

Original Article

Comparison of Wind Drift and Evaporation Losses and Performance Evaluation Indices in Three Sprinkler Irrigation Systems with Emphasis on Water Resource Sustainability (Case Study: Poldasht County)

Amir Nourjou¹, Mojtaba Rezaei², Morteza Kamali³

1-Assistant Professor, West Azerbaijan Province Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran.

2-Assistant Professor, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran.

3-PhD student, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran.

Received: September 11, 2025

Accepted: November 30, 2025

Revised: November 22, 2025

Published online: December 22, 2025

*Corresponding Author's Email: nourjou@yahoo.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Water resource sustainability,
Application efficiency,
DU,
CU,
Boom spray,
Gun sprinkler

Introduction

Water is the most critical and limiting input for agricultural production in Iran, where severe water scarcity poses substantial threats to food security and sustainable agriculture. Factors such as population growth, prolonged droughts, and the over-extraction of water resources have intensified the water crises across the country, leading to adverse social and economic consequences. Given that over 90% of the country's renewable water resources are consumed in the agriculture sector, optimizing irrigation efficiency through the adoption of modern irrigation technologies has become an urgent necessity. Efficient water management not only conserves scarce resources but also enhances crop yield and mitigates environmental impacts. In this context, the present study was designed to comprehensively evaluate the performance of three sprinkler irrigation systems, namely the conventional gun sprinklers, the spray boom, and a farmer-modified water distribution system, under field conditions along the Aras River in Poldasht, West Azerbaijan, Iran. The objective was to provide a detailed comparison of these systems in terms of water distribution uniformity, Christiansen's uniformity coefficient (CU), application efficiency (Ea), and losses due to evaporation and wind drift. By systematically assessing these performance indicators, the research aimed to identify the most effective and sustainable irrigation method for semi-arid agricultural regions, where water scarcity and environmental challenges render efficient irrigation practices critical for crop productivity and long-term resource management. Furthermore, the study explored the potential of low-cost, site-specific modifications implemented in the farmer-designed systems to improve water use efficiency and reduce operational losses. The findings are intended to offer practical insights for optimizing irrigation strategies in similar agro-climatic zones.

Materials and Methods

The study was conducted on 59 hectares of privately owned farmland characterized by sandy loam soil, located in a semi-arid cold climate in Poldasht, West Azerbaijan, Iran. The site is situated along the Aras River at an elevation of 874 meters above sea level. Field experiments were carried out during July, August,

How to cite:

Nourjou, A., Rezaei, M., Kamali, M. Comparison of Wind Drift and Evaporation Losses and Performance Evaluation Indices in Three Sprinkler Irrigation Systems with Emphasis on Water Resource Sustainability (Case Study: Poldasht County). *Journal of Hydraulics and Water Science*, 35 (5):15-26.

<https://doi.org/10.22034/hws.2025.67753.1036>



This is an open-access article under the CC BY-NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)



and September 2018 to evaluate the performance of three sprinkler irrigation systems. The assessment focused on key performance indicators including distribution uniformity (DU), Christiansen's uniformity coefficient (CU), application efficiency (Ea), and losses due to evaporation and wind drift. To quantify water distribution, catch cans were strategically placed in multiple rows across the irrigation strips, and the overlapping effects of adjacent irrigation lines were incorporated into the calculations to accurately determine the actual water depth received at each location. Soil physical and chemical properties, including texture, bulk density, infiltration rate, pH, and electrical conductivity, were analyzed to understand their influence on water movement and retention. Water quality parameters were also measured to ensure suitability for irrigation. Additionally, the farmer-designed system was adjusted and optimized under field conditions. Modifications included alterations to lateral pipes and nozzle configurations aimed at improving water application uniformity and reducing operational losses.

Results and Discussion

The results of the field evaluation revealed significant differences in performance among the three sprinkler irrigation systems. The spray boom system demonstrated the highest efficiency and uniformity, with average Christiansen's uniformity coefficient (CU), distribution uniformity (DU), and application efficiency (Ea) of 94.7%, 91.1%, and 85.8%, respectively, indicating excellent irrigation performance. In contrast, the gun sprinkler system exhibited the lowest performance, with CU = 68.7%, DU = 64.9%, and Ea = 67.6%, and recorded the highest evaporation and wind drift losses, averaging 22.7%. These performance variations were largely attributed to factors such as spray height, droplet size, and wind conditions, which significantly influenced water distribution and losses under field conditions. The farmer-modified water distribution system, which incorporated on-farm modifications including direct water application via lateral pipes and the removal of standard nozzles, achieved an acceptable performance level with CU = 89.9%, DU = 85.7%, and Ea = 94.2%. Evaporation and wind losses were negligible in this system due to the reduced exposure of water droplets to the atmosphere. The data further indicated that overlapping of irrigation lines played a critical role in achieving more uniform water distribution, particularly for the spray boom and gun sprinkler systems. Overall, the findings underscore the importance of system design, operational adjustments, and site-specific adaptations in achieving high irrigation efficiency and minimizing water losses.

Conclusion

The study demonstrated that the type of sprinkler irrigation system, along with its design and operational practices, has a decisive influence on water distribution uniformity, application efficiency, and losses due to evaporation and wind drift. Among the three systems evaluated, the spray boom system exhibited superior performance, achieving excellent uniformity and efficiency, whereas the gun sprinkler system showed the poorest results, primarily due to higher droplet height and susceptibility to wind. The farmer-designed water distribution system, despite being developed empirically, performed effectively, underscoring the potential of low-cost, site-specific modifications to enhance irrigation efficiency. These findings indicate that adopting spray boom systems or modified on-farm water distribution methods can substantially improve irrigation efficiency, reduce water losses, and promote sustainable water management in semi-arid and windy regions. Moreover, periodic evaluation of system performance and installation of proper filtration to prevent nozzle clogging are essential for maintaining long-term efficiency and reliability. Overall, this study offers practical insights for optimizing sprinkler irrigation practices and encourages the adoption of cost-effective, farmer-adapted solutions in water-scarce regions.

Keywords: Water resource sustainability, application efficiency, DU, CU, boom spray, gun sprinkler



مقایسه تلفات تبخیر و بادبردگی و شاخص‌های ارزیابی عملکرد در سه سامانه آبیاری بارانی با تأکید بر پایداری منابع آب (مطالعه موردی: شهرستان پلدشت)

امیر نورجو^{۱*}، مجتبی رضایی^۲، مرتضی کمالی^۳

۱- استادیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران.

۲- استادیار، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران.

۳- دانشجوی دکتری، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

چکیده

با توجه به افزایش تقاضا برای منابع آب و سهم حدود ۷۰ درصدی بخش کشاورزی از مصرف آب کشور، استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری به‌منظور کاهش تلفات و ارتقای راندمان، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. هدف این پژوهش، مقایسه تلفات تبخیر و بادبردگی و ارزیابی عملکرد سه سامانه آبیاری بارانی شامل آبیاش تفنگی، بوم اسپری و سامانه بومی‌سازی‌شده توسط بهره‌بردار در اراضی تحت پوشش رودخانه مرزی ارس در شهرستان پلدشت (استان آذربایجان غربی) است. داده‌های موردنیاز از اندازه‌گیری‌های میدانی طی سه نوبت در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور سال ۱۳۹۷ و در سطح ۵۹ هکتار جمع‌آوری شد. شاخص‌های یکنواختی توزیع آب (DU)، ضریب یکنواختی کریستیانسن (CU) و راندمان کاربرد آبیاری (Ea) برای هر سامانه محاسبه و تلفات تبخیر و بادبردگی تعیین گردید. نتایج نشان داد سالم‌نه بوم اسپری با مقادیر میانگین $CU=94.7$ ، $DU=91.1$ و $Ea=85.8$ درصد، عملکردی مطلوب و یکنواختی بسیار مناسبی در توزیع آب دارد. سامانه آبیاش تفنگی با مقادیر $CU=68.7$ ، $DU=64.9$ و $Ea=67.6$ درصد، کمترین راندمان و بیشترین تلفات تبخیر و بادبردگی (میانگین ۲۲/۷ درصد) را نشان داد. در مقابل، سامانه بومی‌سازی‌شده با مقادیر $CU=89.9$ ، $DU=85.7$ و $Ea=94.2$ درصد و تلفات ناچیز تبخیر و بادبردگی، از راندمان بالایی برخوردار بود. یافته‌ها بیانگر آن است که استفاده از سامانه‌های بوم اسپری یا سامانه‌های اصلاح‌شده با پخش مستقیم آب بر سطح خاک، ضمن کاهش محسوس تلفات تبخیر و بادبردگی، موجب افزایش راندمان آبیاری در مناطق بادخیز می‌شود. توسعه این سامانه‌ها می‌تواند گامی مؤثر در جهت بهره‌برداری پایدار از منابع آب و کاهش هزینه‌های انرژی و نیروی کار باشد.

کلمات کلیدی: پایداری منابع آب، راندمان کاربرد، یکنواختی توزیع، ضریب یکنواختی، بوم اسپری، آبیاش تفنگی

۱- مقدمه

بخش وسیعی از مزارع مشاهده شده است. Zamanisepahvand et al. (2023) با بررسی تلفات تبخیر و بادبردگی در سامانه‌های آبیاری بارانی تحت مدیریت‌های مختلف بهره‌برداری گزارش کردند که تلفات تبخیر و بادبردگی در مزرعه چغندرقد حدود ۰/۹۵ درصد بیشتر از مزرعه پیاز بوده است؛ موضوعی که موجب کاهش ضریب یکنواختی (۵/۰۶ درصد) و راندمان کل (۵ درصد) در مزرعه چغندرقد نسبت به مزرعه پیاز شد. همچنین افزایش ارتفاع آبپاش موجب افزایش حدود ۱/۵۶ درصدی تلفات تبخیر و بادبردگی گردید. Salemi et al. (2020) کارایی و عملکرد سیستم‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت و آبفشان غلطان را در مزارع سیب‌زمینی استان‌های همدان و اصفهان ارزیابی کردند و گزارش دادند که در اغلب مزارع، کم‌آبیاری رخ داده و به دلیل استفاده هم‌زمان از تعداد زیاد آبپاش و نصب بیش از یک آبپاش روی لوله فرعی، ضریب یکنواختی و یکنواختی توزیع آب پایین بوده است. Seyedzadeh et al. (2022) نیز سه سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت را در دشت کنگاور ارزیابی کردند و مقادیر یکنواختی توزیع ۵۵/۸ درصد، راندمان بالقوه بخش پایین ۳۷/۲ درصد، راندمان کاربرد واقعی ۴۱/۵ درصد، نسبت نفوذ عمیق ۳۸/۶ درصد، کفایت آبیاری درصد و راندمان استفاده از آب ۹۶/۵ درصد را گزارش نمودند. نتایج نشان داد عملکرد این سامانه‌ها کمتر از حداقل مقادیر توصیه‌شده بوده و مدیریت بهره‌برداری نقش مهمی در بهبود کارایی دارد. Ngasoh et al. (2018) سامانه آبیاری چای کاکارا در نیجریه را از نظر راندمان، یکنواختی و بهره‌وری آبیاری ارزیابی کردند. نتایج نشان داد این سامانه با یکنواختی ۹۰/۹ درصد و راندمان آبیاری ۷۹ درصد قادر به آبیاری روزانه ۴۱/۱ هکتار با چرخه ۹ روزه و عملکرد ۲۶۱۳/۷ کیلوگرم در هکتار بوده است؛ موضوعی که روند بهبود عملکرد سامانه را طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ نشان می‌دهد. همچنین مقایسه دو سامانه پاششی بوم اسپری و تفنگی در سرعت‌های مختلف دستگاه قرقره (۱۰، ۳۰ و ۴۰ متر بر ساعت) توسط Silva et al. (2017) نشان داد که میانگین ضریب یکنواختی در سامانه تفنگی با افزایش سرعت کاهش یافته و به ترتیب ۵۱، ۴۶ و ۳۶ درصد بوده است. در مقابل، ضریب یکنواختی در سامانه بوم اسپری بیشتر از آبپاش تفنگی بوده و در سرعت‌های مذکور به ترتیب ۶۴، ۶۴ و ۶۹ درصد گزارش شد و تحت تأثیر سرعت دستگاه قرار نگرفت.

با توجه به بررسی مطالعات پیشین، تاکنون مقایسه هم‌زمان سه سامانه بارانی شامل سامانه بومی‌سازی‌شده توسط بهره‌بردار در شرایط بادخیز شمال غرب کشور تاکنون انجام نشده است بنابراین. با توجه به اهمیت ارزیابی سامانه‌های آبیاری، در این پژوهش عملکرد سه سامانه پاشنده شامل بوم اسپری، آبپاش تفنگی و سامانه پخش آب طراحی‌شده توسط بهره‌بردار در بخشی از اراضی تحت پوشش رودخانه مرزی ارس در شهرستان پلدشت استان آذربایجان غربی مورد ارزیابی قرار گرفت.

آب به‌عنوان حیاتی‌ترین و محدودکننده‌ترین نهاده در تولید محصولات کشاورزی در ایران، نقش مهمی در امنیت غذایی، اشتغال‌زایی و پایداری اقتصادی دارد (Salamati et al., 2023; Keramatzadeh et al., 2020). افزایش جمعیت، وقوع خشکسالی‌های متعدد و طولانی‌مدت و برداشت بی‌رویه از منابع آب، موجب بروز بحران‌های شدید آبی در بسیاری از مناطق جهان و از جمله ایران شده است (Bellvert et al., 2025; Rouzaneh et al., 2021). این بحران می‌تواند پیامدهایی همچون فقر، گرسنگی، بیکاری، مهاجرت‌های گسترده، کاهش تولیدات کشاورزی و تهدید امنیت ملی را به‌دنبال داشته باشد (Gholami Sefidkouhi et al., 2024). با توجه به مصرف بیش از ۷۰ درصد منابع آب تجدیدپذیر کشور در بخش کشاورزی (Naseri et al., 2017). استفاده از فناوری‌های نوین آبیاری با هدف افزایش راندمان و بهره‌وری آب، ضرورتی اجتنابناپذیر است (Peng et al., 2023; Ahmadaali et al., 2017; Ashiri et al., 2016). سامانه‌های آبیاری تحت فشار از مؤثرترین روش‌ها برای مقابله با بحران آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌روند (Mohammadi et al., 2025). توزیع یکنواخت آب، افزایش عملکرد محصول، کاهش تبخیر از سطح خاک و کاهش نفوذ عمقی، و نیز محدود شدن رشد علف‌های هرز، از جمله مزایای این سامانه‌ها نسبت به روش‌های سنتی آبیاری مطرح شده است (Karlberg & Vries, 2004). آمارها نشان می‌دهد که سطح اراضی تجهیز شده به این سامانه‌ها در ایران طی سال‌های اخیر به حدود ۲/۹ میلیون هکتار رسیده است (Heydari & Nakhjavani Moghadam, 2024). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بهره‌برداری نامناسب و غیراصولی از سامانه‌های آبیاری تحت فشار، حتی در صورت طراحی و اجرای صحیح، می‌تواند موجب افزایش تلفات و کاهش راندمان آبیاری شود (Bakhtiari et al., 2020). از این‌رو، ارزیابی مداوم این سامانه‌ها برای بهبود وضعیت بهره‌برداری و جلوگیری از افت عملکرد ضروری است. ارزیابی دقیق و مستمر سامانه‌های آبیاری تحت فشار می‌تواند در شناسایی مسیر اصلاحات احتمالی، جلوگیری از هدررفت آب و کاهش هزینه‌های اضافی نقش مؤثری ایفا کند (Nazari et al., 2024). بر اساس ارزیابی شاخص‌های مصرف آب و کارایی آبیاری، بهینه‌سازی عملیات آبیاری در مزرعه منجر به افزایش راندمان آبیاری، ارتقای بهره‌وری مصرف آب و بهبود مدیریت منابع می‌شود (Karimi & Jolaini, 2016).

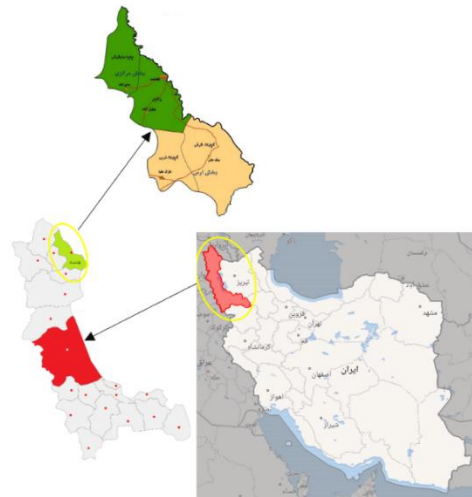
Ahmadzadeh Kaleybar & Mohammadi et al. (2024) Emamifar (2023) عملکرد سیستم‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک را در دشت ارسباران واقع در شمال شرق استان آذربایجان شرقی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مقادیر شاخص‌های ارزیابی کمتر از حد توصیه‌شده بوده و نفوذ عمقی بالا و کم‌آبیاری در

۲- مواد و روش ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در سطح ۵۹ هکتار از اراضی متعلق به بخش خصوصی در شمال استان آذربایجان غربی و در محدوده شهرستان پلدشت، واقع در مختصات جغرافیایی ۳۹ درجه و ۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه ۱۱ دقیقه طول شرقی و در ارتفاع ۸۷۴ متر از سطح دریا انجام شد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلی خشک و سرد بوده و اراضی آن تحت

پوشش شبکه آبیاری رودخانه مرزی ارس قرار دارد (شکل ۱). اطلاعات اقلیمی سال ۱۳۹۷ منطقه در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس این داده‌ها، ماه مرداد با میانگین دمای ۳۱ درجه سانتی‌گراد گرم‌ترین و ماه بهمن با میانگین دمای ۲/۹ درجه سانتی‌گراد سردترین ماه سال بوده است. میانگین رطوبت نسبی سالانه ۶۴/۳ درصد، مجموع بارندگی سالانه ۲۹۳/۷ میلی‌متر و مجموع ساعات آفتابی سالانه ۲۲۷۶ ساعت ثبت شده است. همچنین بیشترین سرعت باد در سال ۱۳۹۷ مربوط به ماه شهریور و برابر با ۱۷ کیلومتر بر ساعت گزارش شده است.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه.

Fig. 1- Study area.

جدول ۱- آمار هواشناسی ایستگاه پلدشت در سال ۱۳۹۷.

Table 1- Meteorological statistics of Poldasht station in 2018.

ماه	میانگین دما (°C)	میانگین رطوبت نسبی (%)	مجموع ساعات آفتابی	حداکثر سرعت باد (km/hr)	بارندگی (mm)
فروردین	۱۰/۴	۷۶	۱۴۵	۱۰	۳۹/۸
اردیبهشت	۱۹/۶	۶۵	۲۵۳	۱۱	۱/۴
خرداد	۲۶/۶	۵۲/۵	۲۸۱	۱۰	۴/۴
تیر	۲۹/۲	۴۰	۳۵۱	۱۲	۲/۲
مرداد	۳۱/۰	۴۸/۵	۳۳۳	۹	۱۱/۸
شهریور	۲۳/۰	۵۰/۵	۲۷۱	۱۷	۵۴
مهر	۱۸/۰	۵۶	۲۲۷	۱۱	۳۶/۹
آبان	۱۴/۹	۵۶	۲۴۶	۱۶	۲۵/۷
آذر	۶/۴	۷۱/۵	۱۷۰/۱	۹	۲۱/۱
دی	۳/۸	۸۶	۱۵۱/۵	۱۲	۳۵/۱
بهمن	۲/۹	۷۸/۵	۱۱۶	۱۳	۹/۳
اسفند	۶/۳	۹۱	۵۳	۱۱	۵۲

می‌گیرد. درصد بالای شن در این خاک موجب افزایش نفوذپذیری شده و بنابراین لازم است دور آبیاری کوتاه‌تر و عمق آب آبیاری کمتر در نظر گرفته شود تا از تلفات نفوذ عمقی جلوگیری گردد. مقدار pH خاک بین ۶ تا ۷ بوده و از نظر جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه محدودیتی مشاهده نمی‌شود. هدایت الکتریکی خاک حدود ۲ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری شده که نشان‌دهنده شوری کم و شرایط نسبتاً مناسب برای

۲-۲- مشخصات آب، خاک و سامانه‌های آبیاری

ارزیابی شده

مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین کیفیت آب آبیاری به‌ترتیب در جداول ۲ تا ۴ ارائه شده‌اند. بافت خاک تا عمق یک متر یکنواخت و از نوع لوم شنی است که در گروه خاک‌های سبک قرار

ارزیابی سامانه های آبیاری در سه روز مختلف از ماه های تیر، مرداد و شهریور سال ۱۳۹۷ انجام شد. شرایط آب و هوایی این سه روز در جدول ۵ ارائه شده است. در میان این سه نوبت، تکرار دوم آزمایش در تاریخ ۱۷ مرداد ۱۳۹۷ با حداکثر سرعت باد ۶ کیلومتر بر ساعت، بیشترین سرعت باد را به خود اختصاص داده است.

رشد گیاه است. همچنین میانگین کربن آلی در سه لایه خاک برابر با ۰/۷۴ درصد بوده که بیانگر مرغوبیت متوسط خاک منطقه است. بر اساس جدول ۴، مقدار SAR آب آبیاری برابر ۷/۴ و میزان EC آن حدود ۱/۱ دسی زیمنس بر متر است. مطابق نمودار ویلکاکس، آب مورد استفاده در کلاس C3S1 قرار می گیرد که برای آبیاری اغلب محصولات زراعی مناسب است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی خاک محل آزمایش.

Table 2- Physical characteristics of the soil at the test site.

عمق خاک	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری (gr/cm ³)	رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی (%)	رطوبت در نقطه پژمردگی (%)	سرعت نفوذپذیری (cm/min)
۰-۳۰	لوم شنی	۱/۵	۱۵	۷	۰/۱۱
۳۰-۶۰	لوم شنی	۱/۶	۱۶	۷	۰/۱۱
۶۰-۹۰	لوم شنی	۱/۶	۱۶	۸	۰/۱۱

جدول ۳- مشخصات شیمیایی خاک محل آزمایش.

Table 3- Chemical characteristics of the soil at the test site.

عمق خاک (cm)	هدایت الکتریکی (ds/m)	pH	کربن آلی (%)	پتاسیم قابل جذب (ppm)	فسفر قابل جذب (ppm)	مواد خنثی شونده (%)
۰-۳۰	۲/۱۳	۶/۶۹	۰/۶۳	۶۳۰	۷/۱	۱۷/۸
۳۰-۶۰	۲/۲۸	۶/۳۸	۰/۷۵	۵۳۰	۶/۸	۱۸/۲
۶۰-۹۰	۲/۳۴	۶/۵۹	۰/۸۳	۵۷۰	۸/۱	۱۷/۹

جدول ۴- کیفیت آب آبیاری مورد استفاده در طرح.

Table 4- Quality of irrigation water used in the project.

pH	SAR	EC (ds/m)	C03 ²⁻	Hco ³⁻	Cl ⁻	So4 ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	NA ⁺
			meq/l							
۷/۴	۷/۲	۱/۱	۱/۹	۵/۴	۴/۲	--	۵/۸	۳/۷	۰/۱	۱۵/۷۳

جدول ۵- شرایط آب و هوایی در تاریخ های ارزیابی سامانه های آبیاری.

Table 5- Weather conditions on the dates of irrigation system evaluation.

تکرار	تاریخ آزمایش	دمای هوا (°C)	رطوبت هوا (%)	جهت باد (درجه)	حداکثر سرعت باد (km/hr)
اول	۱۳۹۷/۴/۰۷	۳۰	۲۲	۳۶۰	۲
دوم	۱۳۹۷/۰۵/۱۷	۲۸/۸	۵۶	۱۶۰	۶
سوم	۱۳۹۷/۰۶/۲۲	۲۵/۷	۵۳	۳۴۰	۵

نازل ها در بوم مشاهده شد. با اصلاح سیستم بوم اسپری و جایگزینی نازل ها با لوله های ۱۲ میلی متری که آب را به صورت مستقیم روی سطح خاک توزیع می کردند، مشکلات بادبردگی و گرفتگی نازل ها تا حدود زیادی برطرف شد و یکنواختی توزیع آب بهبود یافت. آب آبیاری از رودخانه ارس تأمین و در یک استخر خاکی به وسعت یک هکتار ذخیره می شد. مشابه بسیاری از پروژه های آبیاری بارانی در استان، در این سامانه نیز سیستم فیلتراسیون پیش بینی نشده بود.

عمده محصولات مزرعه شامل گیاهان دارویی نظیر شاه اسپرم، نعناع، گل محمدی، رازیانه، بیدمشک و سنجد بود. به منظور استفاده بهینه از منابع آب و کاهش هزینه های کارگری، مدیریت مزرعه سه دستگاه آبیاری تمام هیدرولیک قرقره ای مجهز به سامانه بوم و آبپاش تفنگی با بازوی متحرک (گان) را برای آبیاری ۵۹ هکتار از اراضی تهیه کرد. در سال نخست بهره برداری، کاهش کارایی سامانه به دلیل وزش باد، کوبیدگی خاک و گیاهان ناشی از عملکرد گان و همچنین گرفتگی

ارزیابی مکرر عملکرد سامانه‌ها در مزرعه توصیه می‌شود (Karimi & Jolaini, 2016; Ghorbani & Amini, 2011).

یکنواختی توزیع آب (DU)

این شاخص نشان‌دهنده میزان یکنواختی پخش آب در مزرعه است و از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$DU = \frac{D_q}{\bar{D}} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه، D_q میانگین ۲۵ درصد پایین‌ترین عمق‌های جمع‌آوری شده در ظروف نمونه‌برداری و \bar{D} میانگین کل عمق‌های اندازه‌گیری شده در ظروف نمونه‌برداری است. به طور کلی، DU کمتر از ۷۰ درصد معمولاً ضعیف، بین ۷۰ تا ۹۰ درصد خوب و بیشتر از ۹۰ درصد عالی تلقی می‌شود (Mohamed et al., 2019).

ضریب یکنواختی کریستیانسن (CU)

این شاخص یکی از متداول‌ترین معیارها برای ارزیابی یکنواختی پخش در سامانه‌های آبیاری بارانی است و از رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Mateos, 2006).

$$CU = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |D_i - \bar{D}|}{\bar{D}} \times 100 \quad (2)$$

در این رابطه، D_i عمق آب جمع‌آوری شده در هر قوطی (میلی‌متر) و n تعداد قوطی‌ها است. مقادیر بالاتر از ۸۵ درصد برای CU قابل قبول گزارش شده‌اند (Abedinpour, 2017).

راندمان کاربرد آبیاری (Ea)

راندمان کاربرد از تقسیم عمق متوسط آب دریافتی بر عمق آب خروجی از آبیاری محاسبه می‌شود (Srivastava et al., 2010):

$$E_a = \frac{X}{D} \times 100 \quad (3)$$

که در آن، X عمق متوسط آب دریافتی (میلی‌متر) است.

تلفات تبخیر و بادبردگی

تلفات تبخیر و بادبردگی برابر است با اختلاف بین حجم آب پخش شده توسط نازل‌ها و حجم آب جمع‌آوری شده در قوطی‌های جمع‌آوری. این تلفات با مقایسه حجم آب جمع‌آوری شده در ظرف‌ها با حجم آب خروجی از نازل‌ها در محدوده همان ظروف محاسبه می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

در شکل ۲ الگوی پخش آبیاری تفنگی بر اساس عمق آب اندازه‌گیری شده در سه ردیف قوطی مستقر بر روی زمین، بدون در نظر گرفتن هم‌پوشانی دستگاه قرقره‌ای در مواضع مجاور و مربوط به تکرار اول ارائه شده است.

تنظیم‌کننده‌های آبیاری تفنگی قابلیت تنظیم داشتند و در این پروژه آبیاری برای پوشش قوسی معادل ۲۷۰ درجه تنظیم شد. چرخش کامل آبیاری برای پوشش این قطاع بین ۲ تا ۵ دقیقه زمان می‌برد. با توجه به شرایط بادخیز منطقه، زاویه پاشش آبیاری روی ۲۵ درجه تنظیم گردید. دبی سامانه حدود ۴۰ مترمکعب بر ساعت بود که با استفاده از شیلنگ نخدار و کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. شدت پاشش آب کمتر از ۸ میلی‌متر در ساعت بود که از مقدار نفوذپذیری خاک کمتر بوده و بنابراین هیچ‌گونه رواناب سطحی مشاهده نشد. در این پروژه، هیدرانت‌ها در فواصل ۵۰ متر نصب شدند و فاصله استقرار دستگاه‌ها نیز ۵۰ متر در نظر گرفته شد. این آرایش موجب ایجاد هم‌پوشانی مناسب در سطح مزرعه شد (شعاع پاشش ۳۵ تا ۴۰ متر). برای هر استقرار، عمق پاشش و میزان آب جمع‌آوری شده در قوطی‌ها اندازه‌گیری شد و در محاسبه عمق متوسط پاشش، اثر هم‌پوشانی پاشنده‌ها نیز لحاظ گردید.

در برخی دستگاه‌های آبیاری قرقره‌ای، به منظور کاهش قطر ذرات آب یا کاهش شدت پخش آب، از سامانه پاششی بوم استفاده می‌شود که در آن به جای یک آبیاری تفنگی بزرگ، از چند آبیاری کوچک روی یک لاترال متحرک بهره‌گرفته می‌شود. در این مزرعه نیز از یک لاترال متحرک به طول ۵۳ متر با ۳۶ نازل در طول آن برای آبیاری بخشی از اراضی استفاده شد.

۳-۲- اندازه‌گیری مزرعه‌ای

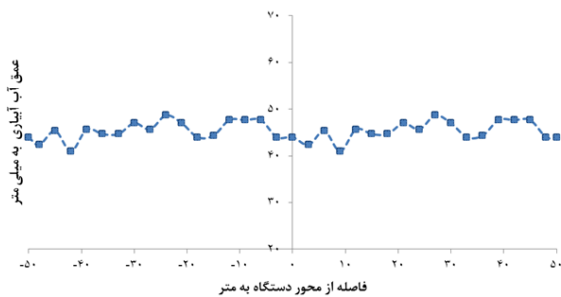
سرعت دستگاه بر اساس عرض نوار آبیاری، دبی خروجی و با هدف تأمین کسری رطوبت خاک تا حد ظرفیت زراعی در عمق توسعه ریشه تنظیم شد. در سامانه‌های بوم اسپری و آبیاری تفنگی، سه ردیف قوطی جمع‌آوری آب (به عنوان سه تکرار) با فاصله سه متر از یکدیگر و به صورت موازی و عمود بر مسیر حرکت دستگاه مستقر شدند. فاصله قوطی‌ها در هر ردیف نیز سه متر و در قالب آرایش مربعی در نظر گرفته شد. در سامانه پیشنهادی بهره‌بردار، میزان آبدی تعدادی از لوله‌های جایگزین شده با استفاده از ظروف مدرج و اندازه‌گیری زمان جریان در حین عملیات آبیاری تعیین شد. پس از استقرار قوطی‌ها، دستگاه‌ها به صورت جداگانه راه‌اندازی و پس از تنظیم سرعت، عملیات آبیاری آغاز گردید.

۳-۴- شاخص‌های ارزیابی

در ارزیابی سامانه‌های آبیاری از شاخص‌های یکنواختی توزیع آب (DU)، ضریب یکنواختی کریستیانسن (CU) و راندمان کاربرد آبیاری (Ea) استفاده شد. بدیهی است که بالا بودن هر یک از این شاخص‌ها به تنهایی نمی‌تواند عملکرد مطلوب عملکرد سامانه باشد. همچنین نتایج ارزیابی یک سامانه آبیاری به دلیل تفاوت اقلیمی، نوع خاک، نوع گیاه و ویژگی‌های سامانه قابل تعمیم به سایر مناطق نیست؛ از این رو،

Fig. 3 - Average spray pattern of a sprinkler gun in a non-overlapping mode.

با توجه به اینکه در شرایط واقعی و هنگام استقرار دستگاه در محل هیدرانت، بخشی از نوار آبیاری با استقرارهای مجاور هم پوشانی دارد، بنابراین با فرض ثابت بودن عملکرد آبیاری در هر استقرار، اثر هم پوشانی برای محاسبه عمق آب دریافتی در هر نقطه از مزرعه در نظر گرفته شد (شکل ۴). به این ترتیب، الگوی واقعی پاشش دستگاه در عملیات آبیاری مشخص گردید و متوسط عمق آب پخش شده در زمین توسط دستگاه قرقره‌ای مجهز به سامانه آبیاری تفنگی محاسبه شد. نتایج نشان داد که متوسط عمق آب دریافتی مزرعه در شرایط هم پوشانی و آبیاری کامل بین ۴۱ تا ۴۹ میلی‌متر بوده و مقدار متوسط عمق آب اعمال شده حدود ۴۵ میلی‌متر به دست آمد.



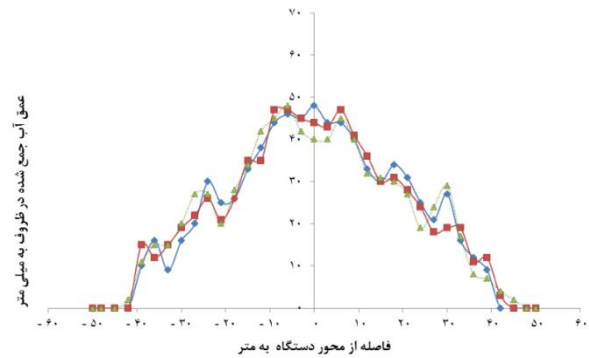
شکل ۴- متوسط عمق آب داده شده در سامانه آبیاری قرقره‌ای با آبیاری تفنگی در حالت هم پوشانی.

Fig. 4 - Average depth of water applied in a reel irrigation system with a gun sprinkler in overlapping mode.

نتایج شاخص‌های ارزیابی پاشنده تفنگی در سه تکرار در جدول ۶ ارائه شده است. بر اساس مقادیر CU ، DU و Ea که به‌طور میانگین برای سه تکرار به ترتیب $۶۴/۹۳$ ، $۶۴/۷۳$ و $۶۷/۶$ درصد به دست آمد، عملکرد سامانه آبیاری تفنگی در این مزرعه ضعیف ارزیابی شد. Keller & Bliesner (1990) نیز به پایین بودن راندمان آبیاری دستگاه‌های ارابه‌ای مجهز به آبیاری تفنگی اشاره کرده‌اند. آنان بازده آبیاری این سامانه را در شرایط سرعت پایین باد (تا ۸ کیلومتر در ساعت)، که با شرایط مزرعه هنگام آزمایش تطابق دارد، بین ۷۷ تا ۸۲ درصد گزارش کردند که با نتایج این مطالعه هم‌خوانی دارد. Li et al. (2016) گزارش کردند که روشن بودن آبیاری گان انتهایی در سیستم سنتریپوت، در مقایسه با حالت خاموش بودن آن، موجب کاهش $۱۰/۲۷$ درصدی ضریب یکنواختی و $۱۴/۱۳$ درصدی راندمان شد. همچنین Wigginton & Raine (2001) میانگین مقادیر DU را برای هشت آبیاری تفنگی حدود ۶۲ درصد اعلام کردند و تنها دو آبیاری DU برابر یا بیش از ۸۰ درصد داشتند. در شکل ۵ الگوی پاشش سامانه بوم اسپری نشان داده شده است.

جدول ۶- نتایج ارزیابی دستگاه قرقره‌ای با سامانه آبیاری تفنگی.

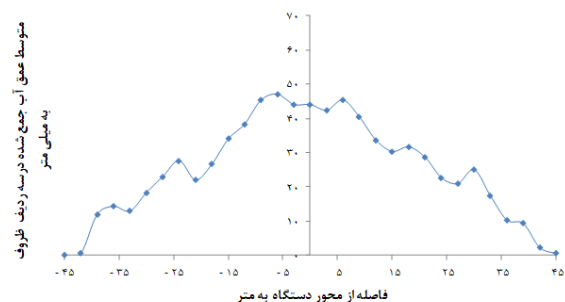
Table 6- Evaluation results of the reel irrigation system with a gun sprinkler.



شکل ۲- الگوی پاشش آبیاری تفنگی در سه ردیف قوطی در نوار آبیاری.

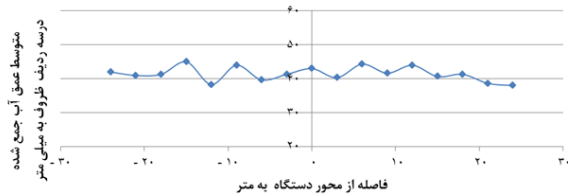
Fig. 2 - Spray pattern of a sprinkler gun in three rows of cans in an irrigation strip.

متوسط عمق آب جمع‌آوری شده در سه ردیف ظرف اندازه‌گیری در شکل ۳ نشان داده شده است. به طور کلی، میزان پاشش از محل استقرار آبیاری به سمت انتهای مزرعه کاهش می‌یابد؛ هرچند این کاهش خطی نبوده و نوساناتی در عمق پاشش مشاهده می‌شود. برای نمونه، تا فاصله ۱۲ متری (چهارمین قوطی) مقدار پاشش افزایش یافته و سپس تا حدود ۳۵ متری با شیب ملایم کاهش یافته و پس از آن افت پاشش با شدت بیشتری رخ می‌دهد. تغییرات الگوی پاشش در طرفین آبیاری عمدتاً ناشی از تأثیر باد است، در حالی که نوسانات عمق پاشش در طول پرتاب بیشتر به عملکرد مکانیکی آبیاری مربوط می‌شود. مطابق گزارش Rahimzadegan (1997)، در آبیاری‌های تفنگی، در ناحیه نزدیک آبیاری (کانون توزیع آب) حجم بیشتری از آب به زمین می‌رسد و با افزایش فاصله از آبیاری، مقدار آب پخش شده کاهش می‌یابد؛ موضوعی که با نتایج این مطالعه هم‌خوانی دارد. در مقابل، Doust Mohammadi et al. (2016) گزارش کردند که در آبیاری‌های مشابه، پاشش تا فاصله‌ای از مرکز ارابه کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد و از حدود ۳۰ متری مجدداً کاهش می‌یابد؛ به طوری که بیشترین آب رسیده به زمین در محدوده ۲۰ تا ۳۰ متری مشاهده شده است.



شکل ۳- متوسط الگوی پاشش آبیاری تفنگی در حالت بدون هم پوشانی.

تلفات تبخیر و بادبردگی	CU (%)	DU (%)	E _a (%)	میانگین آب دریافتی مزرعه (mm)	عمق پاشش دستگاه (mm)	سرعت دستگاه (m/s)	تکرار
۱۷/۱	۷۶/۴	۶۵/۰	۶۸/۲	۴۵/۳	۶۲/۴	۱۷/۸	اول
۳۱/۶	۶۱/۷	۵۹/۳	۶۵/۴	۵۲/۵	۸۴/۱	۱۳/۴	دوم
۱۹/۴	۶۸/۱	۷۰/۵	۶۹/۲	۳۸/۹	۵۸/۳	۱۵/۸	سوم
۲۲/۷	۶۸/۷	۶۴/۹	۶۷/۶	۴۵/۶	۶۸/۳	۱۵/۶	میانگین



شکل ۶- متوسط عمق آب داده شده در سامانه آبیاری قرقره‌ای با سامانه بوم اسپری.

Fig. 6- Average depth of water applied in a reel irrigation system with a spray boom system.

نتایج ارزیابی سامانه بوم اسپری در سه تکرار در جدول ۷ ارائه شده است. بر اساس شاخص‌های DU، CU و E_a که به‌طور میانگین برای سه تکرار به ترتیب ۹۱/۱، ۹۴/۷ و ۸۵/۸ درصد به دست آمد، عملکرد سامانه بوم اسپری قابل قبول و در سطح عالی ارزیابی گردید. پیش‌تر نیز Silva et al. (2007) به پایین‌تر بودن یکنواختی توزیع آب در سامانه آبیاری تفنگی نسبت به بوم اسپری اشاره کرده بود. در این تحقیق، رابطه مشخص و قابل اتکائی میان سرعت حرکت دستگاه و یکنواختی توزیع آب مشاهده نشد، این در حالی است که Silva et al. (2007) گزارش کرده‌اند با افزایش سرعت حرکت دستگاه، مقدار این شاخص کاسته می‌یابد. با این حال، در نتایج آنان نیز ضریب یکنواختی در سرعت‌های ۱۰ و ۳۰ متر بر ساعت برای دستگاه بوم اسپری تفاوت قابل توجهی نداشته و مقادیر مشابهی ارائه شده است.

جدول ۷- نتایج ارزیابی دستگاه قرقره‌ای با سامانه بوم اسپری.

Table 7- Evaluation results of the reel irrigation system with the spray boom.

تلفات تبخیر و بادبردگی	CU (%)	DU (%)	E _a (%)	میانگین آب دریافتی مزرعه (mm)	عمق پاشش دستگاه (mm)	سرعت دستگاه (m/s)	تکرار
۵/۶	۹۵/۱	۹۲/۳	۸۸	۴۱/۵	۴۷/۱	۱۲	اول
۱۰/۹	۹۴/۶	۹۰/۴	۸۱/۵	۴۸/۸	۵۹/۷	۱۰	دوم
۵	۹۴/۴	۹۰/۸	۸۷/۸	۳۹/۳	۴۴/۳	۱۴	سوم
۷/۳	۹۴/۷	۹۱/۱	۸۵/۸	۴۳/۲	۵۰/۳	۱۲	میانگین

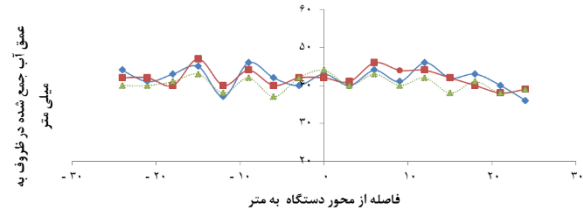
پای گیاه توزیع می‌شود، تلفات ناشی از تبخیر و بادبردگی صفر در نظر گرفته شد.

برای ارزیابی سامانه پخش آب ساخته شده توسط بهره‌بردار، آبدهی لوله‌های آبد در طول لاترال با استفاده از بطری و زمان سنج اندازه‌گیری شد (شکل ۷). در ارزیابی این سامانه، با توجه به اینکه آب مستقیماً در

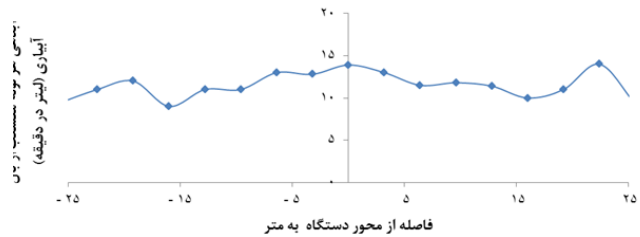
شکل ۵- الگوی پاشش بوم اسپری در سه ردیف قوطی در نوار آبیاری.

Fig. 5 - Spray pattern of the spray boom in three rows of cans in the irrigation strip.

متوسط عمق آب دریافتی در قوطی‌ها از محور دستگاه در شکل ۶ نشان داده شده است. توزیع پاشش در طول لاترال تقریباً یکنواخت بوده و عملکرد دستگاه در ایجاد آبیاری یکنواخت در عرض مزرعه قابل توجه است. آبیاری تفنگی معمولاً با فشارهای نسبتاً بالا و شعاعی پرتاب محدود عمل می‌کند. این ترکیب می‌تواند موجب ایجاد نواحی بادبردگی و افزایش تبخیر ناخواسته در اطراف نازل شود که در نهایت به کاهش یکنواختی توزیع منجر می‌شود (Doust Mohammadi et al., 2016). در مقابل، بوم اسپری معمولاً با پخش‌کننده‌های گسترده و زاویه‌های تنظیم‌شده طراحی می‌شود تا پاشش یکنواخت‌تری بر سطح مزرعه ایجاد کند.



ضریب یکنواختی کریستیانسن (CU) و راندمان کاربرد آبیاری (Ea) که میانگین آن‌ها در سه تکرار به ترتیب ۸۵/۷، ۸۹/۹ و ۹۴/۲ درصد محاسبه گردید، وضعیت عملکردی سامانه بوم اسپری در محدوده قابل قبول ارزیابی شد. به نظر می‌رسد راندمان بالای مشاهده شده در سامانه‌های مشابه را بتوان ناشی از کاهش تماس آب با هوا و در نتیجه کاهش تلفات تبخیر و بادبردگی دانست. اگرچه این سامانه به صورت تجربی و توسط بهره‌برار طراحی و ساخته شده بود، نتایج ارزیابی نشان‌دهنده آن است که چنین اصلاحاتی می‌تواند به عنوان راهکار عملی، کم‌هزینه و مؤثر برای بهبود عملکرد سامانه‌های آبیاری قرقه‌ای موجود مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۷- آبدهی هر لوله منشعب از بال آبیاری در سامانه آبیاری قرقه‌ای بومی‌سازی شده.

Fig. 7 - Water flow of each pipe branching from the irrigation wing in the localized reel irrigation system.

نتایج ارزیابی عملکرد سامانه پخش آب ساخته شده توسط بهره‌بردار در جدول ۸ ارائه شده است. بر شاخص‌های یکنواختی توزیع آب (DU)،

جدول ۸- نتایج ارزیابی دستگاه قرقه‌ای با سامانه بومی‌سازی شده.

Table 8- Evaluation results of the reel device with the localized system.

تکرار	سرعت دستگاه (m/s)	عمق پاشش دستگاه (mm)	میانگین آب دریافتی مزرعه (mm)	E _a (%)	DU (%)	CU (%)
اول	۱۵	۳۱/۲	۳۱/۲	۹۳/۳	۸۵/۸	۸۹/۲
دوم	۱۲	۴۷/۶	۴۷/۶	۹۴/۴	۸۸/۵	۹۱/۰
سوم	۱۵	۳۳/۴	۳۳/۴	۹۴/۹	۸۲/۷	۸۹/۶
میانگین	۱۴	۳۷/۴	۵۶/۱	۹۴/۲	۸۵/۷	۸۹/۹

طراحی گردید، با مقادیر ۸۹/۹، ۸۵/۷ و ۹۴/۲ درصد به ترتیب برای CU، DU و E_a، عملکرد قابل قبولی از خود نشان داد. از منظر تلفات تبخیر و بادبردگی نیز بیشترین میزان این تلفات در سامانه آبپاش تفنگی با میانگین ۲۲/۷ درصد مشاهده شد، در حالی که در سامانه بوم اسپری این تلفات به حدود ۷/۲ درصد کاهش یافت و در سامانه بومی‌سازی شده عملاً حذف گردید. این یافته‌ها بیانگر تأثیر مستقیم ارتفاع پرتاب آب، اندازه قطرات و سرعت باد بر تلفات تبخیر و بادبردگی در سامانه‌های آبیاری بارانی است.

در مجموع، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که کاربرد سامانه‌های بوم اسپری یا سامانه‌های اصلاح‌شده با قابلیت توزیع مستقیم آب در سطح خاک، می‌تولند راندمان کاربرد آب را به طور معنی‌داری افزایش داده و تلفات ناشی از تبخیر و بادبردگی را کاهش دهد. از این رو، در طراحی و بهره‌برداری سامانه‌های آبیاری بارانی در مناطق بادخیز شمال غرب کشور، استفاده از سامانه‌های بوم اسپری یا نمونه‌های اصلاح‌شده آن به جای آبپاش‌های تفنگی توصیه می‌گردد. علاوه بر این، انجام ارزیابی‌های دوره‌ای عملکرد سامانه‌ها و نصب تجهیزات فیلتراسیون مناسب به منظور جلوگیری از گرفتگی نازل‌ها، از الزامات بهره‌برداری پایدار این سامانه محسوب می‌شود. در پایان انجام مطالعات اقتصادی-اجتماعی به منظور ارزیابی میزان پذیرش کشاورزان و توجیه‌پذیری اقتصادی سامانه‌های پیشنهادی در منطقه مورد مطالعه پیشنهاد می‌گردد.

بررسی تلفات ناشی از تبخیر و بادبردگی در سه سامانه آبیاری نشان داد که بیشترین میزان این تلفات در آبپاش تفنگی رخ داده است (با میانگین ۲۲/۷ درصد). در مقابل، در سامانه بومی‌سازی شده، این تلفات عملاً حذف گردید. شایان ذکر است که این نتیجه بر اساس ساختار طراحی سامانه (توزیع مستقیم آب در پای گیاه) استنتاج شده و اندازه‌گیری مستقیم تلفات مذکور صورت پذیرفته است.

۴- نتیجه‌گیری نهایی

نتایج این پژوهش نشان داد که نوع سامانه آبیاری و ویژگی‌های طراحی و بهره‌برداری آن نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان یکنواختی توزیع آب، راندمان کاربرد و تلفات ناشی از تبخیر و بادبردگی دارد. مقایسه سه سامانه آبیاری شامل آبپاش تفنگی، بوم اسپری و سامانه بومی‌سازی شده در اراضی تحت پوشش رودخانه ارس در شهرستان پلدشت حاکی از آن بود که عملکرد سامانه بوم اسپری از نظر شاخص‌های یکنواختی و راندمان آبیاری به طور معناداری بهتر از دو سامانه دیگر است. میانگین ضریب یکنواختی (CU)، یکنواختی توزیع (DU) و راندمان کاربرد (Ea) در سامانه بوم اسپری به ترتیب برابر با ۹۴/۷، ۹۱/۱ و ۸۵/۸ درصد به دست آمد که در محدوده عملکرد عالی قرار می‌گیرد. در مقابل، سامانه آبپاش تفنگی با مقادیر ۶۸/۷، ۶۴/۹ و ۶۷/۶ درصد به ترتیب برای شاخص‌های مذکور، ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد. سامانه بومی‌سازی شده که با اصلاح لاترال و حذف نازل‌ها

منابع

- 21st International Congress on Irrigation and Drainage, Tehran, Iran.
- Heydari N and Nakhjavani Moghadam M, 2024. Quantitate evaluation of pressurized irrigation development in Iran compared to the world. *Water Management in Agriculture*, 10(2): 171-194, [In Persian with English Abstrac].
 - Karimi M and Jolaini M, 2016. Guidelines for evaluation of center pivot irrigation system performance (technical note). *Journal of Water and Sustainable Development*, 2(2): 85-91, <https://doi.org/10.22067/jwsd.v2i2.42900> [In Persian with English Abstrac].
 - Karlberg L and de Vries FWP, 2004. Exploring potentials and constraints of low-cost drip irrigation with saline water in sub-Saharan Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 29(15-18): 1035-1042, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.08.004>
 - Keller J and Bliesner R, 1990. *Sprinkler and trickle irrigation*. Van Nosrand Remholh, New York, 652 p.
 - Keramatzadeh A, Khosravi Payam V and Joolaie R, 2020. The impact of water pricing method on agricultural water consumption in Gonbad Kavoods county. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(2): 179-194, <https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.16797.3213>. [In Persian with English Abstrac].
 - Li L, Zhang X, Qiao X and Liu G, 2016. Analysis of the decrease of center pivot sprinkling system uniformity and its impact on maize yield. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(4): 108–119, 10.3965/j.ijabe.20160904.1129
 - Mateos L, 2006. A simulation study of comparison of the evaluation procedures for three irrigation methods. *Irrigation Science*, 25(1): 75-83, <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0036-x>
 - Mohamed AZ, Peters RT, Zhu X and Sarwar A, 2019. Adjusting irrigation uniformity coefficients for unimportant variability on a small scale. *Agricultural Water Management*, 213: 1078-1083. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.017>
 - Mohammadi E, Naghdi MH, Kahnooji M and Atrchian H, 2025. Evaluation of the performance of drip irrigation systems in Pistachio Orchards (study area: Pistachio Orchards covered by the SIMAB project in Kerman province). *Irrigation and Water Engineering*, 15(3): 72-88, <https://doi.org/10.22125/iwe.2025.450605.1799> [In Persian with English Abstrac].
 - Naseri A, Abbasi F and Akbari M, 2017. Estimating agricultural water consumption by analyzing water balance. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(68): 17-32, <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.105338.1057> [In Persian with English Abstrac].
 - Abedinpour M, 2017. Field evaluation of centre pivot sprinkler irrigation system in the North-East of Iran. *Journal of Water and Land Development*, 34(1): 3-9, <https://doi.org/10.1515/jwld-2017-0033>.
 - Ahmadaali K, Ramezani Etedali H and Hosseini Pazhouh N, 2017. Assessment of modern irrigation systems in Qom province. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 11(5): 736-749 [In Persian with English Abstract].
 - Ahmadzadeh Kaleybar F and Emamifar M, 2023. Technical evaluation of classic stationary sprinkler irrigation systems with travelling sprinklers (Komet 162) in Arasbaran plain of development lands for irrigation. *Irrigation and Water Engineering*, 13(13): 148-162, <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.326264.1595>. [In Persian with English Abstract].
 - Ashiri M, Hooshmand A and Broomand nasab S, 2016. Technical evaluation of drip irrigation systems (case study: Shahid Rajaayi agro-industry - Dezful). *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(2): 79-88, <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12113> [In Persian with English Abstract].
 - Bakhtiari S, Mohseni Movahed SA, Moghaddasi M and Davoudmaghami D, 2020. Performance evaluation of semi-portable sprinkler irrigation systems in Markazi province. *Iranian Water Researches Journal*, 14(1): 9-18 [In Persian with English Abstrac].
 - Bellvert J, Pamies-Sans M, Casadesus J and Girona J, 2025. Evaluating the impact of drought and water restrictions on agricultural production in irrigated areas through crop water productivity functions and a remote sensing-based evapotranspiration model. *Agricultural Water Management*, 309: 109319. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109319>
 - Doust Mohammadi MM, Soltani Mohammadi A and Boroomand Nasab S, 2016. The performance evaluation of travelling gun irrigation system implemented in Esmatyeh farm of Qom. *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(4): 47-61. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25885952.1394.38.4.5.6> [In Persian with English Abstrac].
 - Gholami Sefidkouhi MA, Doust Mohammadi MM and Heydari S, 2024. Technical, economical and social evaluation of localized irrigation systems in Qom province. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 18(5): 745-757, [In Persian with English Abstrac].
 - Ghorbani B and Amini M, 2011. Assessment of sprinkler irrigation systems operation at Chaharmahal and Bakhtiari province, Iran. *ICID*

2010. Feasibility evaluation of pressurized irrigation in canal commands. *Water Resources Management*, 24(12): 3017-3032, <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9592-1>
- Wigginton DW and Raine SR, 2001. Irrigation water use efficiency in the Mary River catchment on-farm performance evaluations in the dairy sector. *National Centre for Engineering in Agriculture publication*, 179729(3): 254-270, <https://doi.org/10.3390/w13131826>
 - Zamanisepahvand S, Torabi H and Nasrolahi A, 2023. Estimation of wind drift and evaporation losses of sprinkler irrigation systems under the influence of different exploitation managements (case study: Choghahoroshi Khorramabad plain). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 17(1): 129-141, <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1402.17.1.11.5> [In Persian with English Abstrac].
 - Nazari S, Bijenkhan M, Ramezani Etedali H and Mahdavi A, 2024. Evaluating the effect of the discharge control valve implementation in tape irrigation systems. *Hydraulics and Water Science*, 34(4): 39-51, <https://doi.org/10.22034/hws.2024.18667> [In Persian with English Abstrac].
 - Ngasoh FG, Anyadike CC, Mbajjorgu CC and Usman MN, 2018. Performance evaluation of sprinkler irrigation system at Mambilla beverage limited, Kakara-Gembu, Taraba State-Nigeria. *Nigerian Journal of Technology*, 37(1): 268-274, <https://doi.org/10.4314/njt.v37i1.35>
 - Peng J, Liu T, Chen J, Li Z, Ling Y, De Wulf A and De Maeyer P, 2023. The conflicts of agricultural water supply and demand under climate change in a typical arid land watershed of Central Asia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47: 101384 <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101384>
 - Rahimzadegan R, 1997. Design of sprinkler irrigation system. Isfahan University of Technology Publications, 280 p [In Persian].
 - Rouzaneh D, Yazdanpanah M and Jahromi AB, 2021. Evaluating micro-irrigation system performance through assessment of farmers' satisfaction: implications for adoption, longevity, and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 246: 106655, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106655>
 - Salamati N, Moayeri M and Abbasi F, 2023. Evaluation of canola yield and applied water productivity in surface and sprinkler irrigation systems (case study: Behbahan). *Journal of Water and Soil Science*, 27(2): 1-18, <https://doi.org/0.47176/jwss.27.2.26989> [In Persian with English Abstrac].
 - Salemi HR, Rezvani SM, Ghadami Firouzabadi A and EbrahimiPak NA, 2020. Investigation and evaluation of sprinkler irrigation systems (constant classic and wheel move) in some fields of Isfahan and Hamedan provinces. *Irrigation and Water Engineering*, 10(3): 277-288, <https://doi.org/10.22125/iwe.2020.107110> [In Persian with English Abstrac].
 - Seyedzadeh A, Khazae P, Siosemardeh A and Maroufpoor E, 2022. Irrigation management evaluation of multiple irrigation methods using performance indicators. *Journal of Hydraulic Engineering*, 28(3): 303-312, <https://doi.org/10.1080/09715010.2021.1891470>
 - Silva LL, Serralheiro R and Santos N, 2007. Improving irrigation performance in hose-drawn traveller sprinkler systems. *Biosystems Engineering*, 96(1): 121-127, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.10.004>
 - Srivastava RC, Mohanty S, Singandhuppe RB, Mohanty RK, Behera MS, Ray LI and Sahoo D,