

Research Article**Evaluation of the Effectiveness of a Monitoring Program on Operation and Maintenance for Modern Irrigation Systems: A Case Study of Arak and Shazand Cities****Mustafa Goodarzi¹, Saber Zolfaghari²**

***Corresponding Author:**1- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Arak, Iran.

2- Agricultural Jihad Organization of Markazi Province, Arak, Iran.

(✉ **Corresponding Author:** goodarzimustafa@gmail.com)

ARTICLE INFO

Received: 12 August 2026

Revised: 29 August 2026

Accepted: 12 September 2026

Available Online: 22 September 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Goodarzi, M., & Zolfaghari, S., (2026). Evaluation of the Effectiveness of a Monitoring Program on Operation and Maintenance for Modern Irrigation Systems: A Case Study of Arak and Shazand Cities. V.27, No.103, P:1-24
<https://doi.org/10.22092/idser.2026.373925.1658>

Extended Abstract**Introduction**

Pressurized irrigation systems are increasingly used to improve water management and reduce water losses in agricultural production, particularly in regions facing water scarcity. However, the expected benefits of these systems cannot be achieved solely through appropriate design and installation. Their long-term performance also depends on proper operation, preventive maintenance, timely technical support, and continuous monitoring during the service life of the system. Inadequate operation and maintenance may gradually alter hydraulic conditions, reduce the effectiveness of water application, and lead to deterioration in the overall condition of irrigation systems. In addition, farmers and system operators need adequate technical knowledge and continued access to professional support to maintain the systems under field conditions. The objective of this study was to evaluate changes in selected technical indicators of pressurized irrigation systems following the implementation of an operation and maintenance monitoring program and to assess farmers' perceptions of the factors contributing to successful long-term operation and maintenance of these systems.

Methodology

The study was conducted in Arak and Shazand counties of Markazi Province, Iran. A total of 30 pressurized irrigation systems were selected for field evaluation, including 20 systems in Arak and 10 systems in Shazand. The systems were evaluated repeatedly at four measurement stages consisting of the initial technical supervision stage and three subsequent follow-up stages during the cropping season. Two field-based technical indicators were used to assess the condition of the irrigation systems: operating pressure and soil water content. Operating pressure was measured using a pressure gauge and expressed as meters of water head. These two indicators were selected because operating pressure provides an important indication of the hydraulic operating condition of pressurized irrigation systems, while soil water content provides information about the resulting moisture condition of the root-zone soil following irrigation. In addition to the field measurements, a structured questionnaire was administered to the operators of the evaluated irrigation systems. The questionnaire consisted of 24 items and was designed to assess farmers' perceptions of factors affecting the successful operation and maintenance of pressurized irrigation systems. Responses were recorded using a five-point Likert scale. The content of the questionnaire was reviewed by experts in irrigation and operation and maintenance of pressurized irrigation systems. Field data were analyzed using descriptive statistics and repeated-measures analysis of variance. Measurement stage was considered the within-system factor, whereas county was considered the between-system factor. Where appropriate,

pairwise comparisons were conducted using Bonferroni adjustment to control the probability of Type I error associated with multiple comparisons.

Results and Discussion

The results showed that the mean operating pressure of the evaluated irrigation systems was 42.33 m of water head at the initial technical supervision stage. The corresponding values at the first, second, and third follow-up stages were 39.73, 40.30, and 39.97 m, respectively. Thus, operating pressure showed an overall decline after the initial supervision stage, although the values remained relatively stable across the three subsequent follow-up stages. Repeated-measures analysis indicated a statistically significant effect of measurement stage on operating pressure, demonstrating that operating pressure changed over the monitoring period. However, the overall difference between Arak and Shazand counties was not statistically significant. Bonferroni-adjusted pairwise comparisons showed that the pressure at the initial supervision stage was significantly higher than the pressure recorded at the second and third follow-up stages. In contrast, the difference between the initial supervision stage and the first follow-up stage was not statistically significant. Furthermore, none of the differences among the three follow-up stages was statistically significant. These results suggest that although some reduction in operating pressure occurred following the initial supervision, the pressure conditions were comparatively stable during the subsequent monitoring stages.

Soil water content also showed an overall declining tendency. The mean soil water content decreased from 27.51% at the initial supervision stage to 26.47%, 26.83%, and 25.72% at the first, second, and third follow-up stages, respectively. The repeated-measures analysis showed no statistically significant overall difference between Arak and Shazand counties. The results therefore indicate that the general temporal pattern of soil water content was similar in the two counties. Bonferroni-adjusted pairwise comparisons indicated that the significant difference was primarily observed between the initial supervision stage and the first follow-up stage, whereas the subsequent pairwise differences were not statistically significant. An important finding was the increase in variability in soil water content toward the third follow-up stage. This increase may indicate greater heterogeneity among irrigation systems or differences in management conditions among operators. However, because spatial variability, irrigation discharge, application uniformity, and detailed soil characteristics were not independently evaluated, the underlying causes of this variability cannot be determined from the present data.

The questionnaire results provided complementary information concerning farmers' perceptions of operation and maintenance. The highest percentage score was obtained for operation management (83.33%), followed by technical recommendations (70.33%). The scores for operator training, increased productivity, and water saving were 56.67%, 46.67%, and 41.33%, respectively. These results indicate relatively high perceived performance in operation management and technical recommendations, while training, productivity, and water saving received comparatively lower scores.

Conclusions

The findings indicate that the operation and maintenance monitoring program was associated with relatively stable hydraulic and soil-moisture conditions during the follow-up period, although both operating pressure and soil water content showed an overall declining tendency after the initial supervision stage. The results support the importance of moving from a one-time supervision approach toward a continuous operation and maintenance support system. Periodic technical inspections, follow-up visits, preventive maintenance, operator training, and routine monitoring of key indicators such as operating pressure and soil water content can help identify potential changes in system condition at an early stage. Nevertheless, because the study did not include an independent control group and did not directly measure indicators such as discharge, distribution uniformity, application efficiency, or water productivity, the findings should be interpreted as evidence of changes in selected technical indicators rather than direct proof of improvements in overall irrigation efficiency. Future studies should incorporate a broader range of hydraulic, agronomic, and economic indicators and, where possible, include control systems to provide stronger evidence regarding the causal effectiveness of continuous monitoring and technical supervision programs.

Keywords: Irrigation management, operator training, pressurized irrigation, operating pressure, soil moisture

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

All relevant data and results supporting the findings of this study are presented within the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Author Contribution

All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection and analysis were performed by all authors. All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Acknowledgement

The authors sincerely appreciate the cooperation and assistance of the farmers and irrigation-system operators who participated in this study, the technical experts and supervisors of the pressurized irrigation systems, and the management and technical staff of Arak and Shazand agricultural jihad centers for their valuable support during the fieldwork and data collection.



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

[https:// 10.22092/idser.2026.373925.1658](https://10.22092/idser.2026.373925.1658)

نوع مقاله: پژوهشی

ارزیابی اثربخشی برنامه نظارت بر بهره‌برداری و نگهداری از سامانه‌های نوین آبیاری (مطالعه موردی: شهرستان‌های اراک و شازند)

مصطفی گودرزی^۱، صابر ذوالفقاری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۱ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۷ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۱ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱

چکیده

بهره‌برداری درست از سامانه‌های نوین آبیاری علاوه بر کیفیت طراحی و اجرا، به نظارت مستمر و نگهداری مناسب وابسته است. این پژوهش با هدف ارزیابی اثربخشی برنامه نظارت بر بهره‌برداری از سامانه‌های نوین آبیاری در شهرستان‌های اراک و شازند استان مرکزی اجرا شده است. در این مطالعه، عملکرد ۳۰ سامانه آبیاری تحت فشار (۲۰ سامانه در شهرستان اراک و ۱۰ سامانه در شهرستان شازند) طی چهار مرحله شامل زمان نظارت، مرحله اول، مرحله دوم و مرحله سوم پس از نظارت ارزیابی گردید. شاخص‌های فنی شامل فشار کارکرد سامانه و رطوبت حجمی خاک (۲۴ ساعت پس از آبیاری) اندازه‌گیری و همزمان دیدگاه بهره‌برداران درباره عوامل مؤثر بر موفقیت بهره‌برداری از طریق پرسشنامه بررسی شد. داده‌ها با استفاده از آمار توصیفی، تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های تکراری و مقایسه میانگین‌ها تجزیه و تحلیل شدند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که میانگین فشار کارکرد سامانه‌ها در زمان نظارت، ۴۲/۳۳ متر ستون آب، در مراحل اول، دوم و سوم به ترتیب به ۳۹/۷۳، ۴۰/۳۰ و ۳۹/۹۷ متر ستون آب رسید. تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های تکراری نشان داد که اثر زمان بر فشار کارکرد معنی‌دار ($\eta^2=0.15$, $P<0.01$) است و کاهش فشار عمدتاً بین زمان نظارت و مراحل پس از آن رخ می‌دهد، در حالی که اختلاف بین مراحل پس از نظارت معنی‌دار نیست. میانگین رطوبت حجمی خاک نیز از ۲۷/۵۱ درصد در زمان نظارت به ۲۶/۴۷، ۲۶/۸۳ و ۲۵/۷۲ درصد در سه مرحله بعدی تغییر کرد. اگرچه میانگین رطوبت خاک تنها کاهش محدودی نشان داد، افزایش انحراف معیار در مرحله سوم بیانگر افزایش ناهمگنی مدیریت آبیاری بین بهره‌برداران طی زمان بود. نتایج پرسشنامه همچنین نشان داد که آموزش بهره‌برداران، نگهداری و سرویس دوره‌ای تجهیزات، تداوم خدمات فنی، بازدیدهای منظم کارشناسان و پایش مستمر عملکرد سامانه‌ها مهم‌ترین عوامل مؤثر بر موفقیت بهره‌برداری از سامانه‌های نوین آبیاری هستند. نتایج این پژوهش نشان داد که اجرای برنامه‌های نظارت فنی موجب حفظ فشار کارکرد سامانه‌ها و پایداری نسبی وضعیت رطوبت خاک می‌شود، اما با گذشت زمان و کاهش شدت نظارت، بخشی از سامانه‌ها از شرایط بهینه فاصله می‌گیرند. بنابراین، استقرار نظام نظارت مستمر پس از بهره‌برداری همراه با آموزش دوره‌ای بهره‌برداران و پایش منظم شاخص‌های فنی می‌تواند نقش مؤثری در حفظ عملکرد سامانه‌های نوین آبیاری، افزایش بهره‌وری مصرف آب و ارتقای پایداری کشاورزی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری تحت فشار، آموزش بهره‌برداران، رطوبت خاک، فشار کارکرد، مدیریت آبیاری

مقدمه

آب مهم‌ترین نهاده تولید در بخش کشاورزی است و بخش عمده‌ای از کشور در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، نقش اساسی در تأمین امنیت غذایی، توسعه اقتصادی و محدودیت منابع آب همواره یکی از مهم‌ترین چالش‌های پایداری محیط‌زیست دارد. در ایران، به دلیل قرار گرفتن توسعه کشاورزی بوده است. افزایش جمعیت، توسعه

^۱ استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران. (نویسنده مسئول: Email: goodarzimustafa@gmail.com)

^۲ کارشناس، سازمان جهاد کشاورزی استان مرکزی، اراک، ایران.

فعالیت‌های کشاورزی، کاهش بارندگی، وقوع خشکسالی‌های متوالی، افت سطح آب‌های زیرزمینی و تغییرات اقلیمی طی دهه‌های اخیر فشار مضاعفی بر منابع آب وارد کرده است. در حال حاضر بیش از ۹۰ درصد آب استحصالی کشور در بخش کشاورزی مصرف می‌شود، از این رو هرگونه افزایش در بهره‌وری مصرف آب در این بخش می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در مدیریت پایدار منابع آب و افزایش امنیت غذایی داشته باشد (FAO, 2021). در پاسخ به این چالش‌ها، توسعه سامانه‌های نوین آبیاری طی دو دهه گذشته یکی از مهم‌ترین سیاست‌های مدیریت مصرف آب در کشور بوده است. اجرای سامانه‌های آبیاری تحت فشار از جمله سامانه‌های بارانی و موضعی با هدف افزایش راندمان کاربرد آب، کاهش تلفات انتقال و توزیع، بهبود یکنواختی آبیاری و افزایش عملکرد محصولات کشاورزی در سطح وسیعی از اراضی کشور اجرا شده است. با وجود سرمایه‌گذاری قابل توجه دولت در این حوزه، بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که فاصله قابل توجهی بین راندمان طراحی و راندمان واقعی بهره‌برداری از این سامانه‌ها وجود دارد و بخش قابل توجهی از ظرفیت آنها به دلیل ضعف در مدیریت بهره‌برداری، آموزش ناکافی بهره‌برداران و نگهداری نامناسب تجهیزات محقق نمی‌شود.

بررسی‌ها نشان می‌دهند موفقیت سامانه‌های نوین آبیاری تنها به کیفیت طراحی و اجرای فنی آنها وابسته نیست، بلکه عوامل انسانی، مدیریتی، اقتصادی و اجتماعی نیز در عملکرد نهایی سامانه نقش اساسی دارند. ویژگی‌هایی مانند سطح تحصیلات، سابقه کشاورزی، اندازه مزرعه، درآمد، دسترسی به خدمات ترویجی، میزان مشارکت بهره‌برداران و توان مدیریتی از جمله عوامل مؤثر بر پذیرش فناوری و بهره‌برداری درست از سامانه‌های آبیاری هستند (Norouzi, 2001; Karbasi, 2006; and Chizari, 2006). در بسیاری از موارد، ضعف آگاهی بهره‌برداران نسبت به اصول بهره‌برداری، تنظیم فشار، زمان‌بندی آبیاری، نگهداری فیلترها و پرداختن به سرویس‌های دوره‌ای موجب کاهش یکنواختی توزیع آب، افزایش مصرف انرژی و افت عملکرد سامانه می‌شود.

پژوهش‌های متعدد داخلی و خارجی بر اهمیت آموزش و ترویج در افزایش بهره‌وری سامانه‌های آبیاری تأکید کرده‌اند. اشرف و همکاران (Ashraf et al., 2019) گزارش کردند که آموزش مستمر کشاورزان نقش مهمی در افزایش بهره‌وری آب و کاهش مصرف نهاده‌ها دارد. مهربانی (Mehrbani, 2018)، شاه آبادی و امیری (Shahabadi and Amiri, 2014) و اعظمی و همکاران (Azami et al., 2012) می‌گویند انتقال دانش فنی و توسعه خدمات ترویجی احتمال پذیرش فناوری‌های نوین آبیاری و استفاده درست از آنها را افزایش می‌دهد. با این حال، آموزش اولیه به‌تنهایی برای حفظ عملکرد سامانه کافی نیست و اثربخشی آن زمانی افزایش می‌یابد که با نظارت مستمر و بازدیدهای دوره‌ای همراه باشد. نظارت بر بهره‌برداری از سامانه‌های نوین آبیاری حلقه مفقود بسیاری از پروژه‌های توسعه آبیاری در ایران است. پس از طراحی، اجرا و تحویل سامانه به بهره‌بردار در اغلب طرح‌ها ارتباط فنی با کشاورز به حداقل می‌رسد و برنامه مشخصی برای پایش عملکرد، رفع نواقص احتمالی و ارزیابی کیفیت بهره‌برداری وجود ندارد. در نتیجه، به مرور زمان عواملی مانند گرفتگی قطره‌چکان‌ها، تغییر فشار شبکه، کاهش راندمان پمپ، فرسودگی تجهیزات و تغییر الگوی کشت موجب کاهش کارایی سامانه می‌شود. در مقابل، مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که استقرار نظام نظارت فنی پس از اجرا، همراه با آموزش عملی و بازدیدهای منظم، می‌تواند موجب حفظ راندمان سامانه، افزایش یکنواختی توزیع آب، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و افزایش بهره‌وری اقتصادی آب شود (Louie and Selker, 2000; Rahman et al., 2018; Yost et al., 2019). اگوزتورک (Oğuztürk, 2025) در مروری نظام‌مند بیش از ۱۳۰ مطالعه را درباره سامانه‌های هوشمند آبیاری و نقش پایش مستمر در افزایش بهره‌وری آب بررسی و گزارش کرد مهم‌ترین عامل موفقیت، پایش مستمر عملکرد سامانه و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده است نه صرفاً نصب تجهیزات جدید. در این تحقیق تأکید شده است که نگهداری، واسنجی تجهیزات و آموزش بهره‌برداران شرط اصلی حفظ عملکرد سامانه است. نتایج بررسی‌ها نشان

تأثیر آن بر عملکرد واقعی سامانه‌ها پرداخته‌اند. بیشتر پژوهش‌های موجود بر طراحی سامانه، راندمان آبیاری یا عوامل اقتصادی تمرکز داشته‌اند و نقش آموزش و نظارت پس از اجرا کمتر بررسی شده است. این خلأ پژوهشی ضرورت پرداختن به مطالعاتی را آشکار می‌سازد که بتوانند اثر برنامه‌های نظارتی را بر شاخص‌های فنی و مدیریتی سامانه‌های آبیاری ارزیابی کنند. از این رو، پژوهش حاضر، که در استان مرکزی به اجرا در آمد، با تلفیق اندازه‌گیری‌های میدانی، تحلیل آماری و ارزیابی دیدگاه‌های بهره‌برداران درصدد پر کردن این خلأ و ارائه ارزیابی جامع‌تری از اثربخشی برنامه‌های نظارت بر بهره‌برداری سامانه‌های نوین آبیاری است. در این مطالعه، شاخص‌های فنی مانند فشار کاری سامانه و وضعیت رطوبت خاک در تعدادی از سامانه‌های آبیاری تحت فشار ارزیابی گردید و نقش آموزش و بازدیدهای نظارتی در بهبود عملکرد سامانه‌ها بررسی شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف ارزیابی اثربخشی برنامه نظارت بر نگهداری و بهره‌برداری از سامانه‌های نوین آبیاری در استان مرکزی اجرا شده است. جامعه آماری شامل طرح‌های آبیاری تحت فشار اجرا شده طی سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ در شهرستان‌های اراک و شازند بود که تحت برنامه نظارت بر بهره‌برداری قرار گرفته بودند. نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌بندی شده با تخصیص متناسب انتخاب شدند. در این روش، شهرستان‌های اراک و شازند به‌عنوان دو طبقه مستقل در نظر گرفته شدند. ابتدا فهرست کامل سامانه‌های نوین آبیاری از سازمان جهاد کشاورزی استان مرکزی تهیه شد. این سامانه‌ها تحت برنامه نظارت بر بهره‌برداری قرار داشتند و واجد شرایط ورود به مطالعه بودند. جامعه آماری شامل ۵۴ سامانه بود که از این تعداد، ۳۴ سامانه در شهرستان اراک و ۲۰ سامانه در شهرستان شازند قرار داشتند. حجم نمونه هر طبقه متناسب با سهم آن از جامعه آماری تعیین شد؛ ۲۰ سامانه از شهرستان اراک و ۱۰ سامانه از شهرستان شازند به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. به‌کارگیری تخصیص

داد که سامانه‌های هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی با پایش بلادرنگ رطوبت خاک، شرایط گیاه و عوامل محیطی و تنظیم تطبیقی برنامه آبیاری موجب افزایش بهره‌وری آب و بهبود عملکرد محصول می‌شوند. یو و همکاران (Yu et al., 2025) در مطالعه‌ای مروری به بررسی نقش یادگیری عمیق در مدیریت آبیاری پرداختند و نشان دادند مدیریت آبیاری از روش‌های مبتنی بر تجربه به سمت تصمیم‌گیری مبتنی بر داده حرکت کرده است. موفق‌ترین سامانه‌ها آن‌هایی هستند که به‌طور مداوم اطلاعات فشار، رطوبت خاک و شرایط محیطی را پایش می‌کنند و نگهداری مناسب سامانه دقت تصمیم‌گیری را افزایش می‌دهد. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که موفقیت سامانه‌های نوین آبیاری تنها به کیفیت طراحی و اجرای فنی وابسته نیست، بلکه کیفیت خدمات پس از اجرا، آموزش بهره‌برداران و استمرار نظارت نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد بلندمدت سامانه‌ها دارند. پژوهش‌های مبتنی بر پرسشنامه در کشورهای مختلف نشان داده‌اند که رضایت بهره‌برداران ارتباط مستقیمی دارد با فراوانی بازدید کارشناسان، کیفیت توصیه‌های فنی، قابلیت اعتماد خدمات ترویجی و عدالت در مدیریت آب. افزایش تعامل کارشناسان با بهره‌برداران موجب بهبود کیفیت خدمات و افزایش رضایت کاربران شده است (Bopp et al., 2024; Agbokpanzo and Agossou, 2025; Kassem et al., 2021).

مرور مطالعات نشان می‌دهد که پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر ارزیابی فنی سامانه‌های آبیاری، توسعه فناوری‌های هوشمند و افزایش بهره‌وری آب متمرکز بوده‌اند و مطالعات اخیر نیز بر اهمیت پایش مستمر، تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و به‌کارگیری فناوری‌های نوین تأکید دارند. با این حال، پژوهش‌هایی که به‌صورت همزمان شاخص‌های فنی (مانند فشار کارکرد و رطوبت خاک) را در کنار ارزیابی دیدگاه و رضایت بهره‌برداران از برنامه‌های نظارت بر بهره‌برداری بررسی کرده باشند، همچنان محدود است. با وجود اجرای گسترده سامانه‌های نوین آبیاری در ایران، مطالعات اندکی به ارزیابی میدانی اثربخشی برنامه‌های نظارت بر بهره‌برداری و

انتخاب شدند. در تمامی مراحل، شاخص‌های فنی شامل فشار کارکرد سامانه و رطوبت حجمی خاک (۲۴ ساعت پس از آبیاری) با استفاده از روش‌ها و تجهیزات یکسان اندازه‌گیری شدند تا قابلیت مقایسه نتایج طی زمان حفظ شود. داده‌های این پژوهش از طریق بازدیدهای میدانی جمع‌آوری شد و هیچ‌یک از داده‌ها از منابع ثانویه یا گزارش‌های آرشویی استخراج نشد. در هر مرحله برای اندازه‌گیری‌ها از روش‌ها و تجهیزات یکسان و مطابق دستورالعمل فنی برنامه نظارت بر بهره‌برداری استفاده شد تا قابلیت مقایسه نتایج طی زمان حفظ شود. در هر سامانه فشار کارکرد از سه نقطه شامل ابتدا، میانه و انتهای خط جانبی با استفاده از مانومتر عقبه‌ای اندازه‌گیری و میانگین قرائت‌ها به‌عنوان فشار نماینده سامانه در نظر گرفته شد. رطوبت حجمی خاک نیز ۲۴ ساعت پس از آبیاری از سه نقطه ابتدا، میانه و انتهای خط جانبی در ناحیه توسعه ریشه و در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری با نمونه‌برداری و به روش وزنی اندازه‌گیری و میانگین سه قرائت به‌عنوان مقدار نهایی هر سامانه ثبت گردید. برای کاهش اثر تغییرات زمانی و شرایط محیطی، اندازه‌گیری‌ها در شرایط متعارف بهره‌برداری سامانه‌ها و در فصل زراعی مربوط به هر سامانه در نظر گرفته شد. اطلاعات مورد نیاز از سه منبع اصلی شامل بررسی اسناد و دفترچه‌های طراحی و اجرای هر طرح، بازدیدهای میدانی و اندازه‌گیری شاخص‌های فنی و تکمیل پرسشنامه از طریق مصاحبه با بهره‌برداران گردآوری شد.

در بازدیدهای میدانی، علاوه بر متغیرهای اصلی پژوهش شامل فشار کارکرد سامانه و رطوبت حجمی خاک، برخی شاخص‌های فنی مانند فشار آبپاش یا قطره‌چکان، دبی خروجی، وضعیت عملکرد پمپ، هدایت الکتریکی آب آبیاری، سرعت باد و یکنواختی توزیع آب نیز به‌منظور کنترل شرایط بهره‌برداری و حصول اطمینان از درست‌بودن اندازه‌گیری‌ها ثبت شدند. با این حال، تحلیل آماری این پژوهش بر دو شاخص اصلی فشار کارکرد و رطوبت حجمی خاک متمرکز است. با توجه به اینکه فشار کارکرد در سامانه‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای تابع نوع سامانه، مشخصات طراحی و

متناسب موجب شد ترکیب نمونه از نظر توزیع جغرافیایی با ساختار جامعه آماری همخوانی داشته باشد و انتخاب تصادفی در داخل هر طبقه نیز احتمال سوگیری انتخاب را کاهش دهد و احتمال سوگیری انتخاب به حداقل برسد. پس از انتخاب نمونه‌ها، هر سامانه در چهار مرحله شامل زمان اجرای نظارت اولیه (مرحله پایه)، مرحله اول، مرحله دوم و مرحله سوم پس از نظارت ارزیابی گردید. در هر مرحله، شاخص‌های فنی شامل فشار کارکرد سامانه و رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری شد. در این پژوهش، فشار کارکرد سامانه به‌عنوان مهم‌ترین شاخص فنی عملکرد انتخاب شد، زیرا فشار عامل اصلی تعیین‌کننده عملکرد هیدرولیکی سامانه‌های آبیاری تحت فشار است و به‌طور مستقیم بر دبی خروجی قطره‌چکان‌ها یا آبپاش‌ها، یکنواختی توزیع آب، راندمان کاربرد آب و سرانجام وضعیت رطوبت خاک در ناحیه ریشه تأثیر می‌گذارد. از این‌رو، فشار کارکرد به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد سامانه‌های نوین آبیاری در استانداردهای بین‌المللی و دستورالعمل‌های ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبیاری معرفی شده است و اندازه‌گیری آن مبنای اصلی قضاوت درباره وضعیت بهره‌برداری و نگهداری سامانه محسوب می‌شود.

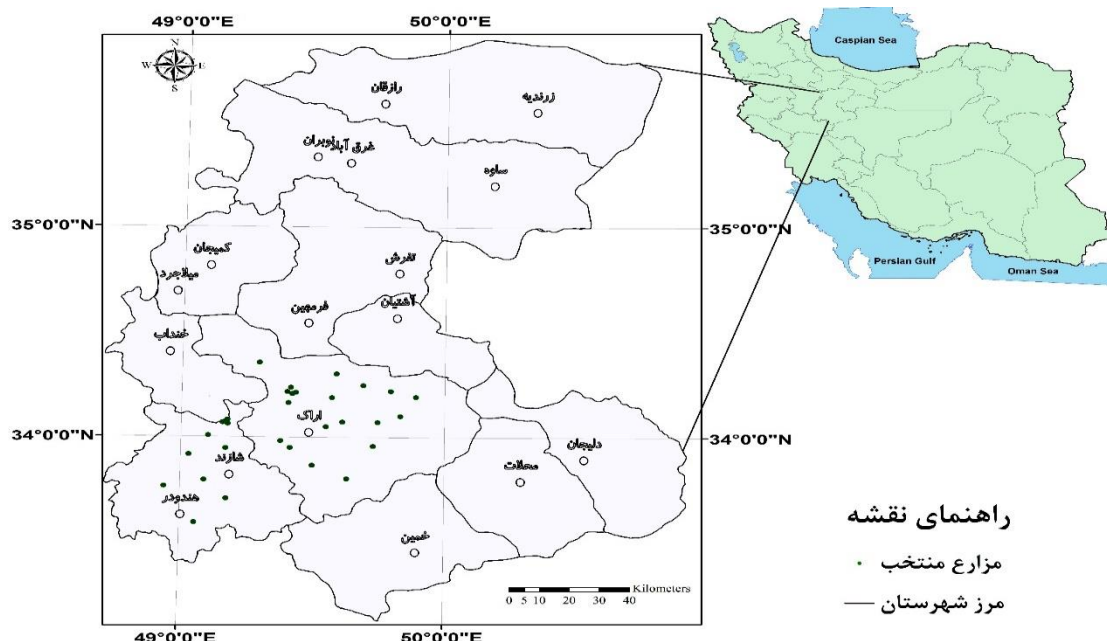
نخستین ارزیابی در زمان اجرای برنامه نظارت بر بهره‌برداری و در ابتدای فصل زراعی صورت گرفت و به‌عنوان مرحله پایه در نظر گرفته شد. در این مرحله، کارشناسان برنامه نظارت بر بهره‌برداری ضمن بازدید فنی سامانه‌ها، شاخص‌های عملکردی شامل فشار کارکرد و رطوبت حجمی خاک را اندازه‌گیری کردند و توصیه‌های فنی لازم را در زمینه بهره‌برداری، تنظیم فشار، نگهداری و سرویس تجهیزات به بهره‌برداران ارائه دادند. به‌منظور ارزیابی پایداری عملکرد سامانه‌ها پس از اجرای توصیه‌های فنی، سه مرحله پایش در سال بعد برای تمامی سامانه‌های منتخب اجرا شد. این مراحل به‌ترتیب شامل ابتدای فصل زراعی، اواسط فصل زراعی و پایان دوره کشت بودند. این زمان‌ها با هدف بررسی تغییرات عملکرد سامانه‌ها در مراحل مختلف فصل زراعی و ارزیابی میزان حفظ شرایط بهره‌برداری در دوره کشت

تجهیزات مورد استفاده است، هدف آن نبود که بین انواع سامانه‌ها فشار مطلق مقایسه شود. در عوض، هر سامانه به‌عنوان واحد آزمایشی مستقل در نظر گرفته شد و تغییرات فشار کارکرد آن در چهار مرحله متوالی پایش ارزیابی گردید. بنابراین، تحلیل‌ها بر اساس تغییرات زمانی هر سامانه نسبت به وضعیت پایه بود و بدین ترتیب نتایج بیانگر اثر برنامه نظارت بر پایداری عملکرد سامانه‌ها است نه تفاوت فشار طراحی بین سامانه‌های مختلف. همچنین اطلاعات مربوط به وضعیت نگهداری تجهیزات، نحوه بهره‌برداری، برنامه آبیاری و میزان آشنایی بهره‌برداران با اصول مدیریت سامانه ثبت شد.

علاوه بر اندازه‌گیری شاخص‌های فنی، از پرسشنامه نیز برای شناسایی دیدگاه بهره‌برداران درباره عوامل مؤثر بر موفقیت بهره‌برداری از سامانه‌های نوین آبیاری استفاده شد. جامعه آماری این بخش شامل تمامی بهره‌برداران سامانه‌های منتخب بود و برای هر یک از ۳۰ سامانه مورد مطالعه، یک پرسشنامه توسط بهره‌بردار اصلی تکمیل شد؛ بنابراین، در مجموع ۳۰ پرسشنامه مبنای تحلیل قرار گرفت. پرسشنامه بر اساس هدف‌های پژوهش، مطالعات پیشین و شاخص‌های فنی مرتبط با بهره‌برداری و نگهداری سامانه‌های نوین آبیاری طراحی شد. پرسشنامه شامل سؤالات مختلفی در زمینه‌های آموزش، مدیریت، توصیه‌های فنی ناظر، بهره‌وری و صرفه‌جویی حاصل از نظارت بر بهره‌برداری بود. روایی محتوایی پرسشنامه از طریق بررسی و اصلاح آن بر اساس نظر اعضای هیئت علمی و کارشناسان متخصص در حوزه آبیاری و سامانه‌های نوین آبیاری تأیید شد. به این ترتیب که نتایج عینی حاصل از اندازه‌گیری شاخص‌های فنی در کنار دیدگاه بهره‌برداران درباره عوامل مؤثر بر بهره‌برداری تفسیر شد تا امکان شناسایی همزمان نقاط قوت، محدودیت‌ها و نیازهای مدیریتی سامانه‌های نوین آبیاری فراهم شود. به‌منظور ارزیابی پایایی پرسشنامه، از ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد.

طرح‌های منتخب دامنه نسبتاً گسترده‌ای از سامانه‌های نوین آبیاری را در بر می‌گرفتند که شامل آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک، سنترپیوت، لینیر (خطی) و آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) بود. این تنوع امکان مقایسه عملکرد انواع مختلف سامانه‌ها و بررسی چالش‌های بهره‌برداری هر یک را فراهم ساخت. اگرچه سامانه‌های مورد مطالعه شامل انواع مختلف آبیاری تحت فشار بودند، نوع سامانه به‌عنوان عامل مستقل در مدل آماری وارد نشد زیرا هدف پژوهش مقایسه روش‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای نبود، بلکه ارزیابی تغییرات عملکرد سامانه‌های منتخب تحت برنامه نظارت در طول زمان بود. علاوه بر این، توزیع انواع سامانه‌ها در دو شهرستان متوازن نبود و ورود این عامل به مدل می‌توانست موجب کاهش توان آماری و پیچیده‌تر شدن تفسیر نتایج شود.

سامانه‌های مورد مطالعه از نظر سطح تحت پوشش، نوع منبع تأمین آب، نوع پمپ، فشار طراحی، دبی طراحی و شرایط بهره‌برداری به‌طور قابل توجهی متنوع‌اند. منابع تأمین آب عمدتاً شامل چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق و در برخی موارد قنات است. سطح اراضی تحت پوشش هر سامانه از حدود ۱۴ تا بیش از ۷۴ هکتار متغیر است و فشار طراحی سامانه‌ها بسته به نوع سیستم بین حدود ۲۲ تا بیش از ۷۷ متر ستون آب تغییر می‌کند. برای ارزیابی عملکرد طرح‌ها، شاخص‌های انطباق فشار و دبی واقعی با مقادیر طراحی، وضعیت عملکرد ایستگاه پمپاژ، یکنواختی توزیع آب، وضعیت نگهداری تجهیزات، کیفیت بهره‌برداری توسط کشاورزان، مدیریت برنامه آبیاری، وضعیت رطوبت خاک پس از آبیاری و میزان آگاهی بهره‌برداران از اصول بهره‌برداری و نگهداری سامانه بررسی گردید. به‌منظور ارائه تصویری جامع از داده‌های مورد استفاده در پژوهش، خلاصه مشخصات داده‌های مورد استفاده در پژوهش و روش جمع‌آوری آن‌ها در (جدول ۱) ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی سامانه‌های آبیاری تحت فشار منتخب

Fig. 1- Geographical location of the selected pressurized irrigation systems

جدول ۱- خلاصه مشخصات داده‌ها و روش جمع‌آوری اطلاعات پژوهش

Table 1- Summary of Research Data Specifications and Data Collection Methods

شرح Description	مؤلفه Component
شهرستان‌های اراک و شازند، استان مرکزی Arak and Shazand counties, Markazi province	محل اجرای پژوهش Study Area
۵۴ سامانه تحت برنامه نظارت بر بهره‌برداری (۳۴ سامانه در اراک و ۲۰ سامانه در شازند)	جامعه آماری سامانه‌ها Statistical population of systems
54 systems under operation monitoring program (34 systems in Arak and 20 systems in Shazand)	
۳۰ سامانه (۲۰ سامانه در اراک شامل ۱۷ سامانه بارانی و ۳ سامانه قطره‌ای و ۱۰ سامانه در شازند شامل ۸ سامانه بارانی و ۲ سامانه قطره‌ای)	تعداد سامانه‌های نمونه Number of sample systems
30 systems (20 systems in Arak including 17 sprinkler systems and 3 drip systems and 10 systems in Shazand including 8 sprinkler systems and 2 drip systems)	
نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌بندی شده با تخصیص متناسب Strategic random sampling with proportional allocation Irrigation system	روش نمونه‌گیری Sampling method
سامانه آبیاری Irrigation system	واحد تحلیل فنی Technical analysis unit
چهار مرحله (داده پایه مربوط به زمان اجرای برنامه نظارت، ابتدای فصل، اواسط فصل و پایان دوره کشت)	تعداد مراحل اندازه‌گیری Number of measurement steps
Four stages (baseline data related to the time of implementation of the monitoring program, beginning of the season, middle of the season and end of the cultivation period)	
فشار کارکرد سامانه، رطوبت وزنی خاک System operating pressure, soil moisture	شاخص‌های فنی اندازه‌گیری شده Measured technical indicators
بهره‌برداران سامانه‌های منتخب Selected system users	جامعه آماری پرسشنامه Questionnaire statistical population
۳۰ پرسشنامه 30 questionnaires	تعداد پرسشنامه‌های تکمیل شده Number of completed questionnaires
۲۴ سؤال 24 questions	تعداد گویه‌های پرسشنامه Number of questionnaire items
روایی محتوایی با نظر متخصصان Content validity with expert opinion	بررسی روایی Validity assessment
آلفای کرونباخ Cronbach's Alpha	بررسی پایایی Reliability assessment

$$F = \frac{MSEffect}{MSError} \quad (2)$$

که در آن MSEffect میانگین مربعات عامل مورد بررسی (زمان، شهرستان یا اثر متقابل)، و MSError میانگین مربعات خطاست. برای تعیین شدت اثر هر عامل از مجذور اتای جزئی^۲ استفاده شد (Field, 2018).

$$\eta_p^2 = \frac{SSEffect}{SSEffect + SSError} \quad (3)$$

که در آن SSEffect مجموع مربعات عامل مورد بررسی، و SSError مجموع مربعات خطاست. حدود مورد نظر برای η_p^2 به این صورت است که وقتی مقدار اتا حدود ۰/۰۱ باشد، اما زمانی که مقدار اتا حدود ۰/۰۶ باشد اثر متوسط و زمانی که مقدار اتا حدود ۰/۱۴ باشد اثر زیاد است. در صورت معنی‌دار بودن اثر زمان، میانگین‌ها با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شد. به-علاوه، میانگین، انحراف معیار، خطای استاندارد و ضریب تغییرات برای توصیف داده‌ها محاسبه گردید. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی و اطلاعات پرسشنامه‌ای به‌صورت تلفیقی تجزیه و تحلیل شدند تا نقاط قوت و ضعف بهره‌برداری از سامانه‌های نوین آبیاری مشخص شود. برای تجزیه و تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار (SPSS Version 26) استفاده شد.

به‌منظور تفسیر جامع نتایج، یافته‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی و نتایج پرسشنامه به‌صورت تلفیقی بررسی شدند. در این رویکرد، نتایج پرسشنامه صرفاً برای تفسیر و توضیح یافته‌های فنی به کار رفت و هیچ‌گونه آزمون آماری برای بررسی رابطه علی بین متغیرهای پرسشنامه و شاخص‌های فنی اجرا نشد. برای سنجش میزان اهمیت و رضایت بهره‌برداران از عوامل مؤثر بر موفقیت بهره‌برداری از سامانه‌های نوین آبیاری، از طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت استفاده شد (León-Mantero et al., 2020). مقیاس لیکرت یکی از روش‌های متداول برای سنجش نگرش، اهمیت و میزان رضایت پاسخ‌دهندگان است. گزینه‌های پاسخ از خیلی کم تا

پیش از اجرای تحلیل واریانس پیش‌فرض‌های لازم بررسی شد. نرمال بودن متغیرهای وابسته (فشار کارکرد و رطوبت حجمی خاک) در هر یک از مراحل اندازه‌گیری با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk بررسی و ارزیابی شد و داده‌ها از نظر وجود مقادیر پرت بررسی شدند. علاوه بر این، هیچ داده مفقودی در مراحل اندازه‌گیری وجود نداشت و تمامی سامانه‌های انتخاب‌شده در چهار مرحله پایش شدند؛ بنابراین، شرط کامل بودن داده‌ها، که از الزام‌های تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های تکراری است، برقرار بود. مطالعات روش‌شناسی نیز نشان داده‌اند که طرح‌های اندازه‌گیری‌های تکراری، به دلیل استفاده از هر واحد آزمایشی به‌عنوان شاهد خود، نسبت به طرح‌های مستقل توان آماری بیشتری دارند و با حجم نمونه کمتر نیز می‌توانند اثرهای واقعی را شناسایی کنند (Muhammad, 2023). به‌منظور بررسی همزمان اثر زمان، شهرستان و برهم‌کنش زمان × شهرستان بر شاخص‌های فنی شامل فشار کارکرد سامانه و رطوبت خاک، از تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های تکراری دو عاملی^۱ استفاده شد. در این مدل، زمان به‌عنوان عامل درون‌آزمودنی با چهار سطح شامل داده پایه (زمان اجرای برنامه نظارت)، ابتدای فصل زراعی، اواسط فصل زراعی و پایان دوره کشت و شهرستان (اراک و شازند) به‌عنوان عامل بین‌آزمودنی در نظر گرفته شد. مدل آماری مورد استفاده به‌صورت رابطه ۱ بیان می‌شود.

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + S_k(j) + \epsilon_{ijk} \quad (1)$$

که در آن Y_{ijk} مقدار مشاهده‌شده متغیر پاسخ برای سامانه k در شهرستان j و زمان i ، میانگین کل، α_i اثر ثابت β_j ، $(i=1, \dots, 4)$ اثر ثابت شهرستان $(j=1, 2)$ ، $(\alpha\beta)_{ij}$ اثر متقابل زمان و شهرستان، $S_k(j)$ اثر تصادفی سامانه k در داخل شهرستان j ، و ϵ_{ijk} خطای تصادفی است. برای بررسی معنی‌داری اثر زمان، آماره F از رابطه زیر محاسبه شد (Field, 2018).

^۱. Mixed Repeated Measures ANOVA

^۲. Partial Eta Squared

نظری امتیاز برابر با ۴ محاسبه شد ($R=5-1=4$). برای تعیین سطوح اهمیت یا رضایت، این دامنه به پنج طبقه با عرض مساوی تقسیم شد. بنابراین عرض هر طبقه برابر بود با ۰/۸. بر این اساس، طبقات امتیاز به صورت (جدول ۲) تعریف شدند. این روش در مطالعات مبتنی بر مقیاس لیکرت برای تفسیر میانگین امتیازها به طور گسترده استفاده می‌شود (Boone and Sullivan and Artino, 2013). لازم است یادآوری شود طبقه‌بندی امتیازها صرفاً به منظور تسهیل تفسیر نتایج توصیفی است و از آنجا که هدف این پژوهش اندازه‌گیری دیدگاه بهره‌برداران و تحلیل پاسخ‌های آنان است، نیازی به استفاده از روش دلفی وجود نداشت، زیرا روش دلفی عمدتاً برای دستیابی به اجماع خبرگان، توسعه شاخص‌ها یا اعتبارسنجی آن‌ها در چندین دور نظرخواهی به کار می‌رود و با هدف‌های این پژوهش تفاوت دارد.

خیلی زیاد به ترتیب دارای امتیازهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ در نظر گرفته شدند. با توجه به ماهیت ترتیبی گویه‌های لیکرت، نحوه تحلیل آماری و تفسیر نتایج با توجه به ساختار داده‌ها و هدف پژوهش انتخاب شد (Norman, 2010). بنابراین، برای هر گویه، امتیاز وزنی از رابطه ۴ محاسبه شد:

$$WS_i = \frac{\sum_{j=1}^5 n_{ij} w_j}{N} \quad (4)$$

که در آن WS_i امتیاز وزنی گویه i ، n_{ij} تعداد پاسخ‌های دریافت‌شده برای گزینه j ، w_j وزن اختصاص‌یافته به گزینه j (از ۱ تا ۵)، و N تعداد کل پاسخ‌دهندگان است. به منظور تبدیل امتیاز وزنی به درصد، از رابطه ۵ استفاده شد:

$$PI_i = \frac{WS_i}{5} \times 100 \quad (5)$$

که در آن PI_i شاخص درصدی گویه i است. از آنجا که حداقل امتیاز نظری برابر ۱ و حداکثر آن برابر ۵ بود، دامنه

جدول ۲- طبقات امتیاز و سطوح اهمیت/رضایت در مقیاس پنج‌درجه‌ای پرسشنامه

Table 2- Score classes and levels of importance/satisfaction in the five-point scale of the questionnaire

سطح رضایت/اهمیت satisfaction/importance level	دامنه امتیاز میانگین Average score range
بسیار کم Very Low	1.00–1.80
کم Low	1.81–2.60
متوسط Moderate	2.61–3.40
زیاد High	3.41–4.20
بسیار زیاد Very high	4.21–5.00

نتایج و بحث

توانسته‌اند پس از دریافت آموزش‌ها، تنظیمات هیدرولیکی سامانه را تا حد زیادی حفظ کنند. آمار توصیفی فشار کارکرد سامانه‌های آبیاری در چهار مرحله اندازه‌گیری در (جدول ۳) ارائه شده است. نتایج (جدول ۳) نشان می‌دهد که میانگین فشار کارکرد سامانه‌های آبیاری در زمان اجرای برنامه نظارت ۴۲/۳۳ متر ستون آب بوده است. پس از پایان دوره نظارت، میانگین فشار در مراحل اول، دوم و سوم به ترتیب به ۳۹/۷۳، ۴۰/۳۰ و ۳۹/۹۷ متر ستون آب کاهش یافت. این روند بیانگر کاهش تدریجی فشار

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد سامانه‌های نوین آبیاری، فشار کاری سیستم است زیرا هرگونه انحراف از فشار طراحی موجب کاهش یکنواختی توزیع آب، افت راندمان کاربرد آب و کاهش عملکرد محصول می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که در اغلب سامانه‌های مورد بررسی، فشار اندازه‌گیری‌شده در بازدیدهای پس از نظارت اختلاف اندکی با فشار ثبت‌شده در زمان اجرای برنامه نظارت دارد. این موضوع بیانگر آن است که بهره‌برداران

کارکرد پس از پایان دوره نظارت است. این نتایج بیانگر کاهش حدود ۲ تا ۳ متر ستون آب نسبت به زمان نظارت است، اما میانگین فشار در سه مرحله پس از نظارت تغییرات اندکی داشته و در محدوده نسبتاً پایداری باقی مانده است. با این حال، صرف مشاهده تفاوت در میانگین‌ها برای قضاوت کردن درباره وجود اختلاف واقعی بین مراحل اندازه‌گیری کافی نیست و لازم است این اختلاف‌ها از طریق آزمون‌های آماری ارزیابی شوند. از این رو، این آمار توصیفی زمینه لازم را برای اجرای تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های تکراری فراهم می‌کند تا مشخص شود آیا اختلاف مشاهده‌شده بین مراحل مختلف اندازه‌گیری از نظر آماری نیز معنی‌دار است یا نه.

جدول ۳- آمار توصیفی فشار کارکرد سامانه‌های آبیاری در مراحل مختلف اندازه‌گیری

Table 3- Descriptive statistics of the operating pressure of irrigation systems at different measurement stages

ضریب تغییرات (%) Coefficient of Variation (%)	حداکثر maximum	حداقل Minimum	خطای استاندارد Standard error	انحراف معیار Standard deviation	میانگین فشار (m) Average pressure (m)	مرحله اندازه‌گیری Measurement stage
20.05	64	20	1.55	8.49	42.33	زمان نظارت Monitoring stage
14.70	47	17	1.07	5.84	39.73	مرحله ۱ بعد از نظارت Stage 1 after monitoring
15.56	50	20	1.14	6.27	40.30	مرحله ۲ بعد از نظارت Stage 2 after monitoring
17.27	53	18	1.26	6.90	39.97	مرحله ۳ بعد از نظارت Stage 3 after monitoring

اختلاف صرفاً بیانگر تفاوت مقادیر اندازه‌گیری‌شده در دو شهرستان است و نمی‌توان آن را تنها به عامل شهرستان نسبت داد زیرا عواملی مانند نوع سامانه آبیاری، مشخصات طراحی هیدرولیکی، فشار طراحی، وضعیت پمپ، اختلاف ارتفاع و شرایط بهره‌برداری نیز می‌توانند بر فشار کارکرد سامانه‌ها مؤثر باشند. از آنجا که این متغیرها در قالب عوامل مستقل وارد مدل آماری نشدند، امکان نسبت دادن اختلاف فشار صرفاً به عامل شهرستان وجود ندارد. زمان اندازه‌گیری اثر معنی‌داری بر فشار کارکرد سامانه‌های آبیاری داشت (Partial $\eta^2=0.15$, $P=0.003$, $F(3,87)=4.94$). میانگین فشار از ۴۲/۳۳ متر در زمان نظارت به ۳۹/۷۳، ۴۰/۳۰ و ۳۹/۹۷ متر در مراحل اول، دوم و سوم کاهش یافت. این یافته نشان می‌دهد که تغییرات فشار طی دوره ارزیابی معنی‌دار بوده است، اگرچه معنی‌دار نبودن اثر متقابل زمان و شهرستان نشان داد که روند تغییرات فشار طی زمان در شهرستان تقریباً الگوی مشابهی داشته است.

(جدول ۴) نتایج تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های تکراری دو عاملی را برای فشار کارکرد سامانه‌های آبیاری نشان می‌دهد. در این تحلیل، زمان به‌عنوان عامل درون‌آزمودنی و شهرستان به‌عنوان عامل بین‌آزمودنی در نظر گرفته شد. هدف از این تحلیل عبارت بود از بررسی اثر زمان، اختلاف بین شهرستان‌ها و همچنین برهم‌کنش زمان و شهرستان بر تغییرات فشار کارکرد سامانه‌ها. لازم است گفته شود مبنای تحلیل حاضر سامانه‌های منتخب تحت برنامه نظارت است و نوع سامانه آبیاری (بارانی یا قطره‌ای) به‌عنوان عامل مستقل در مدل وارد نشده است؛ بنابراین، نتایج باید در چارچوب هدف‌های پژوهش و ویژگی‌های نمونه مورد بررسی تفسیر شوند. نتایج تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های تکراری فشار کارکرد سامانه‌های آبیاری (جدول ۴) نشان داد اگرچه میانگین فشار کارکرد در شهرستان شازند در تمام مراحل بالاتر از اراک بود، اثر شهرستان بر فشار کارکرد از نظر آماری معنی‌دار ($P=0.92$) نیست. با این حال، این

جدول ۴- نتایج تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های تکراری فشار کارکرد سامانه‌های آبیاری

Table 4- The results of variance analysis with repeated measurements of the operating pressure of irrigation systems

Partial η^2	P-value	F	df	منبع تغییرات Source of changes
0.15	0.003	4.94	3	زمان Time
0.009	0.92	0.009	1	شهرستان City
0.001	0.997	0.017	3	زمان×شهرستان City×Time

می‌دهد پس از افت اولیه، تغییر محسوسی در عملکرد هیدرولیکی سامانه‌ها رخ نداده است. این یافته بر اهمیت تداوم نظارت پس از بهره‌برداری، بازدیدهای دوره‌ای، آموزش مستمر بهره‌برداران و اجرای منظم نگهداری و سرویس تجهیزات تأکید می‌کند و نشان می‌دهد استمرار این اقدامات می‌تواند از تشدید افت عملکرد سامانه‌ها طی زمان جلوگیری کند.

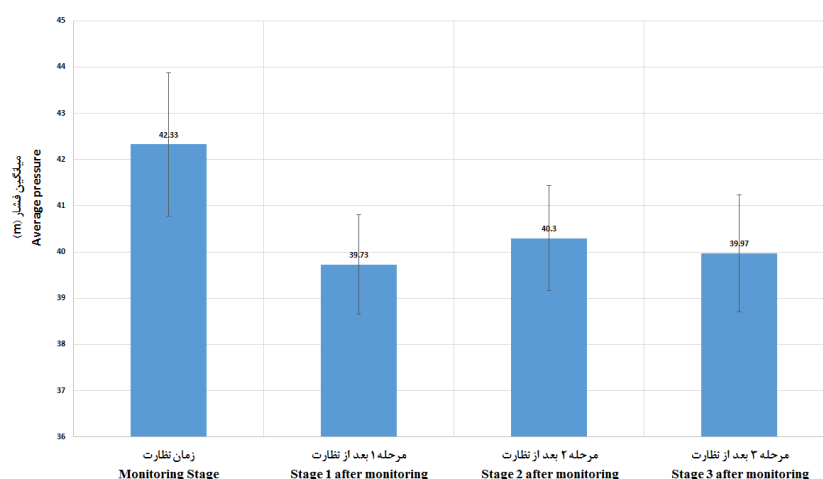
مقایسه فشار کارکرد سامانه‌های آبیاری بین شهرستان‌های اراک و شازند نشان می‌دهد اگرچه میانگین فشار در برخی مراحل اندازه‌گیری بین دو شهرستان متفاوت است اما این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار ($P>0.05$) نیست. این نتیجه نشان می‌دهد برنامه نظارت و شرایط بهره‌برداری در هر دو شهرستان عملکرد نسبتاً مشابهی داشته و اختلاف‌های مشاهده‌شده بیشتر ناشی از تغییرات طبیعی بین سامانه‌ها بوده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اجرای برنامه نظارت در هر دو منطقه به حفظ عملکرد هیدرولیکی سامانه‌ها کمک کرده و اثر آن مستقل از موقعیت جغرافیایی شهرستان بوده است. این یافته‌ها با نتایج مطالعات احمدآلی و همکاران (Ahmadaali et al., 2018)، حمدی و همکاران (Louie and Selker, 2000) همخوانی دارد. این محققان می‌گویند حفظ فشار طراحی از مهم‌ترین عوامل افزایش یکنواختی توزیع آب و کاهش تلفات آبیاری است.

نتایج مقایسه‌های زوجی میانگین فشار کارکرد سامانه‌های آبیاری (جدول ۵) نشان می‌دهد میانگین فشار در زمان اجرای برنامه نظارت در مقایسه با مرحله اول، مرحله دوم و مرحله سوم به ترتیب ۲/۶۰، ۲/۰۳ و ۲/۳۷ متر ستون آب بیشتر است که در مقایسه با مراحل اول، دوم و سوم معنی‌دار (به ترتیب $P=0.01$ ، $P=0.002$ و $P=0.0005$) است. اختلاف فشار بین مراحل اول، دوم و سوم پس از نظارت معنی‌دار ($P>0.05$) نیست. بنابراین، کاهش فشار کارکرد عمدتاً در فاصله بین زمان نظارت و دوره پس از آن رخ داده و پس از کاهش اولیه، فشار سامانه‌ها در سطح نسبتاً پایداری باقی مانده است. میانگین فشار از ۴۲/۳۳ متر ستون آب در زمان نظارت به حدود ۴۰ متر ستون آب در مراحل بعدی کاهش یافته است که معادل افت ۵ تا ۶ درصد است. با توجه به میانگین فشار اندازه‌گیری‌شده، این کاهش الزاماً به معنای خروج سامانه‌ها از شرایط مناسب بهره‌برداری نیست، اما نشان می‌دهد توصیه‌های فنی ارائه‌شده در جریان برنامه نظارت، نقش مؤثری در حفظ عملکرد هیدرولیکی سامانه‌ها داشته و از کاهش شدید فشار در دوره بهره‌برداری جلوگیری کرده است. این تغییر می‌تواند با عواملی مانند تغییر شرایط بهره‌برداری، استهلاک تدریجی تجهیزات، کاهش دقت در تنظیم فشار و اجرای ناقص عملیات سرویس و نگهداری مرتبط باشد، هرچند با توجه به ماهیت این مطالعه نمی‌توان اثر هر یک از این عوامل را به‌طور مستقل اثبات کرد. از سوی دیگر، پایداری فشار بین سه مرحله پس از نظارت نشان

جدول ۵- مقایسه زوجی میانگین فشار کارکرد در مراحل مختلف اندازه‌گیری

Table 5 - Pairwise comparison of average operating pressure in different measurement stages

نتیجه Result	P-value	اختلاف میانگین (m) Mean Difference (m)	مقایسه مراحل Comparison of stages
معنی‌دار Significant	0.01	2.6	زمان نظارت - مرحله اول Monitoring stage - first stage
معنی‌دار Significant	0.0025	2.03	زمان نظارت - مرحله دوم Monitoring stage - the second stage
معنی‌دار Significant	0.0005	2.37	زمان نظارت - مرحله سوم Monitoring stage - the third stage
غیرمعنی‌دار Non significant	0.358	-0.57	مرحله اول - مرحله دوم First stage - second stage
غیرمعنی‌دار Non significant	0.75	-0.23	مرحله اول - مرحله سوم First stage - third stage
غیرمعنی‌دار Non significant	0.378	0.33	مرحله دوم - مرحله سوم Second stage - third stage



شکل ۲- مقایسه میانگین فشار اندازه‌گیری شده در زمان نظارت و سه مرحله بعد از نظارت

Fig. 2- Comparison of the average pressure during monitoring and three stages after monitoring

(شکل ۲) روند تغییرات میانگین فشار کارکرد سامانه‌های آبیاری را در چهار مرحله اندازه‌گیری نشان می‌دهد. در این شکل روند کلی نمودار بیانگر آن است که بیشترین کاهش فشار در فاصله بین زمان نظارت و مرحله اول رخ داده است؛ اما پس از آن، تغییرات فشار در مراحل دوم و سوم بسیار محدود بوده و میانگین فشار در محدوده‌ای تقریباً ثابت باقی مانده است. با این حال، نتایج مقایسه‌های زوجی نشان می‌دهد اختلاف بین مراحل اول، دوم و سوم از نظر آماری معنی‌دار ($P > 0.05$) نیست. بنابراین، این تغییرات را می‌توان نوسان‌های معمول بهره‌برداری دانست و نه نشانه‌ای از تغییر اساسی در عملکرد هیدرولیکی سامانه‌ها. از نظر آماری، مهم‌ترین یافته آن است که پس از کاهش اولیه نسبت به داده پایه، فشار کارکرد سامانه‌ها در سه مرحله پایش در محدوده‌ای نسبتاً پایدار باقی مانده و اختلاف معنی‌داری بین این مراحل مشاهده نشده است. این موضوع نشان می‌دهد عملکرد هیدرولیکی سامانه‌ها پس از اجرای برنامه نظارت دچار افت تدریجی و مستمر نشده است، بلکه در دامنه‌ای نسبتاً ثابت نوسان داشته است. از دیدگاه بهره‌برداری، حفظ میانگین فشار در حدود ۴۰ متر ستون آب در مراحل پس از نظارت نشان می‌دهد که سامانه‌های مورد بررسی همچنان در محدوده مناسب عملکرد قرار دارند و افت مشاهده‌شده به اندازه‌ای نبوده است که موجب اختلال جدی

اول است و تغییرات بعدی از نظر آماری معنی‌دار نیستند. نتایج تحقیق نشان داد که آموزش بهره‌برداران و نظارت مستمر موجب بهبود مدیریت زمان و مقدار آبیاری شده است و از وقوع آبیاری بیش از نیاز یا کم‌آبیاری جلوگیری کرده است.

نمودار میانگین تغییرات رطوبت در زمان نظارت و بعد از نظارت در شکل (۳) نشان داده شده است. روند تغییرات نشان می‌دهد رطوبت خاک پس از پایان دوره نظارت کاهش ملایمی پیدا کرده است. اختلاف میانگین بین زمان نظارت و مرحله سوم حدود $1/78$ واحد (معادل تقریباً $6/5$ درصد) است. یکی از نکات مهم این نتایج، افزایش قابل توجه پراکندگی داده‌ها در مرحله سوم است. انحراف معیار از $2/10$ درصد در زمان نظارت به $4/44$ درصد در مرحله سوم افزایش یافته و دامنه تغییرات نیز از $17/53$ تا $37/45$ درصد گسترش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد رفتار سامانه‌ها در مرحله سوم یکنواخت نیست و برخی بهره‌برداران موفق به حفظ رطوبت مناسب خاک شده‌اند، در حالی که در برخی دیگر، رطوبت خاک به میزان قابل توجهی کاهش یا افزایش یافته است. افزایش نوسان‌ها در مرحله سوم بیانگر آن است که در صورت نبود بازدیدهای دوره‌ای و پیگیری مستمر، احتمال فاصله گرفتن مدیریت آبیاری از شرایط بهینه افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، نتایج این بخش نشان می‌دهد برنامه نظارت توانسته است وضعیت رطوبتی خاک را در محدوده مطلوب حفظ کند، اما استمرار این وضعیت در بلندمدت نیازمند نظارت مستمر، آموزش دوره‌ای بهره‌برداران و ارزیابی منظم عملکرد سامانه‌های آبیاری است.

در طرح‌های شهرستان اراک اختلاف رطوبت خاک حدود $0/4$ - درصد و در شهرستان شازند حدود $0/1$ درصد است که نشان‌دهنده پایداری مناسب مدیریت آبیاری در هر دو منطقه است. اختلاف مشاهده‌شده در طرح‌های خصوصی ($0/7$ - درصد) نیز کمتر است تا در طرح‌های اشتراکی ($1/5$ درصد). این موضوع نشان می‌دهد مدیریت سامانه‌های خصوصی به دلیل وجود بهره‌بردار و تصمیم‌گیری متمرکز

در عملکرد هیدرولیکی سامانه‌ها شود. با این حال، کاهش اولیه فشار نسبت به زمان نظارت اهمیت بازدیدهای دوره‌ای، تنظیم مجدد فشار، سرویس تجهیزات و آموزش مستمر بهره‌برداران را برای جلوگیری از افت تدریجی عملکرد سامانه‌های نوین آبیاری نشان می‌دهد. اجرای برنامه نظارت موجب دستیابی سامانه‌ها به شرایط مطلوب فشار کارکرد شده است، اما برای حفظ این وضعیت در بلندمدت، استمرار برنامه‌های پایش و نگهداری ضروری است. این یافته با نتایج تحلیل آماری نیز همخوانی دارد، به‌گونه‌ای که اختلاف فشار بین زمان نظارت و مراحل پس از آن معنی‌دار است، در حالی که اختلاف بین مراحل پس از نظارت معنی‌دار نیست و بیانگر پایداری نسبی فشار کارکرد پس از کاهش اولیه است.

به‌منظور بررسی میزان موفقیت آموزش‌ها در اصلاح مدیریت آبیاری، رطوبت خاک 24 ساعت پس از آبیاری اندازه‌گیری شد. نتایج تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های تکراری آمیخته (جدول ۶) نشان می‌دهد اثر شهرستان بر رطوبت حجمی خاک معنی‌دار ($F(1,28)=0.76$, $P=0.39$, $\eta^2=0.026$) نیست، اگرچه میانگین رطوبت خاک در شهرستان اراک در تمامی مراحل اندکی بیشتر از شازند است. بنابراین، تفاوت مشاهده‌شده در میانگین رطوبت خاک بین دو شهرستان را نمی‌توان تفاوت معنی‌دار آماری در شرایط این مطالعه در نظر گرفت. در مقابل، اثر زمان بر رطوبت خاک معنی‌دار ($F(3,84)=3.92$, $P=0.01$, $\eta^2=0.12$) است. میانگین رطوبت خاک از $27/51$ درصد در زمان نظارت به $26/47$ ، $26/83$ و $25/72$ درصد در مراحل اول تا سوم کاهش یافته است. مقایسه‌های زوجی با اصلاح Bonferroni (جدول ۷) نشان می‌دهد تنها اختلاف بین زمان نظارت و مرحله اول معنی‌دار است (اختلاف میانگین $1/04$ درصد، $P=0.027$)، در حالی که اختلاف بین زمان نظارت و مراحل دوم و سوم و همچنین اختلاف بین مراحل پس از نظارت معنی‌دار ($P>0.05$) نیست. بنابراین، اگرچه روند کلی کاهش رطوبت خاک در دوره پایش مشاهده شد، شواهد آماری نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار عمدتاً در فاصله بین زمان نظارت و مرحله

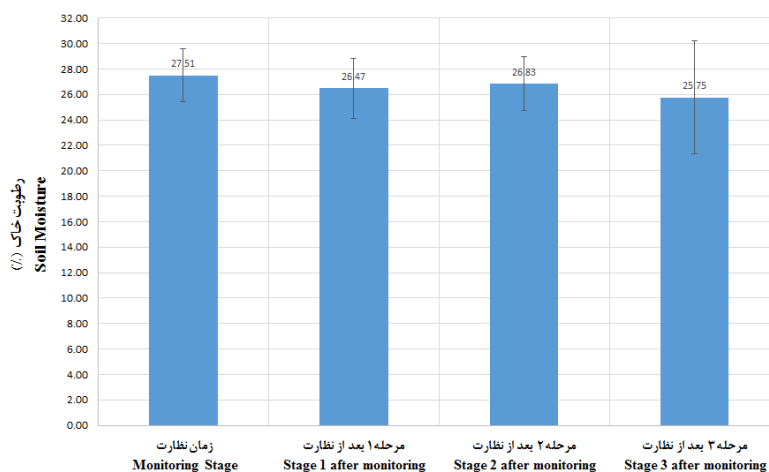
آسان‌تر بوده است و آموزش‌ها اثربخشی بیشتری داشته‌اند، (Mahboubi *et al.*, 2013) و دویی و سریواستوا (Dubey *et al.*, 2007) در حالی که در سامانه‌های اشتراکی هماهنگی بین بهره‌برداران دشوارتر است. این نتایج با یافته‌های اسلام‌پور و همکاران (Islampour *et al.*, 2012)، فرحزا و نظری معرفی کرده‌اند. (Farahza and Nazari, 2020)، محبوبی و همکاران

جدول ۶- نتایج تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های تکراری میانگین رطوبت خاک سامانه‌های آبیاری
Table 6- Results of analysis of variance with repeated measurements of average soil moisture of irrigation systems

Partial η^2	P-value	F	df	منبع تغییرات Source of changes
0.12	0.011	3.92	3	زمان Time
0.026	0.39	0.76	1	شهرستان City
0.001	0.98	0.041	3	زمان×شهرستان City×Time

جدول ۷- مقایسه زوجی میانگین رطوبت خاک در مراحل مختلف اندازه‌گیری
Table 7- Pairwise comparison of average soil moisture in different measurement stages

نتیجه Result	P-value	اختلاف میانگین (m) Mean Difference (m)	مقایسه مراحل Comparison of stages
معنی‌دار Significant	0.02	1.04	زمان نظارت - مرحله اول Monitoring stage - first stage
غیرمعنی‌دار Non significant	0.38	0.7	زمان نظارت - مرحله دوم Monitoring stage - the second stage
غیرمعنی‌دار Non significant	0.22	1.8	زمان نظارت - مرحله سوم Monitoring stage - the third stage
غیرمعنی‌دار Non significant	0.99	-0.35	مرحله اول - مرحله دوم First stage - second stage
غیرمعنی‌دار Non significant	0.99	-0.75	مرحله اول - مرحله سوم First stage - third stage
غیرمعنی‌دار Non significant	0.37	1.1	مرحله دوم - مرحله سوم Second stage - third stage



شکل ۳- مقایسه میانگین رطوبت خاک اندازه‌گیری شده ۲۴ ساعت بعد از آبیاری در زمان نظارت و سه مرحله بعد از نظارت
Fig. 3 - Comparison of average soil moisture 24 hours after irrigation during monitoring and three stages after monitoring

داشته باشد. فراوانی بالای پاسخ‌های مثبت در پرسش‌های مرتبط با تنظیم فشار، برنامه‌ریزی آبیاری، نگهداری تجهیزات و مدیریت سامانه نشان می‌دهد حضور مستمر کارشناسان ناظر و ارائه توصیه‌های اجرایی موجب افزایش آگاهی بهره‌برداران و بهبود مدیریت بهره‌برداری شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد میانگین فشار کارکرد سامانه‌ها از $42/33$ متر ستون آب در داده پایه به $39/73$ ، $40/30$ و $39/97$ متر ستون آب در سه مرحله پایش کاهش یافته است. اگرچه این کاهش نسبت به داده پایه از نظر آماری معنی‌دار است اما اختلاف بین مراحل اول، دوم و سوم معنی‌دار نیست؛ این موضوع بیانگر پایداری نسبی عملکرد هیدرولیکی سامانه‌ها پس از کاهش اولیه است. میانگین رطوبت خاک از $27/51$ درصد در داده پایه به $26/47$ ، $26/83$ و $25/72$ درصد در مراحل بعدی رسید و اگرچه روندی کاهشی مشاهده می‌شود، تغییرات در دامنه محدودی باقی مانده است. از سوی دیگر، نتایج پرسشنامه نشان می‌دهد آموزش بهره‌برداران، نگهداری و سرویس دوره‌ای تجهیزات، تداوم خدمات فنی، بازدیدهای منظم کارشناسان و پایش مستمر سامانه‌ها بالاترین امتیاز را از دیدگاه بهره‌برداران دارند. همزمانی این نتایج با پایداری نسبی شاخص‌های فنی نشان می‌دهد بهره‌برداران استمرار آموزش و خدمات فنی را از عوامل مؤثر در حفظ عملکرد سامانه‌ها می‌دانند، هرچند پژوهش حاضر این رابطه را به صورت علیّ آزمون نکرده است. این یافته‌ها با نتایج مطالعات اشرف و همکاران (Ashraf et al., 2019) و رحمان و همکاران (Rahman, et al., 2018) همخوانی دارد که گفته‌اند آموزش بهره‌برداران، بازدیدهای دوره‌ای و ارائه خدمات فنی پس از نصب سامانه موجب بهبود مدیریت بهره‌برداری و پایداری عملکرد سامانه‌های آبیاری تحت فشار می‌شود. نتایج این تحقیق همچنین با یافته‌های یو و همکاران (Yu et al., 2025) و اگوزتورک (Oğuztürk, 2025) همخوانی دارد که پایش مستمر شاخص‌های فنی را یکی از ارکان مدیریت نوین آبیاری معرفی می‌کنند. با این حال، برخلاف مطالعات مذکور که عمدتاً بر ارزیابی عملکرد

مقایسه عملکرد سامانه‌های خصوصی و اشتراکی نشان می‌دهد سامانه‌های خصوصی در اغلب شاخص‌های ارزیابی، از جمله حفظ فشار طراحی و مدیریت رطوبت خاک، عملکرد مناسب‌تری نسبت به سامانه‌های اشتراکی دارند. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان در سهولت تصمیم‌گیری، مسئولیت‌پذیری بیشتر بهره‌بردار و هماهنگی بهتر در بهره‌برداری از سامانه دانست. در مقابل، در سامانه‌های اشتراکی، تعدد بهره‌برداران و تفاوت در الگوی کشت و برنامه آبیاری موجب کاهش اثربخشی آموزش‌ها و دشواری حفظ شرایط بهره‌برداری مطلوب شده است. این نتایج با نتایج پژوهش‌های قمرنیا و سپهری (Ghamarnia and Sepehri, 2010) همخوانی دارد که گزارش کردند سامانه‌های خصوصی از نظر شاخص‌های بهره‌برداری و نگهداری عملکرد مطلوب‌تری دارند تا سامانه‌های اشتراکی.

نتایج حاصل از تحلیل پرسشنامه نشان می‌دهد از نظر بهره‌برداران عوامل مختلف اهمیت یکسانی در موفقیت بهره‌برداری از سامانه‌های نوین آبیاری ندارند. بیشترین میزان رضایت بهره‌برداران مربوط به مدیریت بهره‌برداری با امتیاز $83/33$ درصد است که در طبقه رضایت زیاد قرار دارد. محور توصیه‌های فنی ناظر بهره‌برداری با کسب $70/33$ درصد در مرز طبقه رضایت زیاد قرار دارد. در مقابل، محورهای آموزش بهره‌برداری ($56/67$ درصد)، افزایش بهره‌وری ($46/67$ درصد) و میزان صرفه‌جویی در مصرف آب ($41/33$ درصد) در سطح رضایت متوسط ارزیابی شده‌اند. نتایج مربوط به محور آموزش بهره‌برداری نشان می‌دهد اگرچه آموزش‌های ارائه‌شده تا حدودی اثربخش‌اند اما هنوز بخشی از بهره‌برداران نیازمند آموزش‌های تکمیلی و مستمر هستند. این موضوع نشان می‌دهد آموزش‌های اولیه به‌تنهایی برای تغییر رفتار بهره‌برداران کافی نیست و استمرار آموزش و بازآموزی می‌تواند اثربخشی بیشتری در بهبود بهره‌برداری از سامانه‌های آبیاری ایجاد کند. در محور مدیریت بهره‌برداری، درصد بالای رضایت بیانگر آن است که برنامه نظارت توانسته است نقش مؤثری در بهبود مدیریت سامانه‌های آبیاری

استمرار آموزش، اجرای درست توصیه‌ها و تداوم نظارت در چند فصل زراعی متوالی است. این برداشت با گزارش ارائه‌شده در مطالعه حاضر نیز همخوانی دارد که احتمال افزایش رضایت در این دو محور را در دوره‌های بعدی نظارت پیش‌بینی کرده است.

به‌طور کلی، نتایج پرسشنامه نشان می‌دهد برنامه نظارت بر بهره‌برداری بیشترین اثر را بر بهبود مدیریت بهره‌برداری و ارتقای دانش فنی بهره‌برداران داشته است، در حالی که آثار آن بر شاخص‌های اقتصادی و بهره‌وری آب هنوز به مرحله تثبیت نرسیده است. این یافته بیانگر آن است که موفقیت سامانه‌های نوین آبیاری تنها به طراحی و اجرای مناسب آنها وابسته نیست، بلکه استمرار آموزش، حضور فعال کارشناسان ناظر و پایش دوره‌ای عملکرد سامانه‌ها از عوامل کلیدی در دستیابی به هدف‌های افزایش بهره‌وری آب و پایداری تولید کشاورزی محسوب می‌شوند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود برنامه‌های نظارت بر بهره‌برداری به‌صورت مستمر و حداقل در یک سال زراعی ادامه یابد تا علاوه بر ارتقای دانش بهره‌برداران، آثار آن بر بهره‌وری آب و صرفه‌جویی در مصرف آب نیز به‌طور ملموس نمایان شود. کاهش محدود فشار نسبت به داده پایه می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند استهلاک تدریجی تجهیزات، تغییر شرایط بهره‌برداری، تنظیم نبودن اجزای سامانه یا اجرا نشدن کامل عملیات نگهداری قرار گرفته باشد. از آنجا که این متغیرها در پژوهش حاضر به‌طور مستقل اندازه‌گیری نشدند، تعیین سهم هر یک از آنها امکان‌پذیر نیست و بررسی آنها به پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود.

بررسی کلی نتایج نشان می‌دهد اجرای برنامه نظارت بر بهره‌برداری موجب بهبود عملکرد هیدرولیکی سامانه‌ها، افزایش دقت در مدیریت آبیاری و ارتقای دانش فنی بهره‌برداران شده است. استمرار آموزش و بازدیدهای کارشناسی باعث شده است تا بهره‌برداران بتوانند فشار مناسب سامانه را حفظ و مقدار آب آبیاری را متناسب با نیاز گیاه تنظیم کنند. این موضوع علاوه بر کاهش هدررفت آب

فنی یا مدیریتی تمرکز دارند، پژوهش حاضر این موضوع را با ترکیب داده‌های میدانی و دیدگاه بهره‌برداران بررسی کرده و نشان داده است که با وجود کاهش ۵ تا ۶ درصد در فشار کارکرد نسبت به داده پایه، سامانه‌ها در محدوده قابل قبول بهره‌برداری باقی مانده‌اند و بهره‌برداران نیز آموزش و پایش مستمر را مهم‌ترین عوامل حفظ این وضعیت ارزیابی کرده‌اند. در بخش توصیه‌های فنی ناظر بهره‌برداری نیز میزان رضایت نسبتاً بالا (۷۰/۳۳ درصد) نشان می‌دهد بهره‌برداران توصیه‌های کارشناسان را مفید ارزیابی کرده‌اند. بیشترین فراوانی پاسخ مثبت مربوط به پرسش‌های مرتبط با تنظیم فشار سامانه، نگهداری تجهیزات و رعایت برنامه آبیاری است که نشان می‌دهد توصیه‌های فنی ارائه‌شده به‌طور مستقیم در بهبود عملکرد سامانه‌ها مؤثر بوده است. این نتایج اهمیت حضور کارشناسان متخصص را در مراحل پس از اجرای سامانه‌های نوین آبیاری نشان می‌دهد و بیانگر آن است که نظارت صرفاً نباید به مرحله اجرا محدود شود، بلکه باید در دوره بهره‌برداری نیز ادامه یابد.

بر اساس نتایج پرسشنامه، محورهای افزایش بهره‌وری مصرف آب و صرفه‌جویی در مصرف آب به‌ترتیب با امتیازهای ۴۶/۶۷ و ۴۱/۳۳ درصد کمترین میزان رضایت را در میان شاخص‌های ارزیابی‌شده کسب کردند. این یافته نشان می‌دهد از دیدگاه بهره‌برداران، آثار برنامه نظارت بر این دو مؤلفه هنوز به‌طور کامل ملموس نبوده است. با این حال، از آنجا که در پژوهش حاضر شاخص‌هایی مانند بهره‌وری آب، راندمان آبیاری، عملکرد محصول یا حجم واقعی آب مصرفی اندازه‌گیری نشده‌اند، این نتایج صرفاً بیانگر ادراک و ارزیابی بهره‌برداران است و نباید به‌عنوان شواهدی از تغییر واقعی بهره‌وری یا صرفه‌جویی در مصرف آب تفسیر شود. این موضوع را می‌توان ناشی از کوتاه بودن دوره ارزیابی دانست زیرا افزایش بهره‌وری آب، کاهش هزینه‌های تولید و صرفه‌جویی در مصرف آب معمولاً در بلندمدت و پس از تثبیت رفتارهای مدیریتی قابل مشاهده است. در واقع، تغییر در عملکرد کمی سامانه‌ها و شاخص‌های بهره‌وری نیازمند

می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری آب، کاهش مصرف انرژی، افزایش عمر تجهیزات و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری شود. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که موفقیت سامانه‌های نوین آبیاری تنها به طراحی و اجرای مناسب وابسته نیست، بلکه آموزش مستمر، نظارت فنی و مدیریت صحیح بهره‌برداری از عوامل تعیین‌کننده در دستیابی به راندمان واقعی این سامانه‌ها هستند. این یافته با نتایج پژوهش‌های فراهانی و همکاران (Farahani et al., 2006)، ارشد (Arshad, 2020)، اشرف و همکاران (Ashraf et al., 2019) و مکناب (Mcnabb, 2019) همسو است و بر ضرورت اختصاص اعتبارات کافی برای آموزش و نظارت پس از اجرای طرح‌های آبیاری تأکید دارد.

نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی نشان می‌دهد میانگین فشار کارکرد سامانه‌ها پس از اجرای برنامه نظارت نسبت به داده پایه کاهش محدودی دارد، اما در سه مرحله پایش پس از آن تغییر معنی‌داری مشاهده نشده است. این یافته بیانگر



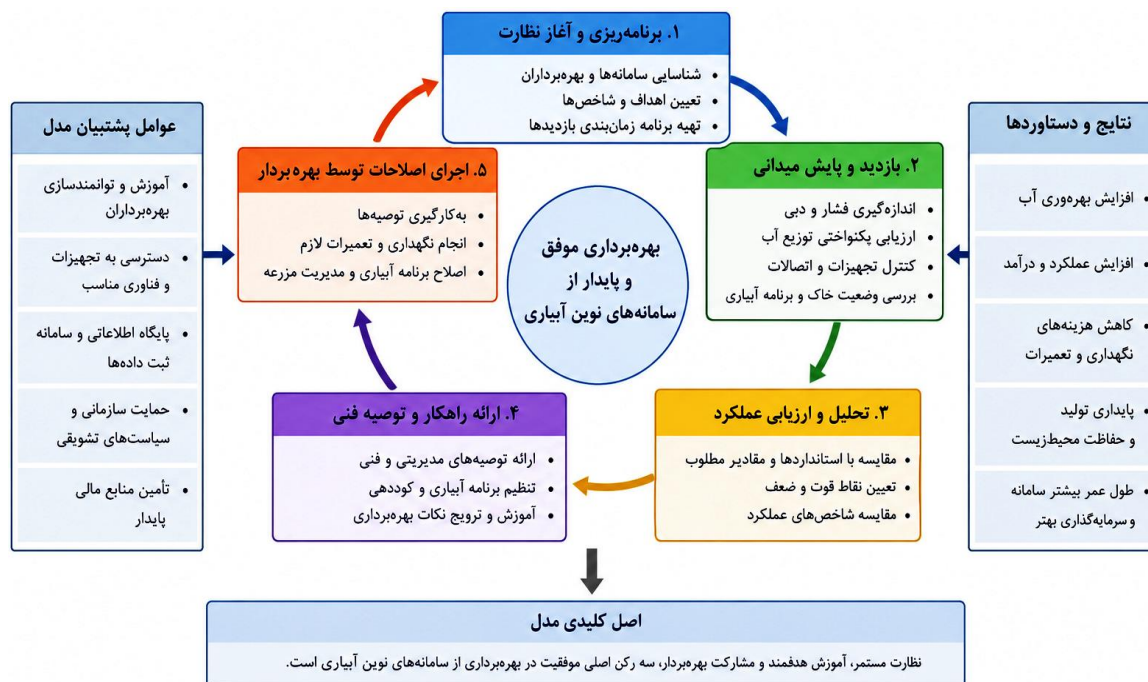
شکل ۴- عوامل مؤثر بر موفقیت بهره‌برداری از سامانه‌های نوین آبیاری
Fig. 4- Factors affecting the success of using modern irrigation systems

از سامانه‌های نوین آبیاری تدوین شد (شکل ۵). این چارچوب، حاصل تلفیق یافته‌های پژوهش حاضر است و با هدف ارائه الگویی اجرایی برای بهبود برنامه‌های نظارت پس از بهره‌برداری پیشنهاد می‌شود. لازم است گفته شود این چارچوب از طریق روش‌های توسعه مدل مانند دلفی، تحلیل سلسله‌مراتبی یا اجماع خبرگان تدوین نشده است و بنابراین باید آن را به عنوان یک پیشنهاد مبتنی بر نتایج این مطالعه تفسیر کرد. بر اساس نتایج پژوهش، استمرار بازدیدهای فنی، آموزش بهره‌برداران، پایش دوره‌ای شاخص‌های عملکرد، نگهداری پیشگیرانه تجهیزات و بازخورد مستمر به بهره‌برداران، مهم‌ترین مؤلفه‌های این چارچوب را تشکیل می‌دهند. این پیشنهادها مستقیماً از یافته‌های پژوهش استخراج شده‌اند به طوری که مدیریت بهره‌برداری (۸۳/۳۳ درصد) و توصیه‌های فنی ناظر (۷۰/۳۳ درصد) بیشترین رضایت بهره‌برداران را کسب کردند، در حالی که محورهای افزایش بهره‌وری (۴۶/۶۷ درصد) و صرفه‌جویی در مصرف آب (۴۱/۳۳ درصد) نیازمند تقویت در برنامه‌های آتی شناخته می‌شوند. این مدل بیانگر آن است که دستیابی به بهره‌برداری پایدار از سامانه‌های آبیاری مستلزم اجرای چرخه مدیریتی مستمر است و نظارت نباید صرفاً به مرحله طراحی، اجرا یا تحویل سامانه محدود شود. این چرخه با بازدید میدانی و ارزیابی وضعیت سامانه آغاز می‌شود. در این مرحله، شاخص‌های فنی مانند فشار کارکرد، وضعیت تجهیزات، عملکرد سامانه، رطوبت خاک و نحوه بهره‌برداری توسط کارشناسان ارزیابی می‌شود. نتایج این ارزیابی، مبنای شناسایی مشکلات فنی و مدیریتی سامانه قرار می‌گیرد. در مرحله بعد، آموزش و انتقال دانش فنی به بهره‌برداران در نظر گرفته می‌شود. این آموزش‌ها شامل اصول بهره‌برداری درست، زمان‌بندی آبیاری، نگهداری تجهیزات، شست‌وشوی فیلترها، کنترل فشار و سرویس‌های دوره‌ای است. یافته‌های این پژوهش نشان داد افزایش آگاهی بهره‌برداران، نقش مهمی در بهبود مدیریت بهره‌برداری و کاهش خطاهای عملیاتی دارد. پس از آموزش، توصیه‌های اصلاحی و اقدامات

(شکل ۴) بر اساس نتایج پرسشنامه و یافته‌های میدانی این پژوهش تدوین شده است و ارتباط بین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر موفقیت بهره‌برداری از سامانه‌های نوین آبیاری را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از پرسشنامه نشان می‌دهد آموزش بهره‌برداران، نگهداری و سرویس دوره‌ای تجهیزات، تداوم خدمات فنی، بازدیدهای منظم کارشناسان و پایش مستمر سامانه‌ها بالاترین امتیاز را در بین عوامل مورد بررسی کسب کردند و به عنوان مؤلفه‌های اصلی مدل مفهومی در نظر گرفته شدند. در مقابل، محورهای مرتبط با افزایش بهره‌وری مصرف آب و صرفه‌جویی در مصرف آب کمترین امتیاز را از دیدگاه بهره‌برداران داشته‌اند که نشان می‌دهد آثار این برنامه‌ها هنوز از نگاه بهره‌برداران به طور کامل ملموس نشده است. نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی نیز نشان داد اگرچه میانگین فشار کارکرد سامانه‌ها نسبت به داده پایه کاهش محدودی دارد، پس از این کاهش اولیه، اختلاف بین مراحل اول، دوم و سوم از نظر آماری معنی‌دار نبوده است و سامانه‌ها از نظر فشار کارکرد در وضعیت نسبتاً پایداری باقی مانده‌اند. تغییرات رطوبت خاک نیز در دامنه‌ای محدود رخ داده است. همزمانی این پایداری نسبی شاخص‌های فنی با رتبه بالای عوامل آموزشی، مدیریتی و پشتیبانی در پرسشنامه مبنای تدوین مدل مفهومی شکل (۴) بوده است. بنابراین، شکل (۴) یک مدل استنباطی مبتنی بر یافته‌های این پژوهش است و بیانگر آن است که استمرار آموزش بهره‌برداران، خدمات فنی، نگهداری منظم تجهیزات و پایش دوره‌ای، از دیدگاه بهره‌برداران و بر اساس نتایج میدانی، مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثر بر حفظ عملکرد سامانه‌ها هستند. البته این مدل روابط علی را اثبات نمی‌کند، بلکه چارچوبی مفهومی را برای تبیین یافته‌های پژوهش و ارائه پیشنهادهایی برای برنامه‌های نظارت بر بهره‌برداری فراهم می‌آورد.

بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی، تحلیل‌های آماری و یافته‌های حاصل از پرسشنامه چارچوب عملیاتی پیشنهادی برای اجرای برنامه نظارت مستمر بر بهره‌برداری

اجرای متناسب با شرایط هر سامانه ارائه می‌شود. این اقدامات شامل تنظیم فشار، اصلاح برنامه آبیاری، رفع نواقص تجهیزات، بهبود نگهداری سامانه و اصلاح روش‌های بهره‌برداری است. اجرای درست این توصیه‌ها زمینه افزایش راندمان عملکرد سامانه را فراهم می‌کند. پایش و ارزیابی مجدد عملکرد سامانه ادامه خواهد یافت تا میزان اثربخشی اقدامات اصلاحی بررسی گردد. در این مرحله، شاخص‌های فنی دوباره اندازه‌گیری و با نتایج اولیه مقایسه می‌شوند. با مشاهده نقص‌های جدید یا دست نیافتن به عملکرد مطلوب، چرخه نظارت بار دیگر از مرحله ارزیابی آغاز می‌شود. این بازخورد مستمر موجب اصلاح تدریجی عملکرد سامانه و جلوگیری از افت راندمان طی زمان می‌شود. استمرار این چرخه منجر به افزایش بهره‌وری مصرف آب، کاهش هزینه‌های نگهداری، افزایش پایداری عملکرد سامانه، بهبود آب کشاورزی را فراهم می‌کند.



شکل ۵- چارچوب پیشنهادی اجرای برنامه نظارت مستمر بر بهره‌برداری از سامانه‌های نوین آبیاری (بر اساس نتایج پژوهش)

Fig. 5- The proposed framework of continuous monitoring of the exploitation of modern irrigation systems (based on the results of this research)

نتیجه‌گیری
اراک و سازند، بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی و ارزیابی دیدگاه بهره‌برداران به اجرا در آمد. نتایج تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های تکراری نشان داد که زمان اثر معنی‌داری بهره‌برداری از سامانه‌های نوین آبیاری در شهرستان‌های

حفظ عملکرد سامانه‌ها دارند. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود برنامه‌های نظارت فنی از حالت مقطعی خارج و به‌عنوان بخشی از فرآیند دائمی بهره‌برداری سامانه‌های نوین آبیاری در سطح استان اجرا شوند. استقرار نظام پایش مستمر مبتنی بر اندازه‌گیری دوره‌ای فشار، رطوبت خاک و شاخص‌های عملکرد سامانه، همراه با آموزش منظم بهره‌برداران و ارائه خدمات پشتیبانی فنی، می‌تواند نقش مؤثری در افزایش عمر مفید سامانه‌ها، کاهش هزینه‌های نگهداری و ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی داشته باشد. پیشنهاد می‌شود خدمات نظارت بر بهره‌برداری به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از پروژه‌های توسعه سامانه‌های نوین آبیاری در دستور کار وزارت جهاد کشاورزی قرار گیرد و از کارشناسان متخصص برای پایش مستمر عملکرد سامانه‌ها، آموزش بهره‌برداران و ارائه راهکارهای اصلاحی استفاده شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچگونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچگونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در طرح و ایده‌پردازی مطالعه مشارکت داشتند. تهیه مطالب، جمع‌آوری داده‌ها و تجزیه و تحلیل را همه نویسندگان به‌عهده داشته‌اند. همه نویسندگان به طور مساوی در مفهوم سازی مقاله و نوشتن پیش نویس‌های اولیه و بعدی مشارکت داشته‌اند.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از همکاری و مساعدت بهره‌برداران و کشاورزان مشارکت‌کننده در این پژوهش، کارشناسان و

($P < 0.05$) بر فشار کارکرد سامانه‌ها دارد به‌طوری‌که میانگین فشار از $42/33$ متر ستون آب در زمان اجرای برنامه نظارت به $39/73$ ، $40/30$ و $39/97$ متر ستون آب در سه مرحله پس از آن رسیده است. با وجود این کاهش، اختلاف بین سه مرحله پس از نظارت از نظر آماری معنی‌دار نیست که بیانگر پایداری نسبی عملکرد هیدرولیکی سامانه‌ها پس از افت اولیه است. میانگین رطوبت حجمی خاک نیز از $27/51$ درصد در زمان اجرای برنامه نظارت به $26/47$ ، $26/83$ و $25/72$ درصد در سه مرحله بعدی تغییر یافت. هرچند روند تغییرات کاهشی است، اما دامنه تغییرات محدود بود و تغییرات شدید در وضعیت رطوبت خاک مشاهده نشد. تحلیل دو عاملی نشان داد که اثر متقابل زمان $\times$ شهرستان برای هر دو شاخص فشار و رطوبت خاک معنی‌دار نیست که بیانگر روند مشابه تغییرات در دو شهرستان است. نتایج به‌دست آمده از پرسشنامه نشان داد که از دیدگاه بهره‌برداران، مدیریت درست بهره‌برداری با امتیاز $83/33$ درصد بالاترین میزان رضایت را داشته است و پس از آن توصیه‌های فنی ناظر بهره‌برداری با $70/33$ درصد قرار دارد. در مقابل، آموزش بهره‌برداران ($56/67$ درصد)، افزایش بهره‌وری مصرف آب ($46/67$ درصد) و صرفه‌جویی در مصرف آب ($41/33$ درصد) پایین‌ترین امتیازها را کسب کردند که نشان می‌دهد از دیدگاه بهره‌برداران، آثار این برنامه‌ها در این دو حوزه هنوز به‌طور کامل محسوس نیست. به‌طور کلی، نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که برنامه نظارت بر بهره‌برداری توانسته است پایداری نسبی شاخص‌های فنی سامانه‌های آبیاری را در دوره پس از اجرا حفظ کند، اما برای ارتقای اثربخشی آن، به‌ویژه در حوزه افزایش بهره‌وری مصرف آب و صرفه‌جویی در آب لازم است برنامه‌های آموزشی، خدمات فنی پس از اجرا و پایش مستمر تقویت شوند. نتایج ارزیابی‌های میدانی و پرسشنامه‌ها نیز بیانگر آن است که موفقیت بهره‌برداری از سامانه‌های نوین آبیاری تنها به کیفیت طراحی و اجرای سامانه وابسته نیست، بلکه عواملی مانند آموزش بهره‌برداران، نگهداری و سرویس دوره‌ای تجهیزات، تداوم خدمات فنی، دسترسی به مشاوره تخصصی و برگزاری برنامه‌های نظارتی منظم نقش تعیین‌کننده‌ای در

ناظران فنی سامانه‌های آبیاری تحت فشار و همچنین که در اجرای این پژوهش و گردآوری داده‌های میدانی مدیریت و کارشناسان مراکز جهاد کشاورزی اراک و شازند همکاری کردند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

منابع

- Ahmadaali, Kh. Hamdi Ahmadabad, Y. Hosseini pazhouh, N and Ali Pourmohseni A. (2018) Assessment of sprinkler irrigation systems with emphasis on performance criteria and operation problems. *Iranian journal of soil and water research*, 48(5), 1043-1052. (In Farsi).
- Agbokpanzo, D.C. & Agossou, A.F. 2025. Farmer satisfaction surveys as a feedback mechanism for improving extension service quality standards. *Int J Agric Extension Social Dev*, 8(2):132-135.
- Arshad, I. (2020) Importance of Drip Irrigation System Installation and Management - A Review. *Psm biological research*, 5(1), 22-29.
- Ashraf, M. Qasim, M. and Gul, F. (2019) Impact of Education on Farmers Earning: A HouseHold Survey Data Analysis. *International Research Journal of Applied Sciences*, 1(1), 41-84.
- Azami, A. Zarafshani, K. Dehghanisanij, H. and Gorji, A. (2012) An Analysis of Educational Needs of Farmers Equipped with Sprinkler Irrigation Systems in Kermanshah Province (Case Study in Songhor Township). *Journal of water and soil*, 25(5), 11-19. (In Farsi).
- Boone Jr, H. N., & Boone, D. A. (2012). Analyzing likert data. *The Journal of extension*, 50(2), 48.
- Bopp, C., Engler, A., Jordan, C., & Jara-Rojas, R. (2024). What is behind water user satisfaction with irrigation organizations' performance? An empirical analysis under different water scarcity conditions. *Agricultural Water Management*, 304, 109072.
- Dubey, A.K and Srivastava, J.P. (2007) Effect of Training Programme on Knowledge and Adoption Behaviour of Farmers on Wheat Production Technologies. *Indian Res*, 7(2&3), 41-43.
- Farahani, H. Oweis, T. Bruggeman, A. (2006) Management of Modern Irrigation Systems for High Water Productivity. *Conference: In Proceedings Symposium on Irrigation Modernization Constraints and Solutions*, March 28-31, 2003, Damascus, Syria.
- Farahza, M N and Nazari, B. (2020). Analysis of the Relationship between Irrigation System Operation Status and Knowledge and Skills of Farmers (Case Study: Qazvin Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(6), 1579-1591. (In Persian)
- Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (Vol. 5). London: sage.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at Breaking Point (SOLAW 2021)*. Rome: FAO.
- Ghamarnia, H., & Sepehri, S. (2010). A comparison of private and public pressurized irrigation systems in different parts of the Kermanshah province, west Iran. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 8(1), 321-523.
- Hamdi, Y, Liaghat, A. M. Sohrabi, T. Rasoolzadeh, A. Nazari, B, and Liaghat, A. (2016). Performance evaluation of center pivot systems in Lands of Moghan Agro-industrial and Animal Husbandry Company. *Iranian journal of soil and water research*, 47(4), 723-729. (In Farsi).
- Islampour, S.R., Moradinejad, A., Jabari, A., Haghiabi, A.H., Parsaie, A. 2012. Obstacles and problems of operation and maintenance of irrigation systems under pressure (case study of Sepida city, Fars province). *The 4rd National Conference on Irrigation and Drainage Networks Management*, Ahvaz. (In Persian)
- Karbasi, A., 2001. Economic analysis of irrigation development project in the province KHorasan, *Agriculture and Development Economics*, 36 (in Persian).
- Kassem, H. S., Alotaibi, B. A., Muddassir, M., & Herab, A. (2021). Factors influencing farmers' satisfaction with the quality of agricultural extension services. *Evaluation and Program Planning*, 85, 101912.
- León-Mantero, C., Casas-Rosal, J. C., Pedrosa-Jesús, C., & Maz-Machado, A. (2020). Measuring attitude towards mathematics using Likert scale surveys: The weighted average. *Plos one*, 15(10), e0239626.
- Louie, M. J. and Selker, J. S. (2000). Sprinkler head maintenance effects on water application uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(3), 142-148.
- Mahboubi, M.R. Nakhaei, H.A. Rezvanfar, A. and Mohammadi, H.M. (2013) Identification of educational needs of Operators of classical pressurized irrigation systems in Golestan province. *Journal of water research in agriculture*, 27(2), 171-180. (In Farsi).

- McNabb, D.E. (2019) *Global Pathways to Water Sustainability*. Tacoma, Pacific Lutheran University Tacoma, WA, USA.
- Mehrbani, V. (2018) Formal Education and Agricultural Productivity of Labor: Evidence from Iran, MENA and World. *Development Strategy*, 52, 195-218. (In Farsi).
- Muhammad, L. N. (2023). Guidelines for repeated measures statistical analysis approaches with basic science research considerations. *The Journal of clinical investigation*, 133(11).
- Norman, G. (2010). Likert scales, levels of measurement and the “laws” of statistics. *Advances in health sciences education*, 15(5), 625-632.
- Norouzi, A., Chizari, M., 2006. Effective cultural and social factors regarding attitude of wheat farmers of Nahavand Township toward sprinkler irrigation development. *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*. 2, 59-69.
- Oğuztürk, G. E. (2025). AI-driven irrigation systems for sustainable water management: A systematic review and meta-analytical insights. *Smart Agricultural Technology*, 11, 100982.
- Rahman, M. Khatun, M. Rahman, M.L. and Haque, S.R. (2018) Assessment of training needs on crop production for farmers in some selected areas of Bangladesh. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 43(4), 669-690.
- Shahabadi, A. Amiri, M. (2014) the effect of domestic R&D stock and R&D stock spillovers on total factor productivity growth of agriculture sector in Iran. *Journal of applied economics studies*, 3(9), 93-114. (In Farsi).
- Sullivan, G. M., & Artino Jr, A. R. (2013). Analyzing and interpreting data from Likert-type scales. *Journal of graduate medical education*, 5(4), 541-542.
- Yost, M.A. Sudduth, K.A. Walthall, C.L. and Kitchen, N.R. (2019) Public–private collaboration toward research, education and innovation opportunities in precision agriculture. *Precision Agric*, 20(1), 4-18.
- Yu, J., Qu, Q., Peng, S., Wei, X., Li, Y., & Sun, C. (2025). Deep learning for intelligent irrigation decision-making: A review. *Agricultural Water Management*, 320, 109836.