Agricultural Economics and Development
Vol.31, No.124, Winter 2024

Research Paper

Optimizing the Effects of Iirrigation Levels and Potassium on Fodder Sorghum Yield under Water Crisis Conditions in Sistan Region of Iran

M. Mohammadghasemi [1], A. Ghasemi [2], M. Dahmardeh [3], M. Effati [4]

Received: 14 February, 2023 Accepted: 24 December, 2023

Introduction: Water shortage is one of the major problems of most countries in the world, especially countries with a growing population. The only solution to this crisis is the optimal use and increasing the productivity of water resources in various sectors, especially the agricultural sector. Therefore, it seems necessary to plan for optimal use of resources and economic allocation of this scarce factor among different uses.

Materials and Methods: Multi-Stage Interval Programming (MSIP) method consists of the combination of dynamic and interval programming in the framework of stochastic optimization. The dynamics of the model, the application of a predefined policy during the optimization process, and the use of interval parameters and probabilities under the uncertainty conditions are among the advantages of this technique. Multi-Stage Interval Stochastic Programming (MSISP) is the application of interval parameters under the uncertainty conditions and considering the farmer's profit and loss during water supply or shortage. Also, the mentioned model presents the values of water shortage during the programming period and gives farmers the opportunity to plan to face the water crisis. In fact, this model is a model between the primary goals of exploitation and economic goals.

1. Corresponding Author and Assistant Professor of Agricultural Economics, Sistan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Zabul, Iran (m.mghasemi@areeo.ac.ir).
2. Assistant Professor of Agriculture, Horticulture Department, Sistan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Zabul, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Economics and Agricultural Development, Payame Noor University, Tehran, Iran.
4 . Assistant Professor, Agricultural Planning, Economics and Rural Development Research Institute (APERDRI), Tehran, Iran.

DOI: 10.30490/AEAD.2023.361520.1502

Results and Discussion: Since the water supply for the region over time is a random variable, using the simulation method and the use of random numbers for different years, water supply was simulated 100 times randomly. These numbers were taken into account by considering an interval using the maximum and minimum of the past data and their standard deviation. It is worth mentioning that the 100 random selections of the amount of supply for the low water flow state were selected from dry years and for the other two states from normal and wet years, respectively.

Conclusions: In general, since water is very important in dry areas, especially in the Sistan region of Iran, and water-saving in consumption and most importantly, the efficiency of water consumption is one of the main priorities, any research leading to an increase in the water-productivity and water-saving in the use of this valuable input will help the region.

Keywords: *Water Crisis, Interval Stochastic Programming (ISP), Moisture Evacuation, Sistan (Region).*

JEL Classification: Q16, Q23, Q25

اقتصاد کشاورزی و توسعه

سال ۳۱، شماره ۱۲٤، زمستان ۱٤۰۲

مقاله پژوهشی

بهینه‌یابی اثرات سطوح آبیاری و پتاسیم بر عملکرد سورگوم علوفه‌ای در شرایط بحران آب منطقهٔ سیستان

محمود محمد قاسمی[۱]، احمد قاسمی[۲]، مجید دهمرده[۳]، محمد عفتی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۳

چکیده

با توجه به محدودیت منابع آبی و افزایش قیمت نهاده‌های کشاورزی در کشور، بهره‌برداری بهینه از منابع و افزایش عملکرد در تولید محصولات برای رسیدن به رشد اقتصادی در بخش کشاورزی کاملاً ضروری است. از این‌رو، در مطالعه حاضر، اثر مقادیر مختلف پتاسیم و سطوح آبیاری برعملکرد سورگوم با استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی بازه‌ای چندمرحله‌ای در شرایط عدم قطعیت بررسی شد. بدین منظور، از داده‌های طرح تحقیقاتی اجراشده در ایستگاه تحقیقات کشاورزی زهک به‌مدت دو سال زراعی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ در خصوص اثر مقادیر مختلف پتاسیم و سطوح آبیاری بر عملکرد سورگوم علوفه‌ای اسپیدفید استفاده شد. محاسبهٔ نیاز آبی گیاه با استفاده از نرم‌افزارهای Cropwat و Netwat و با بهره‌گیری از روش پنمن مانتیث صورت گرفت؛ و تابع تولید و تابع سود با استفاده از تابع درجه دوم چندجمله‌ای برآورد شد. نتایج نشان داد که از بین تیمارهای آبیاری در سه سطح مختلف، آبیاری پس از تخلیه شصت، چهل و هشتاد درصد آب قابل استفاده

۱- نویسندهٔ مسئول و استادیار اقتصاد کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زابل، ایران. (M.Mghasemi@areeo.ac.ir)

۲- استادیار زراعت بخش زراعی باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زابل، ایران.

۳- استادیار گروه اقتصاد و توسعه کشاورزی دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

۴- استادیار مؤسسهٔ پژوهش‌های برنامه‌ریزی، اقتصاد کشاورزی و توسعهٔ روستایی، تهران، ایران.

گیاه و تیمارهای کودی در سه سطح پتاسیم شامل مقادیر صفر، پنجاه و صد کیلوگرم در هکتار از منبع سولفات پتاسیم بیشترین ارزش سود مورد انتظار، تیمار آبیاری پس از تخلیه چهل درصد آب قابل استفاده گیاه و تیمار کودی در سطح پنجاه کیلوگرم در هکتار در دو شرایط نرمال و خشکسالی بود. علاوه بر این، نتایج نشان داد که مقادیر عملکرد و اجزای عملکرد بین مصرف صد کیلوگرم کود و پنجاه کیلوگرم در هر هکتار کود پتاسیم، علی‌رغم کاهش چهل درصدی آب مصرفی، تفاوت معنی‌دار وجود ندرد. این موضوع نشان می‌دهد که کاربرد کود پتاسیم می‌تواند تا حدودی کاهش آب مصرفی را جبران کند. اما در صورتی که تنش‌های آبی شدیدتر شوند، تأثیر کود پتاسیم در جبران کاهش عملکرد کمتر خواهد شد. همچنین، نتایج بیانگر آن بود که سطوح بهینه آب در سه مزرعه برداشت علوفه مورد بررسی ۱۲۸۴۰، ۱۲۷۳۶ و ۱۲۷۳۰ متر مکعب آب در هکتار است.

کلیدواژه‌ها: *بحران آب، برنامه‌ریزی تصادفی بازه‌ای، تخلیه رطوبتی، سیستان (منطقه).*

طبقه‌بندی JEL **:** Q16, Q23, Q25

مقدمه

کمبود آب یکی از مشکلات عمده اکثر کشورهای جهان، به‌ویژه کشورهای دارای جمعیت روبه‌رشد به‌شمار می‌آید. تنها راه حل این بحران نیز استفاده بهینه و افزایش بهره‌وری منابع آب در بخش‌های مختلف به‌ویژه بخش کشاورزی است. از این‌رو، برنامه‌ریزی برای استفاده بهینه از منابع و تخصیص اقتصادی این عامل کمیاب بین مصارف مختلف ضروری به‌نظر می‌رسد (Asadi et al., 2022).

در کشورهای در حال توسعه، بهره‌وری آب کشاورزی از مهم‌ترین راهکارهای اساسی تلقی می‌شود. البته، در ارزیابی اثربخشی آب در تولید گیاه، علاوه بر مقدار ماده تولیدشده، باید ارزش ماده تولیدی و درآمد حاصل از مصرف هر متر مکعب آب (شاخص اقتصادی بهره‌وری) و یا مقدار پروتئین و کالری تولیدی به ازای مقداری مشخص از آب مصرفی نیز مورد توجه قرار گیرد (Rao et al., 2016).

یکی از عوامل افزاینده سود برای هر متر مکعب آب مصرفی در بخش کشاورزی استفاده از نهاده‌های تولید مثل کود و بذر است. کشاورزان از مصرف این نهاده‌ها و کاربرد واقعی آنها و همچنین، پاسخ گیاهان به روش‌های مختلف مدیریت آب، کود و بذر و در نتیجه، از افزایش سوددهی آگاهی کامل ندارند و از این‌رو، تداوم تبادل دانش پژوهشگران با بهره‌برداران باعث مدیریت کارآمد نهاده‌ها می‌شود و می‌تواند مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی گسترده‌تر را برای کشاورزان به‌همراه داشته باشد (Mohammadghasemi et al., 2021).

بنابراین, پرداختن به موضـــوع بهینه‌ســـازی نهاده‌های تولید در بخش کشـــاورزی و تحلیل شـــاخص‌های اقتصـــادی آنها در منطقه، به‌علت محدودیت کمی و کیفی نهاده‌ها به‌ویژه نهاده باارزش آب، از جایگاهی ویژه برخوردار اســـت. با بررســـی بهینه‌یابی اســـتفاده از نهاده‌ها، شـــناخت بیشـــتر دســـت‌اندرکاران برای برنامه‌ریزی بهتر در اســـتفاده بهینه از نهاده‌ها میســـر خواهد شـــد (Sardar Shahraki and Karim, 2020).

به‌منظور آشـنایی بیشـتر با اهمیت و ادبیات موضـوع, برخی از پژوهش‌های پیشـین در زمینه استفاده نهاده‌های اساسی آب و کود در تولید محصولات کشاورزی در پی یادآوری می‌شود. نخست، پیشینه پژوهش‌های داخلی و سپس، برخی از مطالعات سایر کشورها ارائه خواهد شد.

ورجاوند و همکاران (Varjavand et al., 2021)، در بررسـی بهره‌وری فیزیکی و اقتصـادی آب در تولید گندم در استان خوزستان، بدین نتیجه رسیدند که میانگین بهره‌وری فیزیکی آب آبیاری در شـهرسـتان‌های اهواز و دشـت آزادگان، به‌ترتیب، ۱/۰۶ و ۰/۸۹ کیلوگرم بر متر مکعب آب بوده و همچنین، بهره‌وری آقتصـادی آب بر اسـاس سـود خالص در شـهرسـتان‌های اهواز و دشـت آزدگان، به‌ترتیب، ۷۴۵۶ و ۵۳۷۷ ریال به ازای هر متر مکعب آب است.

غفاری و همکاران (Ghaffari Moghaddam et al., 2022)، در مطالعه بهینه‌یابی برنامه زراعی و تخصیص آب با کاربرد شیوه‌های استاکلبرگ و فرا ابتکاری در منطقه سیستان، نشان دادند که به محصولات دارای ارزش اقتصادی بالاتر و نیاز آبی کمتر آب بیشتری تخصیص داده شده است؛ و بنابراین، محصـولات زراعی با سـود کمتر نسـبت به آب مصـرفی و همچنین، محصـولات دارای نیاز آبی بالا از الگوی کشت حذف و محصولات با صرفهٔ اقتصادی بالاتر و نیاز آبی کمتر در الگوی کشت جایگزین شـده‌اند، که این راهکار را می‌توان برای مواجهه با شـرایط کمبود آب مناسـب دانسـت؛ افزون بر این، افزایش راندمان آبیاری باعث افزایش ســـود کل شـــده و از این‌رو، صـــرفه‌جویی در مقدار آب مصرفی گیاهان از طریق بهبود فناوری آبیاری و افزایش راندمان آبیاری توصیه شده است.

جهاندیده و امامی (Jahandideh and Emami, 2022)، در ارائه مدلی برای تخصـیص آب شبکه آبیاری و زهکشی با استفاده از روش‌های هوشمند تکاملی برای تخصیص بهینه منابع آب شبکه آبیاری و زهکشـی صوفی‌چای واقع در استان آذربایجان شرقی در بخش کشاورزی، نشان دادند که با افزایش ضریب اعمالی به ۰/۹, سود حاصل از تخصیص بهینه آب با سی درصد افزایش سود اقتصادی همراه خواهد شد.

بر اســاس نتایج پژوهش علیزاده و عباســی (Alizadeh and abbasi, 2016)، در بررســی بهینه‌یابی مصـرف آب و کود در آبیاری ذرت دانه‌ای، در شـرایط محدودیت زمین، سـطوح بهینه آب و کود مصـرفی برای دسـتیابی به حداکثر سـود خالص، به‌ترتیب، ۹۴۰ میلی‌متر و ۳۷۵ کیلوگرم در هکتار بوده و اما در شرایط محدودیت آب، سطوح بهینه مصرف آب و کود شامل مصرف ۷۷۴ میلی‌متر (۷۷ درصد آب مصرفی) و ۳۵۷ کیلوگرم کود در هکتار (نود درصد نیاز کودی) است.

باقرزاده و همکاران (Bagherzadeh et al., 2022)، در ارزیابی پراکنش عناصــر غذایی پرمصــرف به‌منظور بهینه‌یابی مصــرف کود در گندم، نشــان دادند که پراکنش مکانی عناصــر متفاوت بوده، به‌گونه‌ای که در نود درصد اراضی، میزان کربن آلی خاک کمتر از نیاز گندم و نیز در ۲/۳۲ و ۴۶ درصد اراضی، پتاسیم و فسفر قابل جذب، به‌ترتیب، بیش از حد بحرانی برای گندم است؛ در مجموع، تهیه نقشــه پراکنش عناصــر غذایی می‌تواند نشــان‌دهندهٔ کمبود و یا بیش‌بود عناصــر غذایی در خاک باشد و از آن در بهینه‌یابی مصرف کودها استفاده شود.

موسـوی‌فضـل و همکاران (Mousavi Fazl et al., 2017)، در بررسـی اثر آب آبیاری و کود پتاسـیم بر عملکرد سـورگوم علوفه‌ای با هدف تعیین تابع تولید- آب- کود، نشـان دادند که متوسـط شاخص تولید نهایی عملکرد علوفه نسبت به عمق آب آبیاری (MPI) برابر با ۱/۵۲ تن بر سانتی‌متر و شـــاخص تولید نهایی کود پتاســـیم (MPK) برابر با ۰/۰۷۶ تن بر کیلوگرم در هکتار بوده و نرخ جایگزینی فنی کود پتاســیم به‌جای آب آبیاری (MRTS) برای عملکرد علوفه ۰/۰۵ کیلوگرم اســت؛ همچنین، متوسط ارزش ریالی تولید علوفه نسبت به عمق آب آبیاری برابر با ۳۰۴۰۰۰۰ و ارزش تولید نهایی کاربرد کود پتاسیم ۱۵۲۰۰۰ ریال به‌دست آمده است.

بر اســاس نتایج مطالعه ســلامه و همکاران (Salama et al., 2017) در مصــر, عملکرد و بهره‌وری فیزیکی آب در تولید گندم، به‌ترتیب، ۷۱۰۴ کیلوگرم در هکتار و ۱/۴۱ کیلوگرم بر متر مکعب برآورد شده است.

محمد و آشوک (Mohamed and Ashok, 2014)، در بررسی اثر آب آبیاری و کود پتاسیم بر عملکرد سـورگوم، نشـان دادند که کاربرد کود پتاسـیم می‌تواند بخشـی از تنش آبی وارده به گیاه را جبران کند.

دیواکار و همکاران (Divakar et al., 2013)، در مطالعه تخصــیص بهینه منابع آب برای اسـتفاده بخش‌های کشـاورزی, بر اسـاس معیارهای اقتصـادی و توابع سـود بخش‌های کشـاورزی در

تایلند، نشان دادند که مدل تخصیص بهینه با ابزار پویا می‌تواند درآمدهای اقتصادی را نسبت به سایر مدل‌های تخصیص بهبود بخشد.

جمع‌بندی مروری بر مطالعات مرتبط نشـــان می‌دهد که گرچه حداکثر عملکرد محصـــول در نتیجه استفاده از کود کامل به‌دست می‌آید، اما همیشه عملکرد حداکثر «عملکرد اقتصادی» نخواهد بود. تحقیقات نشان داده است که اگر برای بسیاری از محصولات کشاورزی، زمان اعمال کود و مقدار آن به‌درستی انتخاب شود، ضمن افزایش کارآیی مصرف کود، عملکرد نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، نتایج مطالعات داخلی نشان می‌دهد که میانگین بهره‌وری فیزیکی آب آبیاری در تولید ذرت علوفه ای ۴/۶۴ کیلوگرم بر متر مکعب آب مصرفی و بهره‌وری اقتصادی آب در تولید ذرت علوفه‌ای ۵۵۳۱/۶ ریال بر متر مکعب است؛ همچنین، بر اساس نتایج مطالعات خارجی، کود پتاسیم می‌تواند بخشی از تنش آبی وارده به گیاه را جبران کند.

هدف مطالعه حاضر برآورد مدل بهینه‌یابی اثرات سطوح آبیاری و پتاسیم بر عملکرد سورگوم علوفه‌ای با اســتفاده از روش برنامه‌ریزی تصــادفی بازه‌ای چندمرحله‌ای در شــرایط عدم قطعیت بوده است.

مواد و روش‌ها

برنـامـه‌ریزی بـازه‌ای چنـدمرحلـه‌ای[1] از ترکیـب دو برنـامـه‌ریزی پویـا و بـازه‌ای در چـارچوب بهینه‌سازی تصادفی تشکیل می‌شود. پویایی مدل، به‌کارگیری خط‌مشی از پیش‌تعریف‌شده در طول فرآیند بهینه‌ســازی و اســتفاده از پارامترهای بازه‌ای و احتمالات در شــرایط عدم قطعیت از مزیت‌های این شـیوه اسـت. برنامه‌ریزی تصـادفی بازه‌ای چندمرحله‌ای[2] شـامل به‌کارگیری پارامترهای بازه‌ای در شـرایط عدم قطعیت و در نظر گرفتن سـود و زیان زارع در هنگام تأمین یا کمبود آب اسـت. همچنین، این مدل مقادیر کمبود آب طی دوره برنامه‌ریزی را ارائه و به زارعان فرصـــت برنامه‌ریزی برای رویارویی با بحران آب را می‌دهد؛ و در حقیقت، مدلی بین اهداف اولیه بهره‌برداری و اهداف اقتصـادی است (Parhizkari et al., 2015).

اسـاسـاً اشـکال مختلف تابع تولید، در واقع، فناوری تولید را نشـان می‌دهند و فناوری تولید نیز نحوه ترکیب نهاده‌های مختلف را نشان می‌دهد؛ اختلاف موجود در شرایط تولید و مدیریت کشاورزان موجب می‌شـود که نهاده‌های تولید به شـیوه‌های گوناگون با هم ترکیب شـوند. بنابراین، نیاز به توابعی

1. Multi-Stage Interval Programming (MSIP)
2. Multi-Stage Interval Stochastic Programming (MSISP)

اســت که این اختلافات را بهتر نشــان دهند. ســه تابع ترانســلوگ، درجه دوم تعمیم‌یافته و لئونتیف تعمیم‌یافته محدودیت‌های کمتری نسبت به دو تابع کاب- داگلاس و کشش جانشینی ثابت بر ساختار تولید اعمال می‌کنند (Ghaderi, 2009). برای انتخاب فرم برتر از میان توابع ترانســلوگ، لئونتیف و درجه دوم تعمیم‌یافته، نیاز به معیارهای اقتصادسنجی است. تعداد پارامترهای کمتر، سادگی تفسیر، سادگی محاسباتی و خوبی برازش از معیارهایی به‌شمار می‌روند که در تعیین الگوی اقتصادسنجی برای کارهای تجربی مفیدند. مطابقت و ســازگاری علامت‌ها و مقادیر پارامترهای تابع با نظریه‌های اقتصادی نیز از معیارهای دیگر در شناسایی الگوی برتر است.

با توجه به آنچه گفته شد، برای تخمین تابع تولید در شرایط مختلف، از فرم تابع تولید درجه دوم چندجمله‌ای به‌صورت زیر استفاده شده است:

$$Y_a / Y_m = f(w) = a_0 + a_1 w + a_7 w^2 \quad (۱)$$

که در آن، Y_a عملکرد واقعی محصــول (تن/ هکتار)، Y_m حداکثر عملکرد بالقوه محصــول (تن/ هکتار)، $w = WA/ET_m$ نسبت کل آب در دسترس به حداکثر تبخیر بالقوه فصلی محصول و یا به دیگر سخن، تبخیر و تعرق واقعی به تبخیر و تعرق بالقوه است. کل آب در دسترس برای محصول شامل بارندگی مؤثر، آب آبیاری و رطوبت خاک است (Mohammadghasemi et al., 2021). علاوه بر آن، به‌منظور استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی، ابتدا تابع تولید در شرایط مختلف تخمین زده شد و سپس، تابع سود به‌صورت رابطهٔ زیر به‌دست آمد:

$$\widetilde{B}_j = \sum pcp_{j,cp}.Ya_{j,cp}.AF_{j,cp} - \sum vc_{j,cp}.AF_{j,cp} \quad (۲)$$

که در آن، $pcp_{j,cp}$ قیمت محصــول، $vc_{j,cp}$ هزینه متغییر تولید محصــول و همچنین، $AF^u{}_{j,cp}$ و $AF^l{}_{j,cp}$ بیشترین و کمترین سطح زیر کشت محصول (هکتار) است. بنابراین، تابع هدف را می‌توان به‌صورت رابطهٔ زیر نوشت (Azarmesa et al., 2018):

(۳)

$$\max \quad \tilde{\beta}_j$$
$$s.t: \quad \sum_{cp} AF_{j,cp} \le A_j$$
$$AF^{l}{}_{j,cp} \le AF_{j,cp} \le AF^{u}{}_{j,cp}$$
$$\sum_{cp} EI_{j,cp}.AF_{j,cp} \le Q$$

که در آن، A_j کل سطح زیر کشت (هکتار)، $EI_{j,cp}$ مقدار آب آبیاری مؤثر که در طول فصل رشد مورد نیاز است (متر مکعب/ هکتار) و Q مقدار کل آب آبیاری مؤثر موجود است. سپس، با استفاده از تابع سود مدل بهینه‌سازی سطوح آبیاری و پتاسیم بر عملکرد سورگوم به‌صورت روابط زیر به‌دست آمد (Rastgaripour and Sabouhi Sabouni, 2010):

(۳)

$$maxf = \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} NB_{it}\ W_{it} - \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{m}}\sum_{=1}^{\mathrm{n}}\sum_{\mathrm{k=1}}^{\mathrm{r}} \mathrm{p_{it}}\ \mathrm{C_{it}}\ \mathrm{D_{ik}}$$

s.t

$$q_i \ge \sum_{i=1}^{m} (W_{it} - D_{itk}) \quad \forall\, i,j$$
$$\forall\, i,t,k W_{itmax} \ge W_{it} \ge D_{it}$$

که در آن، F سود خالص، NB_{it} سود کشاورز ناشی از مصرف پتاسیم تیمار i در دوره t به ازای هر واحد آب تخصیصی، W_{it} آب وعده‌داده‌شده به کشاورز برای مصرف پتاسیم تیمار i در دوره t، C_{it} ضرر کشاورز ناشی از مصرف پتاسیم تیمار i به ازای هر واحد آب وعده‌داده‌شده و رهانشده در دوره t، D_{itk} کمبود آب برای تیمار i بر اساس سناریوی k در دوره t (به دیگر سخن، مقداری از W_{it} که در هنگام q_{th} رها نمی‌شود)، q_{th} متغیر تصادفی عرضه آب در دوره t و سطح جریان h، $W_{it\,max}$ بیشترین مقدار تخصیص آب برای مصرف‌کننده i در زمان t، P_{tk} احتمال رخ دادن سناریوی k در دوره t، k کل تعداد سناریوها و t کل تعداد سطوح جریان، i سطح مصرف پتاسیم (i=1 مصرف صفر کیلوگرم پتاسیم، i=2 مصرف پنجاه کیلوگرم کود پتاسیم و i=3 مصرف صد کیلوگرم کود پتاسیم) و t سطوح

آبیاری (در اینجا، t=3)، t=1 چهل درصد تخلیه رطوبتی، t=2 شصت درصد تخلیه رطوبتی و t=3 هشتاد درصد تخلیه رطوبتی است.

مدل ۳ عدم قطعیت در مقدار آب عرضه‌شده توسط سطح احتمال P_{tk} را بیان می‌کند، ولی پارامترهای W_{it}، C_{it} و NB_{it} را به‌صورت قطعی در نظر می‌گیرد، در حالی که در دنیای واقعی، این پارامترها نیز ممکن است قطعی نباشد. برای حل این مسئله، پارامترهای مدل یادشده به‌صورت بازه‌ای در نظر گرفته شده و نتیجه مدل در قالب روابط زیر ارائه شده است (Monem, 2017):

(۴)

$$maxf^{\pm} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{t=1}^{T} NB_{it}^{\pm} W^{\pm}{}_{it} - \sum_{i=1}^{m}\sum_{=1}^{n}\sum_{k=1}^{r} P_{tk}^{\pm} C_{tk}^{\pm} D_{itk}^{\pm})$$

$$s.t\ q_{th} \geq \sum_{i=1}^{m} (W_{it}{}^{\pm} - D_{itk}{}^{\pm}) \quad \forall\, i,j$$

$$\forall\, i,t,k W_{imax}^{\pm} \geq W_{it}^{\pm} \geq D_{it}^{\pm}$$

که در آن، $f^{\pm}$ بازه سود خالص، $NB_{it}^{\pm}$ سود کشاورز ناشی از مصرف پتاسیم تیمار در دوره t به ازای هر واحد آب تخصیصی، $W^{\pm}{}_{it}$ آب وعده‌داده‌شده به کشاورز برای مصرف پتاسیم تیمار i در دوره t، $C_{tk}^{\pm}$ ضرر کشاورز ناشی از مصرف پتاسیم تیمار i به ازای هر واحد آب وعده‌داده‌شده رهانشده در دوره t، D_{itk} کمبود آب برای تیمار i بر اساس سناریوی k در دوره t (به دیگر سخن، مقداری از $W^{\pm}{}_{it}$ که در هنگام q_{th} رها نمی‌شود)، q_{th} متغیر تصادفی عرضه آب در دوره t و سطح جریان h، $W_{imax}^{\pm}$ بیشترین مقدار تخصیص آب برای مصرف‌کننده i در زمان t، P_{tk} احتمال رخ دادن سناریوی k در دوره t است.

از آنجا که $W_{it}^{\pm}$ به‌عنوان یک پارامتر بازه‌ای در نظر گرفته می‌شود، رابطه (۴) به‌طور مستقیم قابل حل نیست و باید ساده‌سازی شود. برای حل این مسئله، پارامتر y_{it} به‌عنوان متغیر تصمیم تعریف می‌شود (Montazer, 2008):

(۵)

$$W_{it}^{\pm} = W_{it}^{-} + \Delta W_{it} y_{it}$$

$$\Delta W_{it} = W_{it}^{+} - W_{it}^{-}$$

$$y_{it} \in [0,1]$$

که در آن، y_{it} یک متغیر تصمیم برای تعریف بازه بهینه $W_{it}^{\pm}$ به‌کار می‌رود. وقتی که y_{it} به بالاترین حد خود برسد ($y_{it} = 1$)، اگر آب مورد نیاز بخش‌ها تأمین شود، سود به اوج می‌رسد. ولی اگر آب

وعده داده شـــده در این حالت رها نشـــود ضـــرر به بیش ترین درجه خواهد رســـید. اما هنگامی که $y_{it} = 0$ اگر آب مورد نیاز بخش‌ها تأمین شـــود، ســـود به کمترین حد می‌رســـد. ولی اگر آب وعده‌داده‌شـده در این حالت رها نشـود، کمترین ضـرر به‌دسـت می‌آید. با جایگزینی مدل رابطه (۴) در مدل رابطه (۵)، مدل زیر به‌دست می‌آید (Tajrishi and Abrishamchi, 2013):

(۶)

$$max f^{\pm} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{t=1}^{T} NB_{it}^{\pm}\,(W_{it}^{-} + \Delta W_{it}\, y_{it}) - \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{m}}\sum_{=1}^{\mathrm{n}}\sum_{\mathrm{k=1}}^{\mathrm{r}} \mathrm{P\,C_{tk}^{-}}\, D_{itk}{}^{-})$$

$$s.t\; q_{th}^{+} \geq \sum_{i=1}^{m} (\, W_{it}^{-} + \Delta W_{it} y_{itop} - D_{itk}{}^{-})$$

$$\forall\, h,k = 1,2 \ldots k\,, t = 1,2, \ldots T$$

$$\forall\, i,t,k W_{imax}^{+} \geq W_{it}^{-} + \Delta W_{it} y_{it} \geq D_{it}^{-} > 0$$

$$0 \leq y_{it} \leq 1$$

هنگامی که بازه $W_{it}^{\pm}$ به‌صـورت بهینه تعریف شـود, برای حل مدل رابطه (۶)، این مدل به دو زیرمدل تقسیم می‌شود و از حل دو زیرمدل بشترین و کمترین سود کل به‌دست می‌آید. در مدل رابطه (۷)، برای به‌دست آوردن بالاترین میزان سود کل (f^{+})، بالاترین سود کشاورز ($\mathrm{NB^{+}}$) و کمترین ضرر کشـاورز ($\mathrm{C^{-}}$) از مصـرف آب در نظر گرفته شـد. مدل رابطه (۱۰) به‌صـورت زیر نوشـته می‌شـود (Er-Rami et al., 2021):

(۷)

$$max f^{+} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{t=1}^{T} NB_{it}^{+}\,(W_{it}^{-} + \Delta W_{it}\, y_{it}) - \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{m}}\sum_{=1}^{\mathrm{n}}\sum_{\mathrm{k=1}}^{\mathrm{r}} \mathrm{P\,C_{tk}^{-}}\, D_{itk}{}^{-})$$

$$s.t\; q_{th}^{-} \geq \sum_{i=1}^{m} (\, W_{it}^{-} + \Delta W_{it} y_{itop} - D_{itk}{}^{-})$$

$$\forall\, h,k = 1,2 \ldots k\,, t = 1,2, \ldots T$$

$$\forall\, i,t,k W_{imax}^{\mp} \geq W_{it}^{-} + \Delta W_{it} y_{it} \geq D_{it}^{-} > 0$$

$$0 \leq y_{it} \leq 1 \qquad \forall\, i,t$$

$D_{itk}^{\pm}$ و y_{itop} و F_{opt}^{+} از حل مدل رابطه (۷) به‌دســـت می‌آید. در مدل رابطه (۸)، برای به‌دست آوردن پایین‌ترین سود (f^{-})، کمترین سود کشاورز (NB^{-}) و کمترین ضرر کشاورز (C^{+}) از مصرف آب در نظر گرفته شد. مدل رابطه (۸) به‌صورت زیر نوشته می‌شود (Bang et al., 2019):

(۸)

$$maxf^{+} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{t=1}^{T} NB_{it}^{+}\,(W_{it}^{-} + \Delta W_{it}\,y_{it}) - \sum_{i=1}^{m}\sum_{=1}^{n}\sum_{k=1}^{r} \mathrm{P\,C}_{tk}^{+}\,D_{itk}{}^{+})$$

$$s.t\; q_{th}^{-} \geq \sum_{i=1}^{m}(\,W_{it}^{-} + \Delta W_{it} y_{itop} - D_{itk}{}^{+})$$

$$\forall\, h,k = 1,2 \ldots k\,, t = 1,2, \ldots T$$

$$W_{imax}^{\mp} \geq W_{it}^{-} + \Delta W_{it} y_{it} \geq D_{it}^{+} > 0 \;\; \forall\, i,t,k$$

$$D_{itk}{}^{\pm} \geq D_{itkOP}{}^{-} \text{ و } t = 1,2, \ldots T$$

مقدار $D_{itk}{}^{\pm}$ و $F_{opt}{}^{-}$ از حل مدل رابطه (۷) به‌دســـت می‌آید. با اســـتفاده از جواب‌های مدل روابط (۷) و (۸)، روابط زیر به‌دست می‌آید (Glushkova et al., 2021):

$$F_{opt}{}^{\pm} = [F_{opt}{}^{-}, F_{opt}{}^{+}] \qquad (۹)$$
$$D_{itkOP}{}^{\pm} = [D_{itkOP}{}^{-}, D_{itkOP}{}^{+}]$$

در نتیجه، تخصیص بهینه آب برای دوره برنامه‌ریزی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (Ha et al., 2019):

$$A_{itkOP}{}^{\pm} = w_{itkOP}{}^{\pm} - D_{itkOP}{}^{\pm} \;\; \forall\, i,t,k \qquad (۱۰)$$

داده‌های مطالعه

پژوهش حاضـر به‌منظور برآورد مدل بهینه‌ســازی اثرات ســطوح آبیاری و پتاســیم بر عملکرد سورگوم علوفه‌ای اسپیدفید آزمایشی به‌مدت دو سال زراعی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی زهک اجرا

شد. ایستگاه تحقیقات کشاورزی زهک در بیست کیلومتری جنوب شهرستان زابل و شمال شهرستان زهک با عرض جغرافیایی ۳۰/۵۴ و طول جغرافیایی ۶۱/۴۱ و با ارتفاع ۴۸۳ متر از سطح دریا واقع شده است. اجرای این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار صورت گرفت. تیمارهای آبیاری در سه سطح مختلف, آبیاری پس از تخلیه چهل، شصت و هشتاد درصد آب قابل استفاده گیاه و تیمارهای کودی در سه سطح پتاسیم شامل مقادیر صفر، پنجاه و صد کیلوگرم در هکتار از منبع سولفات پتاسیم بود.

زمان آبیاری با توجه به تیمارهای لحاظ‌شده در طرح با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج TDR تعیین شد و میزان آبیاری با استفاده از پارامترهای فیزیک خاک و حداکثر عمق گسترش ریشه سورگوم با استفاده از رابطهٔ زیر تعیین و مقدار آب آبیاری از طریق کنتورحجمی تعبیه‌شده در خروجی تانکر سیار تهیه‌شده به همین منظور در هر کدام از تیمارها اعمال شد.

$$d = (FC - \theta i)\ \rho b \times D/100 \qquad (۱۱)$$

که در آن، d عمق آب آبیاری برای رسیدن رطوبت در عمق مورد نظر به حد ظرفیت زراعی (میلی‌متر)، Fc رطوبت وزنی در حد ظرفیت زراعی (درصد)، θi رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری (درصد)، ρb وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، D حداکثر عمق توسعه ریشه گیاه (میلی‌متر، معمولاً بین پنجاه تا شصت سانتی‌متر) است.

نتایج و بحث

از آنجا که «عرضه آب برای منطقه، در طول زمان» یک متغیر تصادفی است، با استفاده از روش شبیه‌سازی و کاربرد اعداد تصادفی برای سال‌های مختلف، صد بار عرضه آب به‌صورت تصادفی شبیه سازی شد. این اعداد با در نظر گرفتن یک بازه با استفاده از حداکثر و حداقل داده‌های گذشته و انحراف معیار آنها در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که صد بار انتخاب تصادفی میزان عرضه برای حالت جریان کم آب، از سال‌های خشک و برای دو حالت دیگر، به‌ترتیب، از سال‌های نرمال و تر انتخاب شد. بر این اساس، اطلاعات جدول یک به‌دست آمد. شایان یادآوری است که میزان تخصیص هدف آب برای سورگوم توسط نیاز ناخالص آبیاری محاسبه و حد بالا و پایین آن با در نظر گرفتن حد بالا و پایین راندمان آبیاری منطقه در نظر گرفته شد. جدول ۱ اطلاعات مربوط به عرضه آب و احتمال انواع سطوح تخلیه رطوبت را نشان می‌دهد.

جدول ۱- اطلاعات مربوط به عرضه آب و احتمال انواع سطوح تخلیه رطوبت (متر مکعب)

سطح جریان	احتمال مربوط (درصد)	سطوح مختلف آبیاری		
		دوره ۱ (t=۱)	دوره ۲ (t=۲)	دوره ۳ (t=۳)
کم	۱۴	(۱۶۴۳۰,۱۷۵۴۰)	(۱۲۵۲۰,۱۲۸۱۰)	(۷۳۲۰,۷۸۹۰)
متوسط	۴۷۰	(۱۹۶۸۴,۱۹۷۸۴)	(۱۴۷۵۰,۱۴۸۵۰)	(۸۷۱۰,۸۸۱۰)
زیاد	۳۹	(۱۹۱۵۰,۱۹۲۵۰)	(۱۴۳۷۰,۱۴۴۴۰)	(۸۴۳۰,۸۵۰۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از طرح تحقیقاتی، تخصیص آب مورد نیاز (متر مکعب) بین تیمارهای تنش و کود (کیلوگرم در هکتار) در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- اطلاعات مربوط به تخصیص آب مورد نیاز بین تیمارهای تنش و کود (متر مکعب)

تیمار کود (کیلوگرم در ساعت)/ آبیاری	سطوح مختلف آبیاری		
	دوره ۱ (t=۱)	دوره ۲ (t=۲)	دوره ۳ (t=۳)
۰	(۱۵۱۲۵,۱۷۰۰۰)	(۱۲۵۶۰,۱۲۷۵۰)	(۷۵۰۰,۱۰۶۲۰)
۵۰	(۱۶۱۴۰,۱۶۳۸۰)	(۱۲۵۰۰,۱۲۷۵۰)	(۸۶۰۰,۱۰۴۵۰)
۱۰۰	(۱۶۲۰۵,۱۶۲۸۰)	(۱۲۱۴۶,۱۲۷۱۸)	(۹۶۵۰,۱۰۷۶۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

فرم تابع درجه دوم چندجمله‌ای که برای تخمین تابع تولید با استفاده از روابط پیش‌گفته برآورد شده و نتایج در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- نتایج برآورد تابع تولید

متغیر	برآورد	آماره t	معنی‌داری
عرض از مبدأ	-۰/۰۰۱	-۲/۲۴	۰/۰۰۰
سطح زیر کشت (تیمار)	۱/۷۸	۱۲/۴۵	۰/۰۲۰۱۶
توان دوم سطح زیر کشت (تیمار)	۱/۷	۷/۲۹	۰/۰۳۷۳۸
کود شیمیایی	۵/۲۸	۴/۲۶	۰/۰۲۵۹۶
توان دوم کود شیمیایی	-۰/۷۵	-۳/۸۳	۰/۰۳۲۴۵
آب	۰/۱۸	۸/۹۱	۰/۰۴۶۱۲
توان دوم آب	۲/۴	۲/۴۵	۰/۰۲۳۱۴
		DW=۱/۸۷	R^2=۰/۹۱

مأخذ: یافته‌های پژوهش

با اسـتفاده فرم تابع درجه دوم چندجمله‌ای، تابع تولید سـورگوم در سـه سـطح مختلف آبیاری پس از تخلیه چهل، شصت و هشتاد درصد آب قابل استفاده گیاه برآورد شده، که نتایج آن در زیر آمده است:

تابع آب عملکرد سورگوم پس از تخلیه چهل درصد آب قابل استفاده:

$$Ya/Ym = -031 + 1.45W - 0.0007W^2$$
$$R^2 = 0.98 \qquad D.W = 1.8 \qquad F = 8$$

تابع آب عملکرد سورگوم پس از تخلیه شصت درصد آب قابل استفاده:

$$Ya/Ym = -.43 + 1.96W - 0.002W^2$$
$$R^2 = 0.98 \qquad D.W = 1.9 \qquad F = 6$$

تابع آب عملکرد سورگوم پس از تخلیه هشتاد درصد آب قابل استفاده:

$$Ya/Ym = -0.8 + 1.67W - .009W^2$$
$$R^2 = 0.98 \qquad D.W = 1.8 \qquad F = 4$$

از آنجا که محدودکننده‌ترین عامل کشـاورزی منطقه آب و کود اسـت، با تغییر این محدودیت، رابطه بین سود و ضرر مقدار آب و کود مصرفی برآورد شده، که این اطلاعات، به‌ترتیب، در جداول ۴ و ۵ آمده است.

جدول ۴- اطلاعات مربوط به سود تیمارهای کودی به ازای یک واحد تغییر مصرف آب

سود تیمار کود (کیلوگرم در ساعت)/ **آبیاری**	**سطوح مختلف آبیاری**		
	دوره ۱ (t=۱)	**دوره ۲ (t=۲)**	**دوره ۳ (t=۳)**
۰	(۲۳۶۲,۲۵۰۶)	(۳۰۳۷,۳۱۸۴)	(۱۰۸۰,۱۱۳۷)
۵۰	(۲۴۴۵,۲۶۵۴)	(۳۵۸۱,۳۷۲۴)	(۱۴۷۱,۱۶۴۰)
۱۰۰	(۲۷۸۱,۳۳۱۵)	(۳۷۵۷,۳۷۶۸)	(۱۸۵۴,۱۹۶۲)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

جدول ۵ اطلاعات مربوط به زیان تیمارهای کودی به ازای یک واحد تغییر مصـــرف آب را نشان می‌دهد.

جدول ۵- اطلاعات مربوط به زیان تیمارهای کودی به ازای یک واحد تغییر مصرف آب.

زیان تیمار کود (کیلوگرم در ساعت)/ **آبیاری**	**سطوح مختلف آبیاری**		
	دوره ۱ (t=۱)	**دوره ۲ (t=۲)**	**دوره ۳ (t=۳)**
۰	(۲۱۰,۲۳۱)	(۲۱۸,۲۲۵)	(۱۰۷,۱۱۶)
۵۰	(۲۱۴,۲۳۹)	(۲۲۳,۲۴۲)	(۱۰۹,۱۱۹)
۱۰۰	(۲۱۷,۲۴۵)	(۲۵۳,۲۷۸)	(۱۲۱,۱۴۶)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

همچنین، بر اساس اطلاعات جداول ۲, ۳, ۴ و ۵، تخصیص بهینه آب تحت سناریوهای نرمال و خشکسالی برای محصول سورگوم در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است.

جدول۶- نتایج مدل بر اساس سناریوی سال‌های نرمال

تیمار کود (کیلوگرم در ساعت)	**احتمال وقوع** (درصد)	**تخلیه رطوبتی** (درصد)	**آب مورد نیاز**	**سود**	**تخصیص بهینه آب**
۰	۳۹	۴۰	۱۲۸۵۰	(۸.۴۹,۹.۳۱)	(۱۲۷۳,۱۲۸۰۱)
۵۰	۳۹	۴۰	۱۲۷۵۰	(۹.۱۱,۹.۴۹)	(۱۲۷۳۶,۱۲۸۴۰)
۱۰۰	۳۹	۴۰	۱۲۸۱۶	(۷.۲۵,۹.۶۲)	(۱۲۷۳,۱۲۸۰۱)
۰	۳۹	۶۰	۱۲۸۵۰	(۱.۵۱,۴.۲۴)	(۱۰۵۰۰,۱۲۳۶۰)
۵۰	۳۹	۶۰	۱۲۷۵۰	(۱.۵۶,۴.۳۲)	(۱۰۷۰۰,۱۲۳۰۰)
۱۰۰	۳۹	۶۰	۱۲۸۱۶	(۱.۷۶,۴.۹۱)	(۱۰۴۶۸,۱۱۹۴۶)
۰	۳۹	۸۰	۱۲۸۵۰	(۱.۳,۱.۴۵)	(۹۴۵۰,۱۱۵۶۰)
۵۰	۳۹	۸۰	۱۲۷۵۰	(۱.۲۸,۱.۴۸)	(۱۰۵۵۰,۱۱۳۹۰)
۱۰۰	۳۹	۸۰	۱۲۸۱۶	(۱.۴,۱.۶۵)	(۱۱۶۰۰,۱۱۷۰۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج تخصیص بهینه آب در شرایط نرمال نشان داد که با به‌کارگیری پنجاه کیلوگرم کود پتاسیم در هکتار و با آبیاری پس از تخلیه چهار درصد آب قابل استفاده بیشترین ارزش مورد انتظار سود به‌دست می‌آید. این نتایج با نتایج پژوهش‌های موسوی‌فضل و همکاران (Mousavi Fazl et al., 2017) و محمد و آشوک (Mohamed and Ashok, 2014) مبنی بر آنکه کاربرد کود پتاسیم می‌تواند بخشی از تنش آبی وارده به گیاه را جبران کند، مطابقت دارد. همچنین، حل تابع هدف $f^{\pm}$ دو حد نهایی ارزش مورد انتظار سود خالص تیمارها بر اساس سناریوی نرمال مثبت است. چنانچه $W^{\pm} = W^{+}$ باشد، مدیر باید به‌صورت خوش‌بینانه عمل کند و حد بالای آب مورد نیاز را وعده دهد.

تخصیص بهینه آب تیمارهای آبیاری در سه سطح مختلف، آبیاری پس از تخلیه چهل، شصت و هشتاد درصد آب قابل استفاده گیاه و تیمارهای کودی در سه سطح پتاسیم شامل مقادیر صفر، پنجاه و صد کیلوگرم در هکتار از منبع سولفات پتاسیم بر اساس سناریوی خشکسالی در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷- حل مدل IMSLP بر اساس سناریوی خشکسالی

تیمار کود (کیلوگرم در هکتار)	احتمال وقوع (درصد)	تخلیه رطوبتی (درصد)	آب مورد نیاز	سود	تخصیص بهینه‌آب
۰	۱۴	۴۰	۱۳۳۹۰	(۴.۵۱,۴.۵۸)	(۱۲۲۵۵,۱۳۹۹۰)
۵۰	۱۴	۴۰	۱۳۳۸۰	(۴.۶۲,۴.۶۷)	(۱۳۲۷۰,۱۳۳۷۰)
۱۰۰	۱۴	۴۰	۱۳۳۴۰	(۴.۵۲,۴.۷۱)	(۱۳۳۳۵,۱۳۲۷۰)
۰	۱۴	۶۰	۱۳۳۹۰	(۳.۵۲,۳.۵۵)	(۱۰۶۷۰,۱۰۸۸۰)
۵۰	۱۴	۶۰	۱۳۳۸۰	(۱.۵۶,۳.۵۳)	(۱۰۶۱۰,۱۱۰۸۰)
۱۰۰	۱۴	۶۰	۱۳۳۴۰	(۴.۰۷,۴.۱۱)	(۱۰۲۵۶,۱۰۸۴۸)
۰	۱۴	۸۰	۱۳۳۹۰	(۱.۸۸,۳.۴۸)	(۹۷۶۰,۱۱۸۴۰)
۵۰	۱۴	۸۰	۱۳۳۸۰	(۱.۹۲,۳.۵۵)	(۱۰۸۶۰,۱۱۶۷۰)
۱۰۰	۱۴	۸۰	۱۳۳۴۰	(۲.۱۴,۳.۹۵)	(۱۱۹۱۰,۱۱۹۸۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج تخصیص بهینه آب در شرایط خشکسالی نشان داد که با به‌کارگیری پنجاه کیلوگرم کود پتاسیم در هکتار و آبیاری پس از تخلیه چهل درصد آب قابل استفاده، بیشترین ارزش مورد انتظار سود به‌دست می‌آید. اگرچه حداکثر عملکرد محصول در نتیجهٔ آبیاری کامل به‌دست می‌آید، اما همیشه عملکرد حداکثر «عملکرد اقتصادی» نخواهد بود. آدزمی و ابراهیم (Adzemi and Ibrahim, 2015) به بررسی اثر کم‌آبیاری تنظیم‌شده بر رشد گیاه و غلظت عناصر غذایی در برگ و عملکرد سورگوم در یک آزمایش گلخانه‌ای در دانشگاه ترنگانو مالزی پرداختند. در این پژوهش، سطوح آبیاری شامل چهار سطح ۲۵, ۵۰, ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی بود و نتایج نشان داد که گیاه سورگوم می‌تواند در شرایط کم‌آبیاری تنظیم‌شده به‌خوبی رشد کند. پارامترهای رشدی گیاه و کارآیی مصرف آب در سطوح آبیاری ۷۵ و ۱۰۰ درصد بهتر از سطوح ۲۵ و ۵۰ درصد ارزیابی شدند که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. تحقیقات نشان داده است که اگر برای محصولات کشاورزی زمان اعمال کم‌آبیاری و مقدار آن به‌درستی انتخاب شود، ضمن افزایش کارآیی مصرف آب، عملکرد نیز افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

به‌طورکلی، از آنجا که آب در مناطق خشک به‌ویژه منطقه سیستان از اهمیت فراوان برخوردار است و صرفه‌جویی در مصرف آب و از همه مهم‌تر، بهره‌وری در مصرف آب از اولویت‌های اساسی به‌شمار می‌رود، هرگونه پژوهشی که منجر به افزایش بهره‌وری و صرفه‌جویی در استفاده از این نهاده ارزشمند شود، کمک شایانی به منطقه می‌کند.

نتایج نشان داد که از بین تیمارهای آبیاری در سه سطح مختلف, آبیاری پس از تخلیه چهل، شصت و هشتاد درصد آب قابل استفاده گیاه و تیمارهای کودی در سه سطح پتاسیم شامل مقادیر صفر، پنجاه و صد کیلوگرم در هکتار از منبع سولفات پتاسیم بیشترین ارزش سود مورد انتظار تیماری آبیاری پس از تخلیه چهل درصد آب قابل استفاده گیاه و تیمار کودی در سطح پنجاه کیلوگرم در هکتار در دو شرایط نرمال و خشکسالی است. افزون بر این، نتایج نشان داد که بین مصرف صد کیلوگرم کود و پنجاه کیلوگرم کود پتاسیم در هر هکتار، تفاوت معنی‌دار عملکردی در شرایط نرمال و خشکسالی وجود ندارد؛ همچنین، کاهش مصرف کودهای شیمیایی، علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید کشاورز، اثراتی چشمگیر در سلامت جامعه و محیط زیست دارد که تأثیر نتایج پژوهش حاضر نیز در این زمینه بسیار مثبت خواهد بود. بر اساس نتایج پژوهش حاضر، مقادیر عملکرد و اجزای عملکرد بین مصرف صد کیلوگرم کود و پنجاه کیلوگرم در هر هکتار کود پتاسیم، علی‌رغم کاهش چهل درصدی آب مصرفی، تفاوت معنی‌دار وجود ندارد. این موضوع نشان می‌دهد که کاربرد کود پتاسیم می‌تواند تا حدودی کاهش آب مصرفی را جبران کند؛ اما در صورتی که تنش‌های آبی شدیدتر شوند، تأثیر کود پتاسیم در جبران کاهش عملکرد کمتر خواهد شد.

بنابراین، پیشنهاد می‌شود که از نتایج پژوهش حاضر در برنامه‌ریزی و مدیریت مصرف آب و کود پتاسیم استفاده شود. همچنین، در تحلیل اقتصادی نتایج پژوهش حاضر، امکان جایگزینی بخشی از آب آبیاری با کود پتاسیم تأیید شد. بنابراین، مصرف کود پتاسیم در سطوح مصرف به ازای هر هکتار بر اساس شرایط آب و خاک منطقه و همچنین، افزایش راندمان آبیاری و در صورت امکان، استفاده از سازه‌های آبیاری نوین توصیه می‌شود.

منابع

- Adzemi, A., & Ibrahim, W. (2015). Effect of regulated deficit irrigation on nutrient concentration in leaves, growth and yield of Sorghum. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare, 5*(4): 48-56.

- Alizadeh, H., & Abbasi, F. (2016). Optimization of water and fertilizer consumption in grain corn irrigation fertilizer. *Journal of Water Research in Agriculture, 30*(4): 445-455. [In Persian]
- Asadi, H., Baghani, M., & Rafati, M. (2022). Physical and economic productivity of irrigation water consumption and profitability of production of some crops in different irrigation systems in Alborz province of Iran. *Agricultural Economics and Development, 30*(4), 53-72. DOI: 10.30490/aead.2022.354870.1344. [In Persian]
- Azarmesa, M., Fayaz, M., & Tishni, M. (2018). Managing the source and water consumption of Sefid Roud irrigation and drainage network. Proceedings of the 10th Iran Irrigation and Drainage Conference. Available at http://civilica.come/doc/10049Tehran124. [In Persian]
- Bagherzadeh, A., Abbaszadeh, M., & Afshar, E. (2022). Evaluation of the distribution of highly consumed food elements, in order to optimize the use of fertilizer in wheat. *Sustainable Agricultural Science Research, 2*(4). Available at https://sid.ir/paper/1039431/fa. [In Persian]
- Bang, N. K., Nam, W. H., An, H. U., Ha, T. H., & Lee, K. Y. (2019). Optimal operation of irrigation canal network in Anseong, South Korea. 3rd World Irrigation Forum (WIF3), 1-7 September 2019, Bali, Indonesia.
- Divakar, L., Babel, M. S., Perret, S., & Das, G. A. (2013). Optimal water allocation model based on satisfaction and economic benefits. *International Journal of Water, 7*(4), 363-381.
- Er-Rami, M., D'Urso, G., Lamaddalena, N., D'Agostino, D., & Belfiore, O. R. (2021). Analysis of irrigation system performance based on an integrated approach with Sentinel-2 satellite images. *Journal of Agricultural Engineering, 52*(2). DOI: 10.4081/jae.2021.1170.
- Ghaderi, M. (2009). Measurment of water economic value in Ardakan. MSc. Dissertation. Isfahan university. [In Persian]
- Ghaffari Moghaddam, Z., Sardar Shahraki, A., & Mirshekari, S. (2022). Optimizing crop program and water allocation using Stackelberg and meta-

heuristic techniques in Sistan region. Available at https://civilica.com/doc/1685463. [In Persian]

- Glushkova, T., Stoyanov, S., Doukovska, L., Todorov, J., & Stoyanov, I. (2021). Modeling of an irrigation system in a virtual physical space. *Mathematical Biosciences and Engineering*, *18*(5), 6841-6856. DOI: 10.3934/mbe.2021340.
- Ha, T. H., Nam, W. H., Do, J., Lee, S. Y., Jung, E. Y., & Lee, K. Y. (2019). Improving operational performance of irrigation canal network system for drought risk management using hydraulic model. ASABE Annual International Meeting. DOI: 10.13031/aim.201900983.
- Jahandideh, O., & Emami, S. (2022). Presenting a model for water allocation of irrigation and drainage networks using intelligent evolutionary methods. *Water Management in Agriculture*, *9*(1), 31-44. [In Persian]
- Mohamed, M. H., & Ashok, K. A. (2014). Growth, yield and water use efficiency of forage sorghum as affected by NPK fertilizer and deficit irrigation. *American Journal of Plant Sciences*, *5*(13), 2134-2140.
- Mohammadghasemi, M., Karim, M. H., Dahmardeh, M., & Ghasemi, A. (2021). The prospect of investment in medicinal plants at Sistan Region 1. *Journal of Medicinal Plants and By-products*, *10*(2), 1-6. DOI: 10.22092/jmpb.2021.342441.1195.
- Monem, M., Hashemy Shahdany, S., & Eslambolchizadeh, H. (2017). The role of managing the operation of in-route reservoirs in improving the operation of Moghan irrigation network. *Water Research in Agriculture (Soil and Water Sciences)*, *31*(4), 535-545. [In Persian]
- Montazer, A. H. R., Mousavi Fazl, S. H., Akhyani, A., & Atarodi, A. (2018). Effect of irrigation water and potassium fertilizer on the forage yield of sorghum with the aim to determine the yield function-water-fertilizer (Pegah variety). *Journal of Applied Irrigation Science*, *40*(1): 84-97. [In Persian]

- Mousavi Fazl, S. H., Akhyani, A., & Atarodi, A. (2017). Effect of irrigation water and potassium fertilizer on the forage yield of sorghum with the aim to determine the yield function-water-fertilizer (Pegah variety). *Irrigation Sciences and Engineering, 40*(1): 83-97. [In Persian]
- Parhizkari, A., Mozaffari, M., Khaki, M., & Taghizadeh Ranjbari, H. (2015). Optimal allocation of water and lands resources in the Roudbar Alamout region using the FGFP model. *Journal of Water and Soil Resources Conservation, 4*(4), 12-24. [In Persian]
- Rao, K. V. R., Bapal, A., Gngwar, S., Chourasla, L., & Soni, K. (2016). Maximizing water production of wheat crop by adopting drip irrigation. *Research on crop, 17*(1):163-168.
- Rastgaripour, F., & Sabouhi Sabouni, M. (2010). An optimization model for Kardeh reservoir operation using interval parameter, multi-stage, stochastic programming. *Water and Wastewater, 21*(75), 88-98. [In Persian]
- Sardar Shahraki, A., & Karim, M. H. (2020). The economic efficiency trend of date orchards in Saravan County. *Iranian Economic Review, 22*(4), 1093-1112. [In Persian]
- Tajrishi, M., & Abrishamchi, A. (2013). Management of demand for water resources in Iran. Proceedings of the Conference on Methods of Preventing the Loss of Natural Resources. Available at https://sid.ir/paper/810813/fa. [In Persian]
- Varjavand, P., Baghani, J., & Abbasi, F. (2021). Field evaluation of physical and economical water productivity of wheat (case study in Ahwaz and Dasht-e-Azadegan). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 15*(3), 665-678. [In Petsian]