon@yahoo.com

³ M. Sc graduated of Electronic, Expert of General Technical and Professional Office of Kermanshah Province, Kermanshah, Iran. E-mail: fm.mohamadi22@gmail.com

⁴ B. Sc graduated of Groundwater development, Expert of Kermanshah Regional Water Company, Office of Basic Studies of Water Resources, Kermanshah, Iran. E-mail: farmani.office1400@gmail.com

ABSTRACT

Introduction

In Iran climatic conditions due to the large groundwater abstraction volume by wells and also increase the number of drilled wells especially in recent years it makes the calculation of water resources privacy very important in order to apply proper management on the conservation and optimal use of groundwater resources. In this regard, one of the issues that concerns those involved in groundwater protection is the density and proximity of exploitation wells and overdraft by exploiters. Observing the privacy of water resources is not only to prevent the water level of adjacent sources from decreasing but also means the allowable withdrawal to the extent of the aquifer potential. Calculating the wells privacy and aqueducts and observing it is essential in the optimal management of groundwater resources. In most cases, incorrect estimation of the well privacy and aqueducts or non-compliance with the relevant rules will cause many problems and can lead to disputes between farmers and farmers as well as damage to groundwater resources.

Material and methods

In this study, first, the hydrodynamic coefficients of the studied aquifer were determined. In the next step, the quantitative privacy of all wells in the aquifer area was determined. Then, the impact radius of each well was calculated using a mathematical model in two modes of corrective discharge (based on the area under cultivation) and file discharge (discharge recorded in the exploitation license). Finally, a map of the impact radius of the wells in the GIS environment was drawn and based on it, the areas with privacy interference were identified. Due to the interference of wells with each other, various solutions were proposed to improve the current situation to be used by decision makers.

Results and discussion

Based on the obtained results, the average discharge of all exploitation wells in the corrective and case discharge mode was calculated to be 18.37 lit.s⁻¹ and 11.14 lit.s⁻¹ (116.6 Km²), respectively. The results also showed that in the most optimistic case about 20% of the total aquifer area has privacy interference. This causes the local wells to undergo simultaneous operation, severe localized cones and the aquifer to be subjected to unusual stresses, which in the long perform causes a permanent and lasting decline in the aquifer and in the long perform results to subsidence of the earth's surface.

Conclusions

The results of the present study indicate that the fact unfortunately in most plains of the country that have agricultural uses there is a privacy interference between exploitation wells and as a result of high density of wells and proximity to each other radius of impact of two or even several wells together overlap. In addition, more harvesting of aquifer potential and capacity from wells increases the aquifer vulnerability and the likelihood of future problems. It should also be noted that the Ravansar-Sanjabi aquifer is one of the aquifers that has more unfavorable conditions than other aquifers in the province and in recent years due to stresses caused by droughts and unauthorized withdrawals has a sharp drop in water level. Therefore, the need for more comprehensive studies in other plains and aquifers of more sensitive and more water stress areas can provide more complete results. Because it should be noted that due to the current climate and drought, groundwater resources can not be properly renewed and recharged, and according to experiences in other parts of the country, the current trend continues to cause a sharp drop in aquifer levels and consequently subsidence and Will sink.

Keywords: Groundwater resources, overdraft, privacy interference, Agricultural exploitation well, impact radius, Ravansar-Sanjabi aquifer, ArcGIS software, subsidence

Article Type: Research Article

Article history: Received: 06 March 2022 Revised: 13 April 2022 Accepted: 27 April 2022 ePublished: 29 May 2022

Cite this article: Farmanifard, M., Najafi Biameh, M., Mohamadi, F., & Mohsenipoor, F. (2022). Estimation and study of intrusion of exploitation wells to identify vulnerable areas of the aquifer (Case study: Ravansar-Sanjabi aquifer of Kermanshah), *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(1), 85-102. DOI: 10.22126/ATWE.2022.7582.1016





بر آورد و بررسی تداخل حریمی چاه های بهره برداری جهت شناسایی مناطق آسیب پذیر آبخوان (مطالعه موردی: آبخوان سنجابی کرمانشاه)

میلاذ فرمانی فرد^۱✉، مهدی نجفی بیامه^۲، فرزانه محمدی^۳، فتح ... محسنی پور^۴

^۱ نویسنده مسئول، دانش آموخته دکتری آبیاری و زهکشی، کارشناس شرکت آب منطقه ای کرمانشاه، دفتر مطالعات پایه منابع آب، کرمانشاه، ایران. رایانامه: milad.farmanifard@gmail.com
^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی معدن، کارشناس شرکت آب منطقه ای کرمانشاه، معاونت حفاظت و بهره برداری، کرمانشاه، ایران. رایانامه: m_bistoon@yahoo.com
^۳ دانش آموخته کارشناسی ارشد الکترونیک، کارشناس اداره کل فنی و حرفه ای استان کرمانشاه، کرمانشاه، ایران. رایانامه: fm.mohamadi22@gmail.com
^۴ دانش آموخته کارشناسی عمران آب زیرزمینی، کارشناس شرکت آب منطقه ای کرمانشاه، دفتر مطالعات پایه منابع آب، کرمانشاه، ایران. رایانامه: farmani.office1400@gmail.com

چکیده

در شرایط اقلیمی کشور، با توجه به حجم عظیم برداشت از منابع آب زیرزمینی توسط چاه ها و نیز با در نظر گرفتن تعداد چاه هایی که خصوصاً در سنوات اخیر حفر گردیده، محاسبه حریم به منظور اعمال مدیریت صحیح بر حفظ و بهره برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این راستا یکی از مسائلی که دست اندرکاران حفاظت از آب های زیرزمینی را به خود مشغول کرده، تراکم و نزدیکی چاه های بهره برداری از یک سو و اضافه برداشت توسط بهره برداران از سوی دیگر است. از این رو، در این تحقیق، در ابتدا تابع چاه حل ریاضی گردیده و شعاع تأثیر هر یک از چاه ها در دو حالت اعمال دبی اصلاحی (بر اساس سطح زیر کشت) و دبی پرونده ای (دبی پروانه بهره برداری) به دست آمد. سپس نقشه شعاع تأثیر کل چاه های محدوده ترسیم و سپس نواحی دارای تداخل حریمی مشخص و ترسیم گردید. بر اساس نتایج به دست آمده متوسط دبی آبکشی کل چاه های بهره برداری در حالت دبی اصلاحی و پرونده ای به ترتیب ۱۸/۳۷ و ۱۱/۱۴ لیتر بر ثانیه محاسبه گردید که نتیجه این تفاوت دبی آبکشی در اختلاف کل مساحت تداخل حریمی به میزان ۳۰ درصد (۱۱۶/۶ کیلومتر مربع) به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد در خوشبینانه ترین حالت، قریب ۲۰ درصد از کل مساحت آبخوان دارای تداخل حریمی است. این مسئله باعث می شود که هنگام بهره برداری همزمان از چاه های همجوار، مخروط های شدید افت موضعی ایجاد شده و آبخوان تحت استرس های غیرمعمول قرار گیرد که این امر در طولانی مدت موجب ایجاد افت دائمی و ماندگار در آبخوان و در بلند مدت منتج به فرونشست سطح زمین گردد.

واژه های کلیدی: منابع آب زیرزمینی، اضافه برداشت، تداخل حریم، چاه بهره برداری کشاورزی، شعاع تأثیر، آبخوان سنجابی، ArcGIS، فرونشست

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۵ اسفند ۱۴۰۰ اصلاح: ۲۴ فروردین ۱۴۰۱ پذیرش: ۰۷ اردیبهشت ۱۴۰۱ چاپ الکترونیکی: ۰۸ خرداد ۱۴۰۱

استناد: فرمانی فرد، م.، نجفی بیامه، م.، محمدی، ف.، و محسنی پور، ف. (۱۴۰۱). بر آورد و بررسی تداخل حریمی چاه های بهره برداری جهت شناسایی مناطق آسیب پذیر آبخوان (مطالعه موردی: آبخوان سنجابی کرمانشاه)، فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، (۱)، ۱۰۲-۸۵، شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2022.7582.1016



مقدمه

نیاز روز افزون جوامع به آب، به‌ویژه به منابع آب زیرزمینی در کشورهای مختلف با توجه به تغییرات اقلیمی در سطح جهانی، به عنوان چالشی جدی روز به‌روز با اهمیت‌تر شده‌است و ضرورت و اهمیت این موضوع در سال‌های آینده فزونی خواهد یافت (سروری و چیت‌سازان، ۱۳۸۷). براساس آخرین آماربرداری (سال آبی ۸۹-۹۰)، حجم تخلیه سالانه منابع آب زیرزمینی معادل ۷۰/۵ میلیارد مترمکعب است. بدیهی است این موضوع و روند افزایش حفر چاه موجب افزایش نگرانی در خصوص تأمین نیازهای آبی آینده کرده است. از طرفی بهره‌برداران منابع آب زیرزمینی به‌ویژه صاحبان چاه‌های آب با توجه به خشکسالی‌های اخیر و روند روبه‌افزایش صدور پروانه‌های جابجایی و کف شکنی چاه‌ها، همواره نگرانند که مبادا حریم منابع آب متعلق به آن‌ها در اثر حفر چاه‌های جدید توسط متقاضیان مورد حمله قرار گرفته و رعایت نشود. هر چند که رعایت حریم منابع آب اعم از چاه، چشمه و قنات از همان ابتدای بهره‌برداری مطرح بوده اما این نگرانی نیز وجود دارد که حریم این منابع به دلیل بهره‌برداری بیش از حد مجاز رعایت نشده تا جاییکه اثرات سوء بهره‌برداری از این منابع بر روی یکدیگر، قابل جبران نباشد. لذا یکی از مسائلی که مسئولین حفاظت از آب‌های زیرزمینی را به خود مشغول کرده‌است نزدیکی چاه‌های بهره‌برداری به یکدیگر است. هنگام بهره‌برداری همزمان چاه‌های همجوار، در اثر تداخل مخروط افت آن‌ها با یکدیگر مقدار افت افزایش یافته و در طولانی مدت افت دائمی و ماندگار در آبخوان ایجاد گردد (سروری و چیت‌سازان، ۲۰۰۸).

در طراحی و توسعه تأمین آب از مجموعه چاه‌ها باید چندین عامل قابل کنترل و غیرقابل کنترل در نظر گرفته شوند. مهمترین عوامل غیرقابل کنترل شامل: قابلیت انتقال آبخوان، ضریب ذخیره آبخوان، مرزهای آبخوان و عمق آبخوان هستند. عوامل قابل کنترل اغلب شامل وسعت زمین اختصاص داده‌شده به مجموعه چاه‌ها، مکان چاه‌ها و دبی پمپاژ است (راسل؛ ۲۰۰۶). باید دقت داشت که کاهش سطح آب زیرزمینی بیش‌ترین تأثیر را بر روی آب‌دهی چاه دارد. با افزایش عمق سطح آب زیرزمینی، چاه باید آب را از مسافت دورتری از سفره برداشت کند که این امر سبب افزایش هزینه و کاهش آب‌دهی می‌شود (گالوی؛ ۱۹۹۹). از این‌رو حفاظت از منابع آب با در نظر گرفتن رعایت حقوق بهره‌برداران از طریق تعیین حریم این منابع، از جمله مسایل مهم و اساسی در سیاست‌های آبی در سطح بین‌المللی است و این موضوع در کشور ما که در منطقه خشک و نیمه‌خشک واقع شده، از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. اصولاً در سطح بین‌المللی حریم از دو دیدگاه کمی و کیفی همواره مطرح بوده که در این پژوهش صرفاً بعد کمی آن مدنظر است.

تعیین حریم کمی منابع آب زیرزمینی در کشور ما و حتی در سطح بین‌المللی با دو هدف عمده انجام می‌شود. یکی حفاظت کمی از منابع آب زیرزمینی با توجه به تغییرات اقلیمی در سطح جهانی و دوم جهت جلوگیری از تنش‌های اجتماعی و رعایت حقوق بهره‌برداران از منابع آب زیرزمینی. به منظور تعیین حریم کمی منابع آب زیرزمینی و نیل به اهداف مذکور، شناخت مولفه‌های متعددی از ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌ها، لازم و ضروری است و بدون شناخت و تعیین این مؤلفه‌ها نمی‌توان به اهداف مذکور رسید.

بررسی مجموعه چاه‌ها در ویرجینیای آمریکا، به خاطر برداشت زیاد آب از مجموعه چاه‌ها مخروط افت بزرگی ایجاد شده‌است (فوکازی و اسپیران؛ ۱۹۹۳). در مجموعه چاه لایقترمن در کشور آمریکا، افت بالای سطح آب زیرزمینی در مجموعه چاه بر اثر پمپاژ زیاد باعث ایجاد مخروط افتی در حدود ۵۰۰ فوت شده‌است (نایمن؛ ۱۹۶۵). رشد چشمگیر تقاضا و مصرف آب سبب وارد آمدن خسارت‌های زیادی به آبخوان‌ها شده‌است. گزارشاتی در خصوص افزایش پدیده فرونشست در نتیجه پایین رفتن سطح آب ارائه شده‌است (نشال جنوگرافیک، ۲۰۱۱). تاکنون مطالعه جامعی بر روی کاهش آب‌دهی چاه‌ها انجام نگرفته است.

فرونشست زمین عبارت است از فروریزش ناگهانی یا تدریجی سطح زمین به سمت پایین که با جابجایی‌های ناچیز افقی نیز همراه باشد. فرونشست منطقه‌ای زمین به دلیل افت سطح آب زیرزمینی عمدتاً در رسوبات تحکیم نیافته یا نیمه تحکیم یافته که در مجاورت لایه‌های شن و

¹ Russell

² Galloway

³ Focazi and Speiran

⁴ Nyman

ماسه قرار دارد صورت می‌گیرد. در چنین شرایطی یک تراکم غیر الاستیک به دلیل افزایش تنش مؤثر در خاک رخ داده و چیدمان دانه‌های خاک بهم خورده و چیدمان جدید باعث کاهش حجم و ضخامت عمودی لایه و در نهایت نشست می‌گردد.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

بیش‌ترین گزارشات از سراسر جهان در ارتباط با پدیده فرونشست زمین مربوط به نقاط خشک و کم‌باران بوده است. این پدیده در گذشته در بسیاری از نقاط دنیا مانند ایالت آریزونا و کالیفرنای آمریکا، شهرهای اوزاکا و توکیو در ژاپن، ونیز در ایتالیا، بانکوک در تایلند، جاکارتا در اندونزی، کلکته در هندوستان و مکزیکوسیتی در مکزیک گزارش شده‌است (ترن و فردلاندا، ۲۰۰۰). آن^۲ (۲۰۱۵) در پایان‌نامه خود از دانشگاه کالیفرنیا ارتباط بین فرونشست زمین و افت آب‌های زیرزمینی در دشت شمال چین را با استفاده از ICESat بررسی کرد. این منطقه که بزرگترین تولید کننده گندم در کشور چین است، به شدت به آب‌های زیرزمینی وابسته است. وی نشان داد که میزان افت آب‌های زیرزمینی در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴ به میزان ۲/۰۳ سانتی متر در سال است در حالیکه تغییرات ارتفاعی نشست زمین ۸-۵ سانتی متر در سال است و عنوان کرد که الگوهای فضایی افت آب‌های زیرزمینی و فرونشست آن طور که انتظار می‌رفت ندارند. اسمیت و همکاران^۳ (۲۰۱۷)، در تحقیق خود به عنوان برآورد از دست دادن دائمی ذخایر آب زیرزمینی در دره سن ژواکویین کالیفرنیا عنوان کردند اگر آب بیش از حد از آبخوان‌ها استخراج شود، مخصوصاً در نواحی که لایه‌های خاک رس دارند، متراکم شدن لایه‌های خاک به دلیل افت فشار آب باعث ایجاد حالت غیرقابل برگشت می‌شود و توانایی خاک برای حفظ و نفوذ آب از دست می‌رود، از این رو آبخوان ظرفیت دریافت آب خود را به رطوبت دائم از دست می‌دهد.

فرونشست زمین بر اثر افت سطح آب زیرزمینی در ایران برای اولین بار در سال ۱۳۴۶ در دشت رفسنجان گزارش گردید. در سال‌های اخیر، پدیده فرونشست زمین در دشت‌های زیادی از نقاط خشک و نیمه‌خشک ایران مرکزی و شرق ایران همراه با افت ممتد سطح آب زیرزمینی گزارش شده‌است و در حال حاضر آمار دشت‌های کشور که با این پدیده روبرو هستند به ۲۰۹ دشت می‌رسد.

در تحقیقی مسلمی عقیلی و همکاران (۱۳۹۵)، به بررسی آماری تأثیر چاه‌های آب بر یکدیگر در یک مجموعه چاه، مطالعه موردی منطقه گرمابدشت-سیاهتلو (گرگان) پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود، بر اساس تأثیرگذاری فاصله و دبی چاه‌ها بر کاهش آب‌دهی، از دو شاخص آماری، شاخص فاصله (DI) و شاخص دبی-فاصله (DQI) استفاده نمودند. همچنین اعتقاد داشتند عامل دیگری که در کاهش آب‌دهی در مجموعه چاه‌ها نقش به‌سزایی دارد، ساختمان چاه است. نتایج این تحقیق نشان داد که تغییرات آب‌دهی چاه با شاخص DQI بیش‌ترین همبستگی را نشان داد. هم چنین با به‌کارگیری این شاخص‌ها، یک روش کاربردی برای تعیین درصد تأثیر ساختمان چاه بر روی کاهش آب‌دهی چاه‌ها ارائه دادند. آن‌ها بیان داشتند که با استفاده از شاخص‌های تعریف شده می‌توان یک حریم مناسب برای ایجاد مخروط افت در اطراف چاه‌ها ایجاد نموده تا از تداخل مخروط افت‌ها جلوگیری نموده و تغییرات در میزان آب‌دهی چاه‌هایی که در آن برداشت صورت می‌گیرد به حداقل رساند. همچنین اخیراً زمانی مقدم و همکاران (۱۳۹۹)، در مطالعه خود با به‌کارگیری مدل‌های مختلف اقدام به تعیین حریم کیفی چاه‌های آب شرب با در نظر گرفتن پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان دشت رودان نمودند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که عمده چاه‌های شرب در محدوده با آسیب‌پذیری بالا با کاربری اراضی کشاورزی بوده که با توجه به تعیین حریم کیفی چاه شرب در سال‌های مختلف باید حریم کیفی بزرگتری (ده ساله) برای چاه‌های این مناطق در نظر گرفته شود؛ زیرا اعمال حریم کوچک، خطر آلودگی آب چاه را بالا می‌برد. همچنین برای مناطق با آسیب‌پذیری کم‌تر و کاربری‌های اراضی دیگر نیز می‌توان حریم حفاظتی کوچکتری اعمال کرد؛ زیرا اعمال حریم بزرگتر در این مناطق هزینه‌های اجتماعی و اقتصادی زیادی را به دنبال خواهد داشت. در پایان نیز سه ناحیه حفاظتی فوری (۳ ساله)، اجباری (۵ ساله) و حمایتی (۱۱ ساله) برای چاه‌های شرب منطقه تعریف و پیشنهاد نمودند. بهرامی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهش خود با استفاده از روابط تجربی و معادلات هیدرولیکی، مدل‌های محاسباتی کامپیوتری به بررسی و محاسبه حریم کمی ۴ حلقه چاه در شهرستان کوار، استان فارس پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که رابطه دویپویی به دلیل استفاده از تعداد بیش‌تری از پارامترهای هیدرودینامیکی نسبت به دو روش دیگر برتری دارد. همچنین عوامل مؤثر بر برآورد حریم کمی چاه را نیز

1 Trinh and Fredlund

2 An

3 Smith et al

مورد بررسی قرار دادند که نتایج حاکی از این بود که میزان آب‌دهی چاه، هدایت هیدرولیکی، مدت زمان پمپاژ و قابلیت انتقال رابطه مستقیمی با حریم چاه دارند؛ به طوری که با افزایش این عوامل حریم چاه نیز افزایش یافت. اما ضریب ذخیره بر خلاف عوامل قبل دارای رابطه معکوس با حریم چاه است و با افزایش مقدار ضریب ذخیره، حریم چاه کاهش یافت.

فونت و همکاران^۱ (۲۰۱۵)، در پژوهش خود به نقش افزایش برداشت آب زیرزمینی در اثر کشاورزی در دره سنترال کالیفرنیا، پرداختند. در این منطقه که یکی از قطب‌های کشاورزی آمریکا است کشاورزان برای آبیاری زمین‌های خود تا قبل از خشکسالی ۲۰۰۷ بیش‌تر از آب‌های سطحی استفاده می‌کرده اما بعد از آن پمپاژ بیش‌تری از آب‌های زیرزمینی به عمل آورده‌اند. به طوری که حدود ۷۰ درصد اراضی منطقه با آب زیرزمینی آبیاری می‌شد، این پمپاژ بیش از حد موجب افت سطح آب شده و در نتیجه بیلان سیستم آبخوان بهم خورده و موجب فرونشینی شده‌است. مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده شده در ارزیابی مدیریت سطح آب زیرزمینی در این منطقه نیمه‌خشک نشان داد که تداوم خشکسالی بعد از سال ۲۰۰۷ می‌توانست موجب فرونشینی در حد ۳-۱/۵ سانتی‌متر در قسمت جنوب منطقه شود.

بردار و همکاران، (۲۰۱۹) در تحقیقی به اصلاح ساختار GALDIT برای بررسی روند آلودگی آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل‌های آماری و آنتروپی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی پرداختند.

مانیوانان و الانگو^۲ (۲۰۱۹)، در تحقیقی به بررسی نفوذ آب دریا و تخلیه آب زیرزمینی از لایه‌های زیرین در امتداد سواحل هند اقدام نمودند که نتایج این تحقیق نشان داد که در مناطقی که تراز آب زیرزمینی کم‌تر از سطح متوسط تراز سطح آب دریا هستند، حدود ۷ درصد از کل منطقه ساحلی تحت تأثیر نفوذ آب دریا بود. همچنین حدود ۵۷ درصد از مناطق ساحلی هند دارای تراز سطح آب زیرزمینی در محدوده ۰ تا ۱۰ متر بود. آن‌ها پیشنهاد نمودند تحقیقات آینده نیاز به تمرکز بر مناطقی دارد که در آن نفوذ آب دریا و تخلیه آب زیرزمینی از لایه‌های زیرین بر اساس این مطالعه شناسایی شده‌است.

کینگ تی و همکاران^۳ (۲۰۲۱)، در مطالعه خود ساختار و گستره نفوذ آب شور آبخوان ساحلی رودخانه لوی در منطقه بین‌توان ویتنام (جایی که منابع آب به دلیل تولید کشاورزی، آبی‌پروری و صنعتی تحت فشار هستند) را با استفاده از روش توموگرافی مقاومتی الکتریکی و با تکنیک تصویربرداری بررسی نمودند. آن‌ها اعلام کردند که در فاصله بیش‌تر از دریا، توزیع پیچیده‌ای بین آب شیرین و شور مشاهده می‌شود و بر این بارو بودند که روش معرفی شده می‌تواند در غیاب یک شبکه نظارتی مترکم برای دیگر سفره‌های آب زیرزمینی ناهمگن نیز اعمال شود.

زقیبی و همکاران^۴ (۲۰۲۲)، اخیراً در پژوهشی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی تونس در برابر نفوذ آب دریا با بکارگیری قابلیت مدل GALDIT بررسی کردند که نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که بیش‌تر اراضی منطقه در رده به‌شدت آسیب‌پذیر (۴۴/۲ درصد) و پس از آن مناطق با آسیب‌پذیری بسیار بالا (۲۰/۳ درصد از راضی) و متوسط (۱۹/۳ درصد از اراضی) قرار گرفتند و تنها ۱۶/۲ درصد اراضی آسیب‌پذیری پایینی داشتند.

بر اساس موارد بحث شده، رعایت حریم منابع آب، تنها برای جلوگیری از کاهش و نقصان منابع آب مجاور نیست بلکه به معنی برداشت مجاز و در حد توان آبخوان، از منابع آب زیرزمینی نیز است. در مدیریت بهره‌برداری مطلوب از منابع آب زیرزمینی، محاسبه حریم چاه و قنات و رعایت آن اهمیت اساسی دارد. در اغلب موارد عدم محاسبه و برآورد صحیح حریم چاه‌ها و قنات و یا رعایت نکردن ضوابط مربوط به حریم، مسائل و مشکلات عدیده‌ای را به وجود آورده و موجب اختلاف و حتی نزاع بین صاحبان چاه‌ها و قنات ائتلاف سرمایه‌ها و وارد آمدن آسیب به منابع آب زیرزمینی گردد. لذا در این تحقیق با برآورد و محاسبه ضرایب هیدرودینامیک آبخوان منطقه مورد مطالعه به صورت محلی، حریم فنی کلیه چاه‌های موجود در محدوده مورد مطالعه تعیین گردید و پس از محاسبه و ترسیم شعاع تأثیر کلیه چاه‌های آبخوان، با توجه به تداخل حریمی چاه‌ها با یکدیگر، راهکارهای گوناگونی جهت بهبود وضعیت موجود ارائه می‌گردد تا مورد اجرا و استفاده متصدیان امر قرار گیرد.

¹ Faunt

² Manivanna and Elango

³ Cong-Thi

⁴ Zhibi

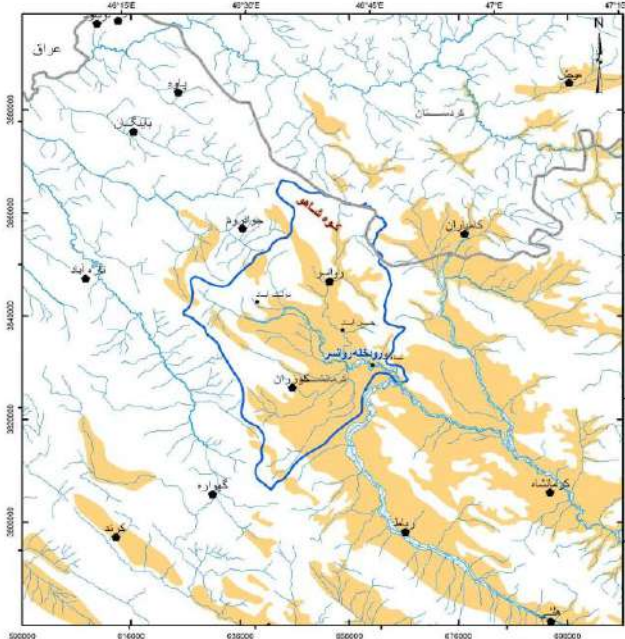
روش پژوهش

موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی روانسر-سنجایی با کد مطالعاتی ۲۲۲۴ بخشی از حوضه آبریز کرخه است که در استان کرمانشاه و بین طول‌های جغرافیایی ۴۶ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۴۹ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۴ دقیقه شمالی قرار دارد. بر اساس آخرین مرز محدوده‌های مطالعاتی اعلام شده توسط وزارت نیرو مساحت منطقه بالغ بر ۱۲۴۱ کیلومتر مربع است. ارتفاع متوسط محدوده مذکور از سطح دریا ۱۵۴۹ متر است. بلندترین نقطه ۲۷۷۶ متر و پست‌ترین نقطه آن نیز ۱۳۰۷ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. رودخانه‌های قره‌سو، زردآب و کوناب رودخانه‌های اصلی منطقه هستند. که در نهایت پس از دریافت رودخانه‌هایی چون مرگ و گاماسیاب، رودخانه سیمره را تشکیل داده و راهی رودخانه کرخه می‌گردند. شکل (۱) موقعیت محدوده مطالعاتی روانسر-سنجایی در استان کرمانشاه و وضعیت حوزه‌های آبریز اطراف این محدوده را نشان می‌دهد.

شرایط آب و هوایی منطقه

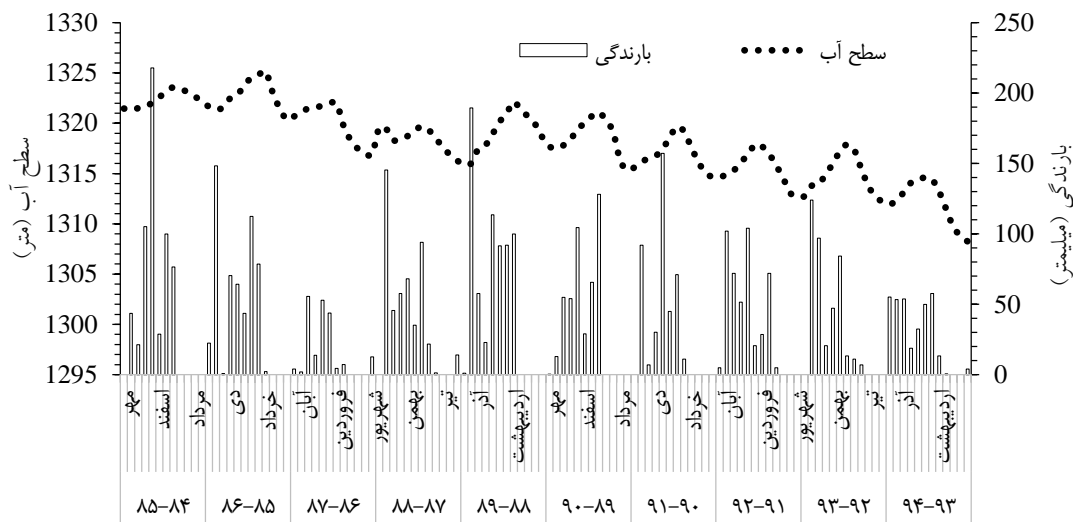
بر اساس مطالعات انجام شده، معدل حداکثر و حداقل دمای منطقه نیز ۳۶ و ۰ درجه سانتیگراد و در ماه‌های مرداد و بهمن ماه است. متوسط دمای سالیانه نیز ۱۵ درجه سانتیگراد است. از نظر توزیع ماهانه بارش نیز بیش‌ترین بارش در ماه‌های آبان، بهمن و فروردین به وقوع پیوسته است. کم‌ترین میزان بارش نیز متعلق به تیر و مرداد ماه و بدون بارش است.



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی روانسر-سنجایی

وضعیت منابع آب زیرزمینی منطقه

در محدوده مطالعاتی روانسر-سنجایی یک دشت اصلی به نام دشت سنجایی وجود دارد که شامل یک آبخوان با همین نام است. دشت سنجایی از شرق و جنوب شرقی به دشت ماهیدشت و دشت کرمانشاه و از شمال و غرب به آهک‌های سری بیستون محدود می‌شود. وسعت دشت ۴۵۷ کیلومترمربع و مساحت شبکه تبسن آبخوان آن که شامل ۲۴ حلقه چاه مشاهده‌ای می‌شود بالغ بر ۳۹۰ کیلومتر مربع است. هیدروگراف واحد و توزیع زمانی بارش بلند مدت (۱۰ ساله) آبخوان سنجایی در شکل (۲) ارائه شده‌است.



شکل ۲. هیدروگراف بلند مدت دشت روانسر-سنجایی

ضخامت آبرفت در این آبخوان بین ۵۰ تا ۲۰۰ متر برآورد می‌گردد که بخش‌هایی از این آبخوان، سفره‌های این آبخوان در برخی نقاط در حالت نیمه تحت فشار است. همچنین عمق متوسط سطح آب زیرزمینی در این آبخوان حدود ۱۱ متر و ضخامت متوسط آبرفت حدود ۱۱۰ متر برآورد می‌گردد.

مطابق آماربرداری سراسری سری دوم، در محدوده مطالعاتی روانسر در مجموع ۱۴۰۴ منبع آب زیرزمینی برداشت شده‌است. این تعداد شامل ۱۱۹۱ حلقه چاه و ۲۱۳ دهنه چشمه است. تعداد کل چاه‌های ثبت شده تحت بهره‌برداری در داخل محدوده ۹۳۹ حلقه است که ۷۸۷ حلقه از این چاه‌ها فعال هستند. همچنین از این تعداد، ۳۶۰ حلقه به دلیل عدم همخوانی بین دبی برداشت و سطح زیر کشت (اضافه برداشت توسط بهره‌بردار) نیاز به اصلاح دبی داشت که مطابق با هیدرومدول کشت غالب منطقه، بر اساس سطح زیر کشت و ملاحظات فنی، دبی واقعی پمپاژ برآورد گردید. بر اساس اطلاعات موجود، سطح زیر کشت آبی در این محدوده حدود ۱۲۳۵۰ هکتار است که کشت غالب در سطح محدوده مورد مطالعه گندم، جو و ذرت است.

عوامل موثر در تعیین حریم منابع آب

مهمترین پارامترهای مؤثر در تعیین حریم کمی منابع آب زیرزمینی عبارتند از: قابلیت انتقال، ضریب ذخیره، تخلخل مفید، میزان آبکشی، زمان پمپاژ و ضخامت آبخوان و ... اشاره نمود که روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی برای برآورد آن پیشنهاد گردیده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده و تجارب کارشناسی موجود، برآورد شعاع تأثیر چاه با استفاده از معادله تاپس انجام شده‌است که در ادامه عوامل دخیل در تعیین حریم چاه با این روش مورد اشاره قرار می‌گیرد.

قابلیت انتقال آبخوان

قابلیت انتقال آبخوان که از حاصل ضرب هدایت هیدرولیکی در ضخامت آبخوان به دست می‌آید و رابطه مستقیم با حریم کمی چاه دارد. بنابراین هر چه میزان این پارامتر بیشتر باشد، رشد عمودی مخروط افت کمتر و برعکس گسترش مخروط افت در جهت افقی بیشتر و به تبع آن حریم چاه بیشتر می‌شود. بر اساس آزمایش‌های پمپاژ و سونداژهای ژئوالکتریک انجام گرفته در منطقه وضعیت قابلیت انتقال آبخوان و ضخامت آبرفت مطابق جدول (۱) است.

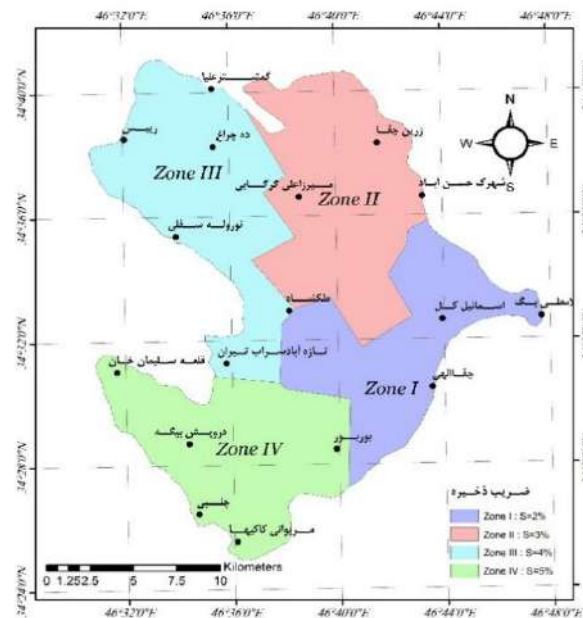
¹ This equation

جدول ۱. پارامترهای آبخوان سنجایی

پارامتر آبخوان	حداقل	حداکثر	متوسط
قابلیت انتقال (m^2/day)	۹۱	۱۲۲۰	۴۱۷
ضخامت (m)	۳۸	۱۳۱	۹۷

ضریب ذخیره آبخوان

بر خلاف ضریب قابلیت انتقال آبخوان، ضریب ذخیره با میزان حریم چاه رابطه معکوس دارد. بدین معنا که در آبخوان‌های با ضریب ذخیره زیاد که ناشی از تخلخل مفید بالای آبخوان است، گسترش مخروط در دو جهت افقی و هم قائم، محدود می‌شود و بنابراین شعاع مخروط افت که همان حریم چاه است، کم می‌شود. این مؤلفه در آبخوان‌های آزاد معادل آب‌دهی ویژه آبخوان است اما در آبخوان‌های تحت فشار قابلیت فشردگی کم مواد تشکیل دهنده آبخوان، این مؤلفه ناچیز است.



شکل ۳. زون‌بندی مقدار پارامتر ضریب ذخیره در محدوده

با توجه به اینکه پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان بر اساس مشخصات فیزیکی آن، به‌طور همزمان تغییر می‌کند باید تغییرات ضرایب قابلیت انتقال و ذخیره را همزمان مورد بررسی قرار داد. نظر به اینکه تنها چند مورد برآورد ضریب ذخیره در منطقه وجود داشت به جای استفاده از پهنه‌بندی، منطقه مورد مطالعه بر اساس پارامترهایی نظیر لوگ و آب‌دهی چاه‌ها زون‌بندی گردید که زون‌بندی در نظر گرفته شده شامل ۴ بخش و مطابق شکل (۳) است.

آب‌دهی چاه

میزان آب پمپاژی از چاه همواره یکی از مولفه‌های مهم و تاثیرگذار است که به‌صورت مستقیم در میزان شعاع تأثیر چاه مؤثر است. با افزایش دبی چاه، گسترش مخروط افت بیش‌تر شده و همین موضوع سبب افزایش شعاع تأثیر و یا حریم چاه می‌گردد. بنابراین شعاع تأثیر و یا حریم هر چاه برای آب‌دهی‌های متفاوت، متغیر است.

مدت زمان پمپاژ

در برخی از چاه‌ها زمان لازم برای ایجاد مخروط افت ثابت یا به عبارتی زمان لازم برای رسیدن سطح آب زیرزمینی به حالت ثابت (افت سطح آب زیرزمینی در چاه وجود نداشته باشد) طولانی است که با گذشت زمان دامنه مخروط افت نیز بیش‌تر و نهایتاً شعاع تاثیر و یا حریم چاه بیش‌تر می‌شود. بنابراین می‌توان گفت هر چه مدت زمان پمپاژ چاه بیش‌تر باشد، حریم چاه بیش‌تر خواهد شد. بر اساس اطلاعات اخذ شده از دفتر مطالعات شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه، در منطقه مورد مطالعه متوسط کل ساعات پمپاژ سالانه برابر با ۲۱۷۰ ساعت برآورد گردید. همچنین حداکثر میزان افت سطح آب در نظر گرفته شده در آزمایش‌های پمپاژ (D) برابر ۲۰ سانتی‌متر بوده است.

محاسبه حریم چاه

همانگونه که پیش‌تر اشاره گردید؛ معادله تائیس جهت محاسبه شعاع تاثیر چاه انتخاب گردید که فرم کلی معادله و روش حل آن به‌صورت زیر است:

$$\nabla^2 h - \frac{S}{T} \times \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

پس از حل، معادله (۱) به‌صورت زیر در می‌آید:

$$h - h_0 = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u) \quad (2)$$

W(u) تابع چاه معروف است که بدون بعد بوده و از رابطه (۳) به‌دست می‌آید:

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (3)$$

حال در صورتی که افت سطح آب زیرزمینی (h-h₀) را با D نمایش دهیم معادله (۲) به فرم زیر به‌دست می‌آید:

$$W(u) = \frac{4\pi TD}{Q} \quad (4)$$

در نتیجه مقدار R (شعاع تاثیر چاه) از معادله (۵) مطابق زیر استخراج می‌گردد:

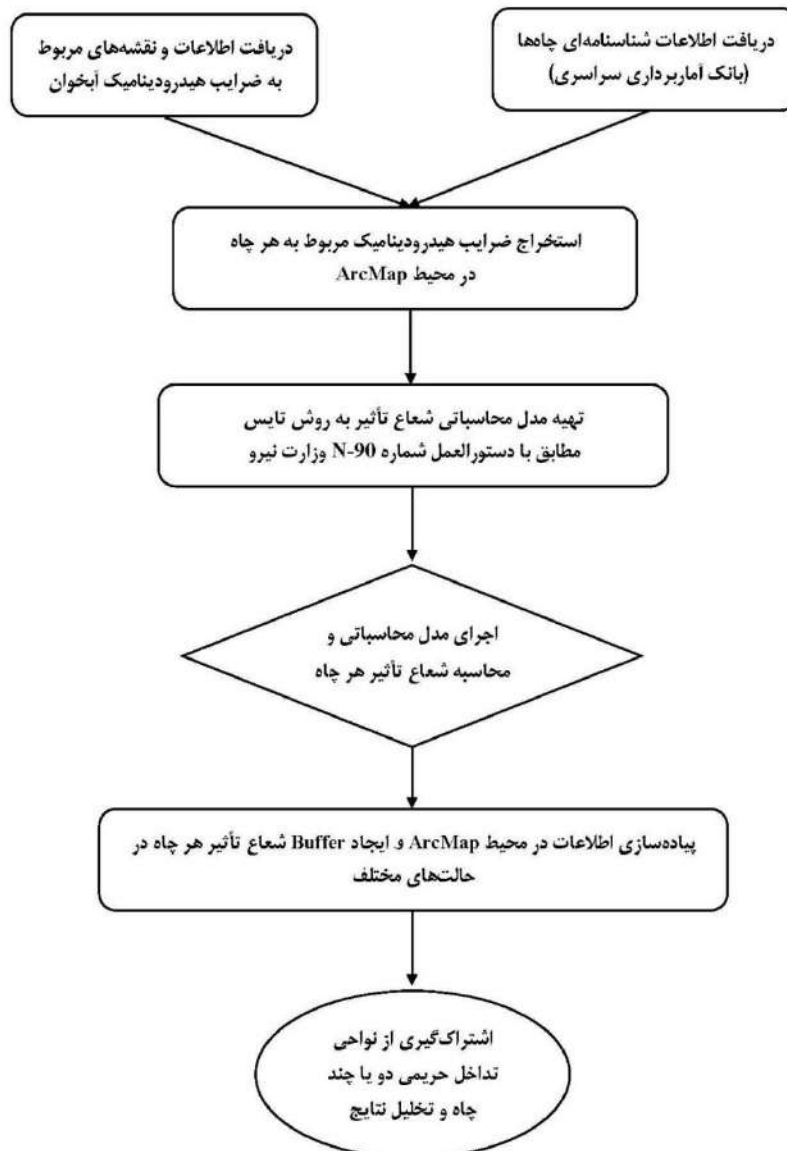
$$R = \left(\frac{4uTt}{S} \right)^{1/2} \quad (5)$$

که در روابط بالا: h ارتفاع سطح آب زیرزمینی در هر لحظه پس از شروع بهره‌برداری (متر)، h₀: ارتفاع سطح آب زیرزمینی قبل از شروع بهره‌برداری (متر)، Q: دبی چاه (متر مکعب در روز)، S: ضریب ذخیره سفره آب زیرزمینی، T: ضریب قابلیت سفره (متر مربع در روز)، R: شعاع تاثیر چاه (متر)، t: زمان بهره‌برداری از چاه (متر) و $\sqrt{2}$: عامل لاپلاسیان است.

به‌طوریکه از معادلات (۴) و (۵) ملاحظه می‌شود، برای محاسبه شعاع تاثیر چاه (R) به ازای مقادیر T، D، S، t و Q معین، لازم است ابتدا مقدار W(u) را از معادله (۴) حساب کرده و سپس از با استفاده از جدول یا برآورد عددی، مقدار W(u) حسب u را پیدا نموده سپس از معادله (۵) مقدار R را محاسبه نماییم.

نیاز آبی و هیدرومدول منطقه

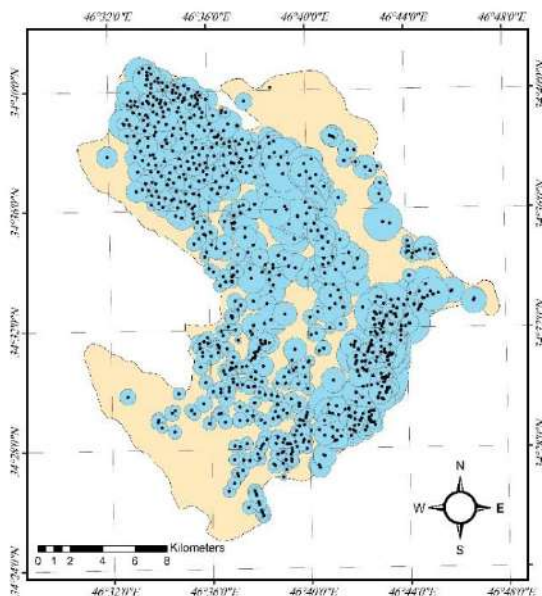
براساس مطالعات انجام شده، متوسط هیدرومدول کشت غالب آبی دشت روانسر-سنجابی ۱/۲۰ لیتر در ثانیه برای یک هکتار است. بدیهی است که در هر ماه نیاز آبی محصول زراعی متفاوت است اما برای مدول آبیاری مقداری ثابت در نظر گرفته شده‌است بنابراین با تغییر در مدت زمان بهره‌برداری از منابع آب، امکان رفع نیاز آبی گیاه در ماه‌های پر مصرف میسر می‌گردد. بر اساس جداول تخصیص منابع آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه، بیشینه نیاز آبی برابر با ۱۹۰۸ مترمکعب برای یک هکتار در اردیبهشت ماه است. در ادامه فلوچارت انجام مراحل مختلف این تحقیق در قالب شکل (۴) ارائه گردیده است.



شکل ۴. فلوچارت مراحل مختلف انجام تحقیق

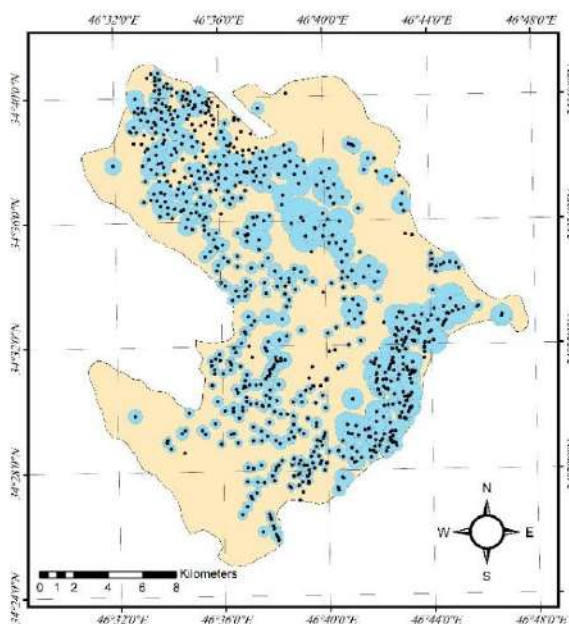
یافته‌ها

پس انجام محاسبات، میزان شعاع تأثیر هر چاه برآورد گردید. بسته به شرایط پمپاژ و وضعیت هیدرودینامیکی آبخوان، شعاع تأثیر چاه‌ها بسیار متغیر بود. شکل (۵)، نقشه پراکنش چاه‌ها و شعاع تأثیر محاسبه شده بر اساس دبی اصلاحی (دبی محاسبه شده مطابق سطح زیر کشت) برای هر چاه را نشان می‌دهد. جهت مقایسه بهتر و تصمیم‌گیری جامع‌تر، اقدام به محاسبه شعاع تأثیر چاه‌ها با در نظر گرفتن دبی پرونده‌ای (تخصیصی در پروانه بهره‌برداری) شد که در شکل (۶) نشان داده شده‌است.



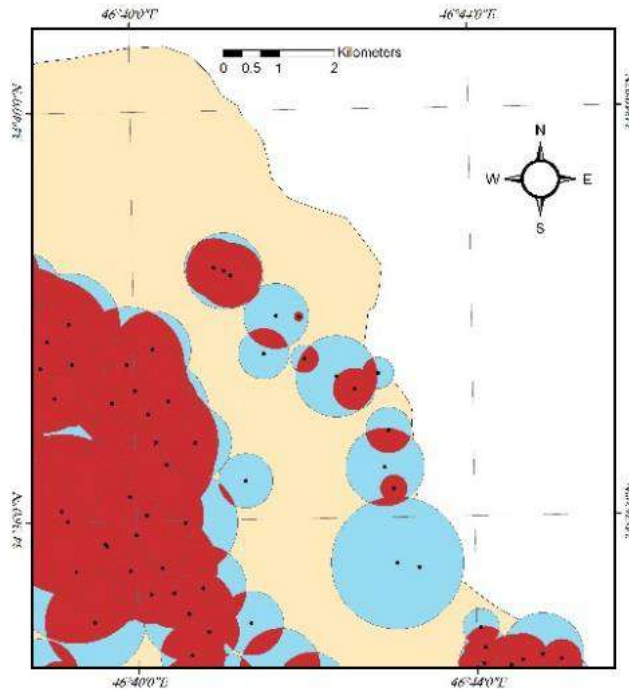
شکل ۵. وضعیت کلی شعاع تأثیر چاه‌های منطقه (دبی اصلاحی)

مقایسه شکل (۵) و (۶) نشان می‌دهد که، سطح تحت پوشش شعاع تأثیر چاه‌های بهره‌برداری در حالت اعمال دبی پرونده‌ای بسیار کم‌تر از شرایط اعمال دبی اصلاحی است. به‌طوریکه؛ متوسط شعاع تأثیر برآورد شده در حالت دبی اصلاحی و دبی پرونده‌ای به ترتیب برابر با ۵۷۵ و ۳۰۰ متر بود که نشان می‌دهد به‌طور متوسط ۲۷۵ متر اختلاف میان دو حالت وجود دارد. بر اساس محاسبات انجام شده، کل مساحت تحت پوشش شعاع تأثیر چاه‌های بهره‌برداری به ترتیب در حالت دبی اصلاحی و دبی پرونده‌ای مجموعاً $۶۹/۵$ و $۴۳/۱$ درصد مساحت کل آبخوان است.



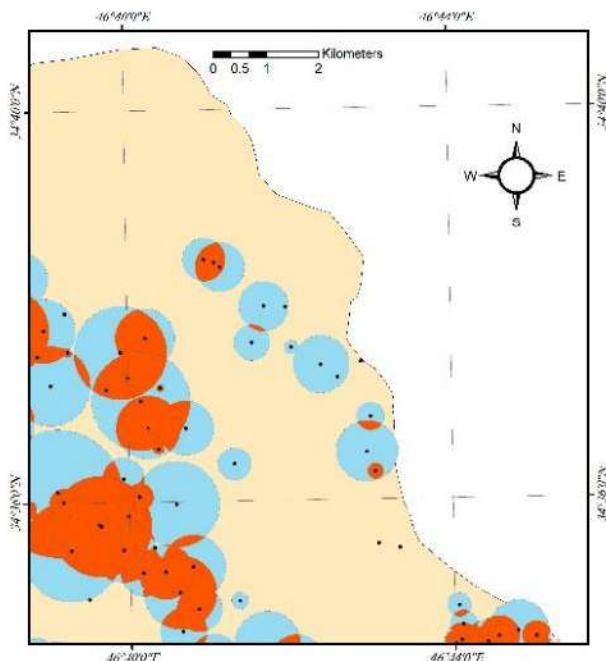
شکل ۶. وضعیت کلی شعاع تأثیر چاه‌های منطقه (دبی پرونده‌ای)

نمای شعاع تأثیر و مناطق تداخل حریمی چاه‌های بخش شمال شرقی منطقه در حالت دبی اصلاحی و پرونده‌ای به ترتیب در شکل (۷) و (۸) ارائه شده‌است.



شکل ۷. نمای نزدیک تداخل حریمی قسمتی از آبخوان (دبی اصلاحی)

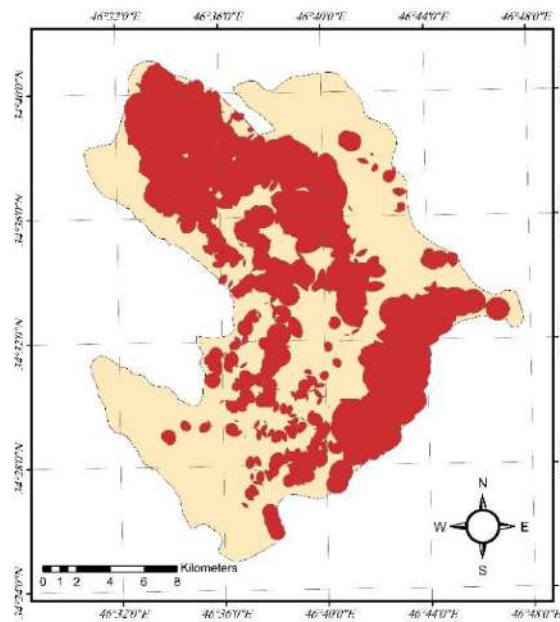
در حالت دبی اصلاحی به روشنی مشخص است که در اثر همجواری و تراکم بیش از حد چاه‌ها در اکثر نقاط دشت، تداخل حریمی وسیعی ناشی از تداخل چندین حلقه چاه دیده می‌شود اما این همجواری و تراکم تداخل حریمی در حالت دبی پرونده‌ای (شکل ۸) بسیار کم‌تر و نامحسوس‌تر است.



شکل ۸. نمای نزدیک تداخل حریمی قسمتی از آبخوان (دبی پرونده ای)

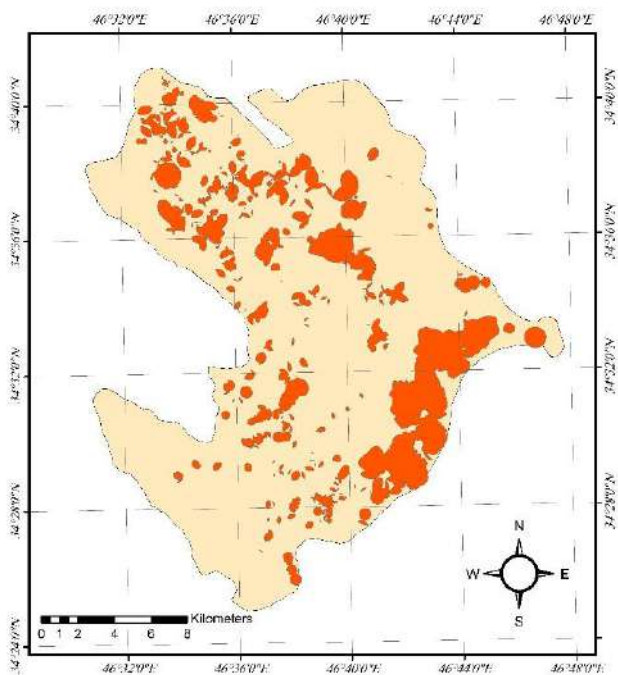
پس از انجام محاسبات مختلف، نقشه حاصل از تداخل حریم کلیه چاه‌های بهره‌برداری در حالت دبی اصلاحی در شکل (۹) ترسیم شده‌است. در نگاه اول، سطح گسترده مناطقی از آبخوان که دارای تداخل حریم در دو و بیش از دو حلقه از چاه‌های منطقه اتفاق افتاده است، به وضوح مشخص است. نتایج محاسبات در محیط GIS نشان داد که قریب ۵۰٪ از کل مساحت آبخوان در شرایط تداخل حریمی چاه‌های بهره‌برداری است. به بیان دیگر، از کل مساحت ۳۹۰ کیلومتر مربعی آبخوان سنجایی، بیش از ۱۹۲ کیلومتر مربع آن تحت استرس ناشی از تداخل مخروط افت حداقل دو حلقه چاه است و نگرانی‌های بسیاری را سبب می‌گردد.

همانگونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، بیش‌ترین تراکم تداخل حریمی در بخش شمال‌غرب دشت قرار گرفته است. در این راستا در جهت کنترل و مقایسه نتایج، نقشه هم‌تراز سطح آب کل دشت ترسیم گردید. در نقشه هم‌تراز آب زیرزمینی جهت جریان بر خلاف جهت عمومی جریان و توپوگرافی دشت، از سمت جنوب‌شرقی به سمت شمال‌غرب است. براساس بررسی و تحلیل نتایج، ضعیف بودن تغذیه آبخوان در این منطقه و تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری مهمترین عوامل در معکوس شدن جریان در این منطقه است.



شکل ۹. سطح تداخل شعاع تأثیر چاه‌های بهره‌برداری (دبی اصلاحی)

مطابق محاسبات و عملیات صورت گرفته در حالت قبل، برای حالت اعمال دبی پرونده‌ای نیز مناطق دارای تداخل حریمی چاه‌های بهره‌برداری مشخص و در شکل (۱۰) به تصویر کشیده شده‌است.



شکل ۱۰. سطح تداخل شعاع تأثیر چاه‌های بهره‌برداری (دبی پرونده‌ای)

قسمت‌های نارنجی رنگ، مناطقی از آبخوان هستند که در اثر نزدیکی و دبی پمپاژ بعضاً بیش از ظرفیت آبخوان، دارای تداخل حریمی بوده و تحت استرس قرار دارند. در قیاس با حال قبل (تداخل حریمی در شرایط اعمال دبی اصلاحی) که در شکل (۹) ارائه و مورد بحث قرار گرفت، در حالت اخیر، به مراتب مساحت کم‌تری از دشت تحت استرس تداخل شعاع تأثیر چاه‌های مجاور است و مناطق با تراکم بسیار کم‌تری در آبخوان شامل این وضعیت شده‌است. به‌طوریکه سطح تداخل شعاع تأثیر چاه‌های بهره‌برداري در حالت اعمال دبی پرونده‌ای برابر با ۷۵/۵۳ کیلومتر مربع به‌دست آمد که این سطح کم‌تر از ۲۰ درصد مساحت کل آبخوان است.

جدول (۲)، نتایج محاسبات در دو حالت آبکشی مختلف را به‌طور خلاصه ارائه می‌دهد. همانطور که از این نتایج مشخص است، اختلاف فاحش و نامعقولی بین دو حالت مختلف آبکشی وجود دارد. به‌طوریکه، اختلاف کل مساحت تحت پوشش مناطق شعاع تأثیر چاه‌ها در آبخوان در دو حالت مورد اشاره قریب ۱۰۰ کیلومتر مربع و یا ۲۷ درصد مساحت کل آبخوان به‌دست آمده‌است. متوسط دبی آبکشی کل چاه‌های بهره‌برداري در حالت دبی اصلاحی و پرونده‌ای نیز به ترتیب ۱۸/۳۷ و ۱۱/۱۴ لیتر بر ثانیه محاسبه گردیده است. نتیجه این تفاوت دبی آبکشی در اختلاف کل مساحت تداخل حریمی به وضوح مشخص است که تقریباً برابر با ۳۰ درصد (۱۱۶/۶ کیلومتر مربع) به‌دست آمده‌است و در مقایسه شکل‌های (۹) و (۱۰) نیز دیده می‌شود.

جدول ۲. خلاصه نتایج تداخل حریمی در حالت‌های آبکشی مختلف

گزینه (دبی)	دبی متوسط (Lit/s)	مساحت تجمعی شعاع تأثیر (Km ²)	مساحت تداخل حریمی (Km ²)
اصلاحی	۱۸/۳۷	۲۷۱/۲۳ (درصد ۶۹/۵)	۱۹۲/۱۲ (درصد ۴۹/۳)
پرونده‌ای	۱۱/۱۴	۱۶۸/۲۴ (درصد ۴۳/۱)	۷۵/۵۳ (درصد ۱۹/۴)

نتایج پراکندگی شعاع تأثیر در حالت‌های آبکشی مختلف در جدول (۳) ارائه شده‌است. در حالت دبی اصلاحی، مطابق انتظار تقریباً اکثریت چاه‌ها در بازه شعاع ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ متر قرار دارند و به عبارتی تقریباً نیمی از چاه‌های بهره‌برداري شعاع تأثیری بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر دارند و از طرفی نیز، وجود ۴۲ چاه با شعاع تأثیر بیش از ۱۰۰۰ متر در این حالت بسیار قابل تامل است. این نتایج در حالی به‌دست آمده است که در حالت اعمال دبی پرونده‌ای، ۱۳۵ حلقه از چاه‌ها دارای شعاعی تأثیر کم‌تر از ۱۰۰ متر دارند. همچنین قریب ۶۸ درصد چاه‌های منطقه شعاع تأثیری بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر دارند. در واقع این اختلاف و تفاوت‌ها تأثیر خود را در مساحت مناطق دارای تداخل حریمی نشان داده‌اند.

جدول ۳. پراکندگی شعاع تأثیر در حالت‌های آبکشی مختلف (متر)

گزینه (دبی)	کم‌تر از ۱۰۰	۱۰۰ تا ۲۵۰	۲۵۰ تا ۵۰۰	۵۰۰ تا ۱۰۰۰	بیش‌تر از ۱۰۰۰
اصلاحی	۸	۲۰	۳۳۰	۳۸۷	۴۲
پرونده‌ای	۱۳۵	۱۶۷	۳۶۷	۱۱۷	۱

بحث

در شرایط اقلیمی کشور، با توجه به حجم عظیم برداشت از منابع آب زیرزمینی توسط چاه‌ها و نیز با در نظر گرفتن تعداد چاه‌هایی خصوصاً در سنوات اخیر حفر گردیده، محاسبه حریم به منظور اعمال مدیریت صحیح بر حفظ و بهره‌برداري بهینه از منابع آب زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا یکی از مسائل که دست اندرکاران حفاظت از آب‌های زیرزمینی را به خود مشغول کرده، تراکم و نزدیکی چاه‌های بهره‌برداري از یک سو و اضافه برداشت توسط بهره‌برداران از سوی دیگر است. از این رو؛ در این تحقیق، در ابتدا تابع چاه حل ریاضی گردیده و شعاع تأثیر هر یک از چاه‌ها در دو حالت اعمال دبی اصلاحی (بر اساس سطح زیر کشت) و دبی پرونده‌ای (دبی پروانه بهره‌برداري) به‌دست آمد. سپس نقشه شعاع تأثیر کل چاه‌های محدوده ترسیم و سپس نواحی دارای تداخل حریمی مشخص و ترسیم گردید.

نتیجه‌گیری

بررسی و تحلیل نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر حاکی از این واقعیت است که متأسفانه در اکثر دشت‌های کشور که مصارف کشاورزی دارند، تداخل حریمی میان چاه‌های بهره‌برداری وجود داشته و در اثر تراکم و همجواری نامناسب، شعاع تأثیر دو و حتی عموماً چندین حلقه چاه باهم تداخل دارند. اضافه بر این، برداشت بیش از حد و ظرفیت آبخوان از چاه‌ها مزید بر علت شده و ضریب آسیب‌پذیری آبخوان و احتمال بروز مشکلات آبی را افزایش می‌دهد. همچنین باید در نظر داشت که آبخوان سنجایی، یکی از آبخوان‌هایی است که نسبت به دیگر آبخوان‌های موجود در استان دارای شرایط متوسطی بوده و در سالیان اخیر و تحت تنش‌های وارده ناشی از خشکسالی‌های اخیر و برداشت‌های غیر مجاز و بیش از حد، دارای افت شدید سطح آب بوده است. لذا لزوم بررسی‌های جامع‌تر و دقت بیشتر در دیگر دشت‌ها و آبخوان‌های مناطق حساس‌تر و تحت تنش بیشتر، می‌تواند نتایج کامل‌تر و بعضاً نگران‌کننده‌تری را ارائه نماید. چراکه باید دقت نظر داشت که با توجه به شرایط اقلیمی و خشکسالی موجود، منابع آب زیرزمینی قابلیت تجدید و تغذیه مناسب نداشته و با توجه به تجارب موجود در دیگر نقاط کشور، ادامه روند فعلی باعث ایجاد افت شدید سطح آبخوان و به تبع آن نشست و به وجود آمدن فروچاله‌ها خواهد شد.

راهکارهای برون رفت از بحران

- در مدیریت بهینه منابع آب برای مصارف کشاورزی برنامه‌ریزی باید به گونه‌ای صورت پذیرد که ضمن صرفه‌جویی آب در مصرف و کاهش آسیب‌های ناشی از برداشت از این منابع بتوان سطح زیاده‌تر را زیر کشت برد. با این نگرش راهکارهای موجود مطرح و مورد بررسی قرار داده شد.
- ۱- پر و مسلوب‌المنفعه نمودن چاه‌های غیر مجاز منطقه.
 - ۲- تغییر در الگوی کشت رایج و در حال استفاده و تغییر در نگرش کشاورزان.
 - ۳- لزوم مدرن نمودن سیستم‌های آبیاری موجود.
 - ۴- فرهنگ سازی و آموزش‌های لازم به بهره‌برداران در زمینه توجه ویژه به ارزش منابع آب زیرزمینی و لزوم صرفه‌جویی بهینه.
 - ۵- لزوم توجه به تغییر کاربری اراضی از کشاورزی به سمت مصارف دیگر به ویژه مصارف صنعتی بر اساس شرایط منطقه.

با عنایت به ابلاغ سند راهبردی نظام فنی و اجرایی طرح کاداستر اراضی کشور و نظر به اینکه بیش‌ترین حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی به زراعت محصولات راهبردی نظیر گندم، جو و ذرت اختصاص می‌یابد که مسئولیت خرید تضمینی اکثریت این محصولات را نهادهای دولتی برعهده دارند، می‌توان در راستای تعیین محل و میزان آب مصرفی جهت محصولات مختلف تولیدی گام برداشت. این راهکار بدین معناست که در زمان خرید محصولات کشاورزان، امکان رهگیری و برخورد با کشاورزانی که محصول خود را با آب غیر مجاز تولید نموده‌اند، امکان‌پذیر خواهد شد.

سپاس‌گزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند، از شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه به‌دلیل در اختیار قرار دادن اطلاعات اولیه و مساعدت‌های انجام شده، نهایت سپاس و قدردانی را اعلام دارند.

منابع

- بهرامی، مهدی، رجبی، سارا، و جاویدی آل سعدی، محمدحسین. (۱۴۰۰). ارزیابی روش‌های مختلف محاسبه شعاع تأثیر چاه. پنجمین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، بیرجند. <https://civilica.com/doc/1250765>
- رشیدی، حمید. (۱۳۸۰). قانون توزیع عادلانه آب در آیین حقوق ایران. جلد اول، مالکیت عمومی آب، آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی، انتشارات دادگستر.

- زمانی مقدم. محمد قدیر، مریدی، علی، و یزدی، جعفر. (۱۳۹۹). تعیین حریم کیفی چاه‌های آب شرب با در نظر گرفتن پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان. *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۶(۱)، ۱-۱۶. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1399.16.1.1.5>
- سروری، محمدرضا، چیت‌سازان، منوچهر. (۱۳۸۷). بررسی حریم فنی تداخل مخروط افت چاه در دشت جایزان جهت جلوگیری از ایجاد یافت شدید در آبخوان منطقه. *سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران*، دانشگاه تبریز. <https://civilica.com/doc/50281>
- کاهش سطح آب‌های زیرزمینی (۱۳۹۰). *مجله نشنال جئوگرافیک*. <https://waterstudent.blogspot.com>
- مسلمی عقیلی، نسیم السادت، کرمی، غلامحسین، و یخکشی، ابراهیم. (۱۳۹۵). بررسی آماری تاثیر چاه‌های آب بر یکدیگر در یک مجموعه چاه، مطالعه موردی منطقه گرمادشت- سیاهتلو (گرگان). *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۳(۵)، ۳۱۷-۳۲۴. <https://dx.doi.org/10.22069/jwfst.2017.10646.2509>

References

- An, Karen. (2015). Investigating the Relationship between Land Subsidence and Groundwater Depletion in the North Plain Using GRACE and WICES. Master's Thesis, University of California, Los Angeles.
- Bahrami, M., Rajabi, S., & Javidi Al Saadi, M.H. (2021). Evaluate different methods of calculating the impact radius of a well. Fifth National Congress of Irrigation and Drainage of Iran, Birjand. <https://civilica.com/doc/1250765> [Persian]
- Bordbar, M., Neshat, A.R., & Javadi, S. (2019). Modification of the GALDIT framework using statistical and entropy models to assess coastal aquifer vulnerability. *Hydrological Sciences Journal*, 64 (9), 1117–1128. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620951>
- Boulton, N.S., & Streltsova, T.D. (1976). The drawdown near an abstraction of large diameter under non-steady state condition in unconfined aquifers. *Journal of Hydrology*, 30, 29-46. <https://trid.trb.org/view/53810>
- Cong-Thi, D., Dieu, L.P., Thibaut, R., Paepen, M., Ho, H.H., Nguyen, F., & Hermans, T. (2021). Imaging the Structure and the Saltwater Intrusion Extent of the Luy River Coastal Aquifer (Binh Thuan, Vietnam) Using Electrical Resistivity Tomography. *Water*, 13(3), 1743. <https://doi.org/10.3390/w13131743>
- Dragoni, W. (1998). Some consideration regarding the radius of influence of a pumping well. Perugia Italy.
- Faunt, C.C., Sneed, M., Traum, J., & Brandt, J.T. (2015). Water availability and Land Subsidence in the Central Valley, California, USA. *Hydrogeol journal*, 24(1), 675-684. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1339-x>
- Focazio, J.R., & Speiran, G.K. (1993). Estimating net drawdown resulting from episodic withdrawals at six well fields in the Coastal plain physiographic province of Virginia, U.S. <https://doi.org/10.3133/wri934159>
- Galloway, D.L., Jones, D.R., & Ingebritsen, S.E. (1999). Land subsidence in the United States. U.S., Geological Survey Circular 1182. Geological Survey water-resources investigations report 93-4159. <https://doi.org/10.3133/cir1182>
- Larson, K.J., Barasaolu, H., & Mariño, M.A. (2001). Prediction of optimal safe groundwater yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model. *Journal Hydrology*, 242, 79–102. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00379-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00379-6)
- Manivanna, V., & Elango, L. (2019). Seawater intrusion and submarine groundwater discharge along the Indian coast. *Environmental Science and Pollution Research*, 26.
- Mosallami, N., Karami, G., & Yakhkeshi, E. (2016). A statistical study on the effect of water wells on each other in a well field, case study the region of Garmabdasht-Siahtalu (Gorgan). *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(5), 317-324. <https://dx.doi.org/10.22069/jwfst.2017.10646.2509> [Persian]

- Nyman, D.J. (1965). Predicted hydrologic effects of pumping from the Lighterman well field in the Memphis area, Tennessee. Geological survey water-supply 1819-B. <https://doi.org/10.3133/wsp1819B>
- Rashidi, H. (2001). Law on Fair Distribution of Water in the Mirror of Iranian Law. Volume One, Public Ownership of Water, Groundwater and Surface Waters, Justice Publications. [Persian]
- Reducing the groundwater level.(2011). National Geographic magazine. <http://waterstudent.blogspot.com> [Persian]
- Russell, M.J. (2006). A Simplified Technique for Well-Field Design. Article first published online. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1969.tb01277.x>
- Sarvari, M., & Chitsazan, M. (2008). Examine the technical limits and interfere cone drop in the plains wells permissible to prevent a sharp drop in the aquifer area. The Third Conference of Iran Water Resources, University of Tabriz. <https://civilica.com/doc/50281> [Persian]
- Smith, R.P.G., Knight, R., Chen, J., Reeves, J.A., Zebker, H. Ao., & Farr Tuand Liu, Z. (2017). Estimating the permanent loss of groundwater storage southern Sany Joaquin Valley, California, Water Resources Research journal, 53, 2133-2148. <https://doi.org/10.1002/2016WR019861>
- Trinh, M.T., & Fredlund, D.G. (2000). Modelling subsidence in the Hanoi City area, Vietnam. Canadian geotechnical journal, 37 (3), 621–637.
- Walton, W.C. (1962). Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. Illinois State Water Survey Bulletin 39. <https://hdl.handle.net/2142/94577>
- Wilson, C.P.V. (1982), Groundwater Hydrology (2nd edn) by D. K. Todd. Wiley, New York. <https://www.yumpu.com/en/document/view/26396235>
- Zamani Moghadam, M. Gh, Moridi, A., & Yazdi, J. (2020). Determining the Groundwater Quality Protection Zone by Considering the Vulnerability of Aquifer. Iran- Water Resources Research, 16(1), 1-16. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1399.16.1.1.5> [Persian]
- Zghibi, A., Merzougui, A., Mansaray, A.S., Mirchi, A., Zouhri, L., Chekirbane, A., Msaddek, M. H., Souissi, D., Mabrouk-El-Asmi, A., & Boufekane, A. (2022). Vulnerability of a Tunisian Coastal Aquifer to Seawater Intrusion : Insights from the GALDIT Model .Water, 14(7), 1177. <https://doi.org/10.3390/w14071177>