



Improving the accuracy of the Trimmer equation for estimating wind drift and evaporation losses in Sprinkler irrigation systems based on Frost and Schwalen's nomograph

Younes Aminpour¹ , Darya Dehghan² , Enrique Playán³ , and Eisa Maroufpoor⁴ 

1. Department of Hydraulic, Hydro-Environmental Engineering, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran. E-mail: Y.aminpour@wri.ac.ir
2. Department of Water Resources Research, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran. E-mail: Darya.dehghan@ut.ac.ir
3. Department of Soil and Water, Estación Experimental de Aula Dei, EEAD-CSIC, Avda. Montañana, 1005. 50059 Zaragoza, Spain. E-mail: Enrique.playan@csic.es
4. Corresponding author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: E.maroufpoor@uok.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 05 June 2025
Received in revised form 26 August 2025
Accepted 01 November 2025
Available online 21 March 2026

Keywords:

Sprinkler irrigation,
wind drift,
evaporation losses,
application efficiency,
Frost and Schwalen.

ABSTRACT

Objective: In Iran for estimating wind drift and evaporation losses (WDEL) in sprinkler irrigation systems is the Frost and Schwalen chart. However, applying this chart is somewhat complex and time-consuming. Trimmer conducted extensive analyses on this chart, which led to the derivation of an empirical equation for estimating WDEL. The certain ranges of influencing factors, due to increased error, its use is not recommended, or the constant coefficients of the equation vary under different conditions. The aim of this study is to refine the aforementioned equation.

Method: To refine the equation, the Frost and Schwalen chart was digitized, and a total of 6,501 data series comprising relative humidity, ambient temperature, vapor pressure deficit, nozzle diameter, sprinkler operating pressure, wind speed, and wind drift and evaporation losses were extracted from the chart. Of the entire dataset, 70% was randomly allocated for training and the remaining 30% was used to validate the modified equation. Statistical indicators including relative error, absolute mean relative error (AMRE), and the 25% prediction level ($P_{0.25}$, the percentage of estimated dependent variable values with less than 25% deviation from the measured values) were used to evaluate the accuracy and reliability of the equations.

Results: The AMRE of the estimates was approximately 25%, indicating weak performance in estimation of WDEL. Additionally, based on the $P_{0.25}$ index, around 40% of the Trimmer equation's estimates had errors exceeding 25%. However, the accuracy and reliability of the modified equation, based on the 30% validation data, showed a significant improvement: the AMRE decreased to 4.96%, and nearly 100% of the estimates had errors less than 25%. Furthermore, unlike the fluctuating error trend of the Trimmer equation in specific ranges of nozzle diameter and operating pressure, the error variation in the modified equation followed a uniform trend.

Conclusions: When using the Frost and Schwalen chart to estimate wind drift and evaporation losses in sprinkler irrigation systems, it is recommended to either use the chart directly or apply the proposed refined equation.

Cite this article: Aminpour, Y., Dehghan, D., Playán, E., & Maroufpoor, E. (2026). Improving the accuracy of the Trimmer equation for estimating wind drift and evaporation losses in Sprinkler irrigation systems based on Frost and Schwalen's nomograph. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6 (1), 80-101. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12276.1172>



Introduction

One of the most comprehensive approaches employed both internationally and within Iran for estimating wind drift and evaporation losses (WDEL) in sprinkler irrigation systems is the application of the Frost and Schwalen nomograph (1955). This nomograph, derived from the results of more than 700 experiments, incorporates five key variables influencing WDEL. Despite its robustness, the chart's application is somewhat complex and time-consuming. In 1987, Trimmer conducted extensive analyses of the chart, resulting in the derivation of an empirical equation designed to estimate WDEL more efficiently. The key advantage of this equation lies in its ease of application and compatibility with computer-based simulations. However, the use of Trimmer's equation requires careful consideration; within certain ranges of the influencing factors, the margin of error increases significantly, making the equation unreliable. Furthermore, under specific conditions, the constants used in the equation vary. Despite these limitations, Trimmer's equation is currently used in the design of sprinkler irrigation systems without accounting for the aforementioned considerations. The primary objective of this study is to enhance the accuracy and reliability of Trimmer's equation by incorporating refinements based on the Frost and Schwalen chart. Specifically, by adjusting the constant coefficients in Trimmer's formulation, this research aims not only to improve its precision but also to enable its application across the entire range of influencing variables presented in the Frost and Schwalen chart.

Method

The parameters required in the Frost and Schwalen nomograph include ambient temperature, relative humidity, wind speed, sprinkler pressure, and nozzle diameter. The ranges of variation for these parameters are as follows: relative humidity: 0 to 100%; ambient temperature: 30 to 110°F (equivalent to -1.1 to 43.3°C); Nozzle diameter: 8.64 to 64.64 inches (equivalent to 3.2 to 25.4 mm); Operating pressure of the sprinkler: 20 to 80 psi (equivalent to 137.9 to 551.6 kPa); Wind speed: 0 to 15 mph (equivalent to 0 to 6.7 m/s). Initially, Trimmer used the Tetens equation (1930) and the parameters of ambient temperature and relative humidity to calculate the saturation vapor pressure deficit. Next, the dimensions of each of the major lines on the chart were measured using a digitizing tablet. By applying similar trigonometric relations and the measured values, Trimmer proposed Eq. (1) to estimate wind drift and evaporation losses:

$$WDEL = \left[1.98D_n^{-0.72} + 0.22(e_s - e_a)^{0.63} + 3.6 \times 10^{-4}P^{1.16} + 0.14V_w^{0.7} \right]^{4.2} \quad (1)$$

Where, $WDEL$, wind drift and evaporation losses (%); D_n , Main nozzle diameter (mm); $(e_s - e_a)$, Saturation vapor pressure deficit (kPa); P , Sprinkler operating pressure (kPa); and V_w , Wind speed at height of 2 m (m/s).

The relative error of the equation is approximately 10% near the central values of the parameters, but the errors increase significantly near the extremes of the chart, reaching over 40% in some cases (Trimmer, 1987). To refine Trimmer's equation, the Frost and Schwalen nomograph was digitized in this study using Grapher software (Ver. 7.0.1870, Golden, Colorado 80401), and a total of 6,501 data series were extracted from the chart. Of the total

dataset, 70% was used for training, and the remaining 30% was allocated for validating the revised equation.

Results

The absolute mean relative error (AMRE) of the Trimmer equation, under the condition of using 70% of the data for training and 30% for validation, was found to be 24.69% and 24.96%, respectively. These values indicate the poor performance of the Trimmer equation in estimating WDEL. Additionally, the $P_{0.25}$ index was calculated to be 60.37% and 62.22%, respectively. In other words, approximately 40% of the estimates provided by the Trimmer equation have an error greater than 25%. Furthermore, Trimmer (1987) had already reported undesirable error levels in his proposed equation for certain specific parameter ranges (e.g., extreme values of operating conditions), and the findings of the present study confirm those observations. The revised Trimmer equation is presented as Eq. (2):

$$WDEL = \left[0.962D_n^{-7.4 \times 10^{-3}} + 4.2 \times 10^{-3}(e_s - e_a)^{0.622} + 2.2 \times 10^{-2}P^{0.138} + 3.5 \times 10^{-3}V_w^{0.564} \right]^{145.35} \quad (2)$$

The accuracy and reliability of the proposed equation were significantly improved. Specifically, the absolute mean relative error (AMRE) decreased to 4.96% and 4.99% under the use of 70% and 30% of the dataset, respectively. Additionally, the $P_{0.25}$ index increased to 99.60% and 99.54%, respectively. These results indicate that the developed equation exhibits a highly satisfactory level of accuracy for estimating WDEL.

Conclusions

Given that the accuracy of the revised Trimmer equation in estimating wind drift and evaporation losses in sprinkler irrigation systems is both desirable and of excellent quality compared to the reference data (i.e., the Frost and Schwalen nomograph), it is therefore recommended that, if this method is chosen for estimating losses, either the original chart be used directly or the revised Trimmer equation be employed as a reliable alternative.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

This work has been supported by the Center for International Scientific Studies & Collaboration (CISSC), Ministry of Science, Research and Technology, Government of Iran. Therefore, the authors express their appreciation and gratitude for the financial support from the center (CISSC).

Funding

This work has been supported by the Center for International Scientific Studies & Collaboration (CISSC), Ministry of Science, Research and Technology, Government of Iran.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



بهبود دقت معادله تریمر برای برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی سامانه های آبیاری بارانی بر

پایه نمودار فراست و شوالن

یونس امین پور^۱، دریا دهقان^۲، انریکه پلایان^۳، و عیسی معروف پور^۴

۱. گروه سازه های هیدرولیکی، پژوهشکده مهندسی هیدرولیک و محیط های آبی، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران. رایانامه: Y.aminpour@wri.ac.ir

۲. گروه فن آوری های نوین ارزیابی منابع و مصارف، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران. رایانامه: Darya.dehghan@ut.ac.ir

۳. گروه خاک و آب، موسسه تحقیقات آولا دی، زاراگوزا، اسپانیا. رایانامه: Enrique.playan@csic.es

۴. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: E.maroufpoor@uok.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۰۱</p> <p>کلیدواژه ها: آبیاری بارانی، تلفات تبخیر و بادبردگی، راندمان کاربرد، فراست و شوالن</p>	<p>هدف: استفاده از نمودار فراست و شوالن یکی از جامع ترین روش ها برای تلفات تبخیر و بادبردگی سامانه های آبیاری بارانی است. اما استفاده از نمودار مذکور، اندکی پیچیده و زمان بر است. تریمر روی نمودار مذکور، تحلیل های زیادی انجام داد که منجر به استخراج رابطه ای جهت برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی شد. مزیت رابطه تریمر، سهولت استفاده و کاربرد آن در برنامه های کامپیوتری بود اما به دلیل افزایش خطا، استفاده از آن توصیه نشده است و یا در برخی شرایط، ضرایب ثابت معادله متفاوت است. هدف از این پژوهش، افزایش دقت معادله مذکور است.</p> <p>روش پژوهش: به منظور افزایش دقت معادله مذکور، نمودار فراست و شوالن، رقوم سازی شد و تعداد ۶۵۰۱ سری داده، شامل رطوبت نسبی، درجه حرارت محیط، کمبود فشار بخار اشباع، قطر نازل، فشار کارکرد آبپاش، سرعت باد و تلفات تبخیر و بادبردگی، از نمودار مذکور استخراج گردید. از مجموع کل داده ها، ۷۰ درصد به طور تصادفی، برای آموزش و ۳۰ درصد باقی مانده، جهت صحت سنجی معادله اصلاح شده، در نظر گرفته شد. از شاخص های آماری خطای نسبی، میانگین قدرمطلق خطای نسبی و سطح پیش بینی ۲۵ درصد (P0.25)، درصد مقادیر تخمینی پارامتر وابسته که کمتر از ۲۵ درصد با مقدار اندازه گیری شده تفاوت دارند) جهت ارزیابی دقت و صحت معادلات استفاده شد.</p> <p>یافته ها: نتایج نشان داد که دقت معادله تریمر، مبتنی بر مجموعه داده های مورد استفاده، مطلوب نیست؛ به گونه ای که میانگین قدرمطلق خطای نسبی نتایج در حدود ۲۵ درصد است. همچنین بر اساس شاخص P0.25، در حدود ۴۰ درصد تخمین های معادله تریمر، خطایی بیش از ۲۵ درصد دارند. اما دقت و صحت معادله اصلاح شده، مبتنی بر ۳۰ درصد داده های واسنجی به طور قابل توجهی بهبود پیدا کرد، به گونه ای که میانگین قدرمطلق خطای نسبی، به ۴/۹۶ درصد کاهش یافت و همچنین تقریباً ۱۰۰ درصد نتایج، خطایی کمتر از ۲۵ درصد دارند. همچنین برخلاف روند تغییرات زیاد خطای معادله تریمر در بازه های خاصی از قطر نازل و یا فشار کارکرد آبپاش، تغییرات خطا در معادله اصلاح شده، روندی یکنواخت داشت.</p> <p>نتیجه گیری: در صورتی که برای برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی در سامانه های آبیاری بارانی از نمودار فراست و شوالن استفاده می شود، پیشنهاد می گردد، به صورت مستقیم از نمودار مذکور استفاده شده و یا اینکه از معادله اصلاح شده پیشنهادی استفاده گردد.</p>

استناد: امین پور، یونس؛ دهقان، دریا؛ پلایان، انریکه؛ و معروف پور، عیسی. (۱۴۰۵). بهبود دقت معادله تریمر برای برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی سامانه های آبیاری

بارانی بر پایه نمودار فراست و شوالن. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۶ (۱)، ۸۰-۱۰۱.

<http://doi.org/10.22126/atwe.2025.12276.1172>



مقدمه

تاکنون در ایران بیش از ۲/۹ میلیون هکتار تحت پوشش سامانه‌های آبیاری تحت فشار قرار گرفته است که سامانه آبیاری بارانی بیشترین فراوانی را دارد (بی‌نام، ۱۴۰۲). سامانه‌های آبیاری بارانی بایستی طوری طراحی شوند که ضمن به حداقل رساندن تلفات آب آبیاری، باعث توزیع یکنواخت آب در مزرعه شده و به طور کلی راندمان کاربرد آب بالایی داشته باشند (کلر و بلایسنر^۱، ۱۹۹۰). در مجامع علمی و نظریه‌های کارشناسی موجود در کشور، راندمان کاربرد قابل حصول در سامانه‌های آبیاری بارانی، ۸۵ درصد است (سالمن^۲، ۱۹۸۸؛ و عباسی و همکاران، ۱۳۹۵). عباسی و همکاران (۱۳۹۵) با جمع‌بندی داده‌های اندازه‌گیری شده راندمان در بانک اطلاعات ۴۰ ساله مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، متوسط راندمان کاربرد آب آبیاری را برای سامانه‌های مختلف آبیاری در سطح کشور گزارش نمودند. از میان سامانه‌های آبیاری بارانی، روش لوله چرخ‌دار و کلاسیک ثابت، به ترتیب بیشترین (۶۶/۹ درصد) و کمترین (۵۲/۱ درصد) راندمان کاربرد آب آبیاری را داشتند. آنان، متوسط راندمان کاربرد آب آبیاری را برای سامانه‌های آبیاری بارانی ۶۲/۱ درصد، سامانه‌های آبیاری تحت فشار، ۶۶/۶ درصد و سامانه‌های آبیاری سطحی ۵۳/۶ درصد گزارش نمودند. بر اساس این مطالعه، حاصل سرمایه‌گذاری‌های کلان کشوری برای توسعه سامانه‌های آبیاری تحت فشار، منجر به افزایش حدود ۱۳ درصد راندمان کاربرد آب آبیاری شده است که این میزان افزایش، با سرمایه‌گذاری کمتر و کمی توجه بیشتر به سامانه‌های آبیاری سطحی هم قابل حصول بود. از طرف دیگر فاصله میان راندمان کاربرد سامانه‌های آبیاری بارانی اجرا شده تا میزان قابل حصول آن (۸۵ درصد) زیاد و قابل توجه (حدود ۲۳ درصد) است. بر اساس نتایج این مطالعه و همچنین بررسی منابع انجام شده در این تحقیق، دلایل مربوط به پایین بودن راندمان کاربرد سامانه‌های آبیاری بارانی کشور، بی‌توجهی به مسائل فنی در هر سه مرحله طراحی، اجرا و بهره‌برداری ذکر شده است (ناصری و همکاران، ۱۳۹۶؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۵؛ و معروف پور و همکاران^۳، ۲۰۱۹). عدم طراحی صحیح و اصولی، به دلیل نداشتن روابط دقیق و یا پارامترهای مورد نیاز طراحی، باعث شده تا تعیین پارامترها با حدس و گمان صورت گیرد و طراحی‌ها به صورت کلیشه‌ای از نمودارها و جداولی باشد که برای سایر سامانه‌ها و مناطق مشابه به دست آمده‌اند. این امر سبب شده است تا راندمان واقعی سامانه با مقدار محاسباتی آن فاصله زیادی داشته باشد و همچنین منجر به افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بروز مشکلات و هزینه‌های اضافی در بهره‌برداری و نگهداری و در نهایت، کاهش بازدهی اقتصادی طرح‌ها در طول عمر مفید گردد.

راندمان کاربرد سامانه آبیاری بارانی، بیانگر میزان مفیدبودن آب کاربردی و یا به عبارتی، نشان‌دهنده، میزان تلفات سامانه آبیاری بارانی است که قسمت عمده آن تلفات تبخیر و بادبردگی^۴ (WDEL) است که شامل دو جزء تبخیر و بادبردگی است (دیلا و شال^۵، ۱۹۸۳). در آبیاری بارانی، به اختلاف حجم آب خارج شده از آبیاری و حجم آب رسیده به منطقه هدف، تلفات تبخیر و بادبردگی گفته می‌شود. قطرات آب از هنگام خارج شدن از نازل تا رسیدن به زمین تحت تأثیر عوامل جوی قرار گرفته که در برخی مواقع، قسمتی از مجموعه قطرات خروجی، تحت تأثیر نیروی باد از سطح قابل توزیع یک آبیاری یا مجموعه آبیاری‌ها خارج شده و نیز بخشی دیگر، تحت تأثیر عوامل جوی تبخیر می‌شوند. هدررفت آب به دو صورت یاد شده را هدررفت ناشی از باد یا بادبردگی و هدررفت ناشی از تبخیر یا تلفات تبخیری گویند. همچنین تلفات تبخیر و بادبردگی سبب می‌شود که یکنواختی توزیع آب در مزرعه کاهش یابد (صادقی و همکاران^۶، ۲۰۱۵)؛ بنابراین به صورت متداول کشاورزان بیش آبیاری انجام می‌دهند تا مطمئن شوند که تمام مزرعه به اندازه کافی آب دریافت کرده است. این مسئله سبب کاهش بیشتر راندمان کاربرد، هدررفت انرژی پمپاژ،

1. Keller & Bliesner
2. Solomon
3. Maroufpoor et al
4. Wind Drift and Evaporation Losses (WDEL)
5. Dylla & Shull
6. Sadeghi et al

افزایش رواناب، فرسایش خاک و شسته شدن مواد مغذی خاک می‌گردد (سانتوس و همکاران^۱، ۲۰۰۳؛ لوز و هیرومان^۲، ۲۰۰۵؛ باوی و همکاران^۳، ۲۰۰۹) که متعاقباً کاهش درآمد مزرعه و افزایش هزینه‌های تولید را به دنبال دارد. برخی محققین میزان تلفات تبخیر و بادبردگی را ۱۰-۵٪ (کلر و بلایسنر، ۱۹۹۰)، برخی دیگر حداکثر مقدار آن را تا ۳۰٪ (یازار^۴، ۱۹۸۴؛ و مونترو^۵، ۱۹۹۹) و حتی تا ۵۰٪ (فراست و شوالن^۶، ۱۹۵۵؛ و فاسی و برسرو^۷، ۱۹۹۱) گزارش کرده‌اند. جهت اطلاع از میزان تلفات تبخیر و بادبردگی گزارش شده از مناطق مختلف کشور، سعی در جمع‌آوری مطالعات مذکور گردید که خلاصه آن در جدول ۱ ذکر شده است. در جدول مذکور، حداکثر مقادیر تلفات تبخیر و بادبردگی ۴۰٪ (کیانی و همکاران، ۱۳۹۶) مربوط به استان گلستان و ۳۸٪ (سیدزاده و همکاران، ۲۰۲۲؛ و رستمیان و همکاران، ۱۳۹۳) مربوط به شهرستان‌های کنگاور (استان کرمانشاه) و سوندج (استان کردستان) گزارش شده است. زاپاتا و همکاران^۸ (۲۰۰۷) میزان تلفات تبخیر و بادبردگی کمتر از ۲۰ درصد را به‌عنوان حالت استاندارد نام بردند.

تکنیک‌های اندازه‌گیری متفاوتی برای تعیین تلفات تبخیر و بادبردگی در سامانه‌های مختلف آبیاری و شرایط متفاوت اقلیمی استفاده شده است (پلایان و همکاران^۹، ۲۰۰۵؛ آدین^{۱۰}، ۲۰۱۲؛ معروف پور و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۸؛ سرور و همکاران^{۱۲}، ۲۰۲۱؛ و محمد و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۱). نتایج این روش‌ها بیانگر یک مفهوم مشترک در رابطه با تلفات تبخیر و بادبردگی نیست و بنابراین بازه گسترده‌ای از نتایج برای مقادیر تلفات تبخیر و بادبردگی گزارش شده است (هنداوی و همکاران^{۱۴}، ۲۰۰۵؛ و سرور و همکاران، ۲۰۲۱). این تکنیک‌ها عبارت‌اند از آزمایش ظروف استاندارد^{۱۵}، روش هدایت الکتریکی^{۱۶}، روش ردیابی^{۱۷} و تکنیک‌های مبنای فیزیکی بر پایه معادلات ریاضی^{۱۸} (کینگ و همکاران^{۱۹}، ۲۰۱۲؛ صادقی و همکاران، ۲۰۱۵؛ و سرور و همکاران، ۲۰۲۱). روش ظروف استاندارد، به طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری تلفات تبخیر و بادبردگی استفاده می‌شود. در این روش تلفات شامل مجموع دو تلفات تبخیر و تلفات بادبردگی است. مقادیر تلفات به‌دست‌آمده در این روش بیشتر از مقادیر آن در سایر روش‌ها خواهد بود. روش ردیابی به دلیل پروتکل پیچیده آن که مستعد خطای اندازه‌گیری است کمتر استفاده می‌شود (سرور، ۲۰۲۱). روش هدایت الکتریکی بر مبنای تفاوت غلظت نمک آب آبیاری و آب رسیده به سطح زمین است. این روش شامل تلفات بادبردگی نخواهد شد. روش‌های فیزیکی بر پایه معادلات ریاضی، بر مبنای ترکیب تئوری بالستیک قطره با تئوری انتقال گرما و جرم^{۲۰} است (کینزر و گان^{۲۱}، ۱۹۵۱؛ یان و همکاران^{۲۲}، ۲۰۱۰؛ و مول و همکاران^{۲۳}، ۲۰۱۲). نتایج حاصل از این روش با نتایج

1. Santos et al
2. Luz & Heermann
3. Bavi et al
4. Yazar
5. Montero
6. Frost & Schwalen
7. Faci & Bercero
8. Zapata et al
9. Playán et al
10. Adin
11. Maroufpoor et al
12. Sarwar et al
13. Mohamed et al
14. Hendawi et al
15. Test Standard Catch Can
16. Electrical Conductivity Method
17. Conservative Tracer
18. Physical Based Mathematical Method
19. King et al
20. Mass & heat transfer
21. Kinzer & Gunn
22. Yan et al
23. Molle et al

ظروف لندازه‌گیری و یا روش EC بسیار متفاوت و مقادیر آن کمتر است (تامپسون و همکاران^۱، ۱۹۹۳، ۱۹۹۷؛ یونتس و همکاران^۲، ۲۰۰۰؛ سرور و همکاران، ۲۰۲۱) زیرا در این روش فقط میزان تبخیر قطرات در طول پرواز خود از آبپاش تا سطح زمین محاسبه می‌شود. اگرچه، احتمال خطای روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری تلفات تبخیر و بادبردگی بیشتر از روش مستقیم اندازه‌گیری است (سرور، ۲۰۲۱)، اما روش مستقیم اندازه‌گیری زمان بر و پرهزینه است. همچنین در هنگام طراحی سامانه آبیاری بارانی، امکان آزمایش و یا تعیین مقدار تلفات تبخیر و بادبردگی در سناریوهای متفاوت طراحی، مشکل خواهد بود؛ بنابراین بسیاری از محققین سعی کرده‌اند که مقدار این تلفات را به طور غیرمستقیم و مبتنی بر مدل‌های رگرسیونی ارائه دهند.

یکی از روش‌های رایج و همچنین پیشنهادی در استاندارد "ضوابط و معیارهای فنی روش‌های آبیاری تحت فشار (طراحی)" نشریه شماره ۲۸۶^۳ از انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، برای برآورد میزان تلفات تبخیر و بادبردگی در طراحی سامانه‌های آبیاری بارانی، استفاده از نمودار فراست و شوالن (۱۹۵۵) است. نمودار فراست و شوالن حاصل نتایج بیش از ۷۰۰ آزمایش و شامل ۵ عامل مؤثر بر میزان تلفات تبخیر و بادبردگی (قطر نازل، فشار کارکر، سرعت باد، کمبود فشار بخار اشباع و درجه حرارت) است. به عبارتی، تحقیقات مذکور یکی از جامع‌ترین تحقیقاتی بوده است که تاکنون روی میزان تلفات تبخیر و بادبردگی انجام شده است که به گزارش تریمر^۳ (۱۹۸۷)، گزارش مذکور، در دسترس نمی‌باشد. اما استفاده از این نمودار اندکی پیچیده و زمان‌بر است. تریمر (۱۹۸۷) روی نمودار مذکور، تحلیل‌های زیادی انجام داد که منجر به استخراج رابطه‌ای جهت برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی شد. مزیت رابطه تریمر، سهولت استفاده از آن و امکان کاربرد آن در برنامه‌های کامپیوتری بود. اما استفاده از رابطه مذکور همراه با ملاحظات فراوانی است؛ به طوری که در برخی از بازه‌های عوامل مؤثر، به دلیل افزایش خطا، استفاده از آن توصیه نشده است و یا در برخی شرایط، ضرایب ثابت معادله متفاوت است. جهت اطلاع از جزئیات بیشتر می‌توان به مقاله مذکور مراجعه نمود. علی‌رغم مسائل ذکرشده، در شرایط حاضر، در طراحی سامانه‌های آبیاری بارانی، از معادله تریمر، بدون در نظر گرفتن ملاحظات آن استفاده می‌کنند. هدف اصلی این تحقیق، افزایش دقت و بهبود معادله تریمر با استفاده از نمودار فراست و شوالن است. به عبارتی، در تحقیق حاضر با اصلاح ضرایب ثابت معادله تریمر، علاوه بر این که میزان دقت آن بهبود می‌یابد، امکان استفاده از آن برای تمامی بازه‌های عوامل مؤثر در نمودار فراست و شوالن امکان‌پذیر خواهد شد.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

باتوجه به تحقیقات صورت‌گرفته، مطالعات زیادی در زمینه پژوهش موردنظر انجام شده است که به دلیل کاهش حجم مطلب، خلاصه مطالعات انجام شده توسط محققین داخلی در ارتباط با تلفات تبخیر و بادبردگی در ایران به شرح زیر است:

1. Thompson et al
2. Yonts et al
3. Trimmer

جدول ۱. خلاصه مطالعات انجام شده توسط محققین داخلی در ارتباط با تلفات تبخیر و بادبردگی در ایران

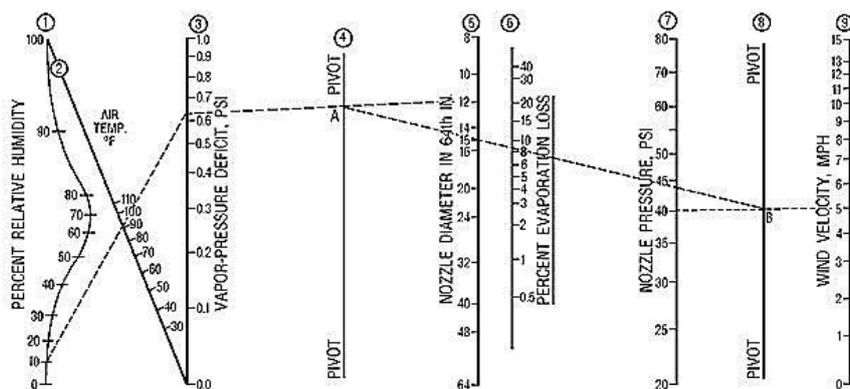
ردیف	منبع	منطقه مورد مطالعه	سامانه آبیاری	تلفات تبخیر و بادبردگی (%)
۱	زمانی سپهوند (۱۴۰۲)	خرم‌آباد	کلاسیک ثابت	چغندرقد: ۱۴/۸ پیاز: ۱۳/۸
۲	مولایی و همکاران (۱۳۹۵)	دشت کوهدشت لرستان	کلاسیک ثابت	۲/۷ - ۱۵/۸
۳	سیدزاده و همکاران ^۱ (۲۰۲۲)	دشت کنگاور کرمانشاه	کلاسیک ثابت	۵ - ۳۸
۴	باقرخانی و همکاران (۱۳۹۸)	سنقر کرمانشاه	کلاسیک ثابت	۷/۱۰ - ۴/۷
۵	معروف پور و همکاران ^۲ (۲۰۱۹)	دشت دهگلان کردستان	کلاسیک ثابت	۹ - ۲۹
۶	کریمی و همکاران (۱۳۹۵)	دشت دهگلان کردستان	کلاسیک ثابت	روز: ۲۲/۵ شب: ۶/۹
۷	یمین مشرفی و همکاران (۱۳۸۹)	دشت دهگلان کردستان	لوله چرخ‌دار	۳/۳ - ۱۸/۶
۸	فاریابی و همکاران (۱۳۸۹)	دشت دهگلان کردستان	کلاسیک ثابت	۶/۳ - ۱۷/۱
۹	رستمیان و همکاران (۱۳۹۳)	سنندج	کلاسیک ثابت	۵/۵ - ۳۷/۶
۱۰	زارع ابیان و همکاران (۱۳۹۹)	همدان	کلاسیک ثابت	۴/۱۹ - ۱/۴
۱۱	سالمی و رضوانی (۱۳۹۵)	اصفهان همدان	کلاسیک ثابت	۶
۱۲	بختیاری و همکاران (۱۳۹۹)	استان مرکزی	کلاسیک ثابت	به ترتیب ۱۹/۶ و ۱۱/۸
۱۳	برادران هزاوه (۱۳۸۴)	اراک	کلاسیک ثابت	۵/۵ - ۲۰/۵
۱۴	حسینی و همکاران (۱۳۹۹)	مغان	سامانه عقربه‌ای	۱۸ - ۷
۱۵	رنوف و همکاران (۱۳۹۷)	مغان	کلاسیک ثابت	۳۴ - ۶
۱۶	حمیدی و همکاران ^۳ (۲۰۱۶)	مغان	سامانه عقربه‌ای	۵/۳۲
۱۷	محمدی و همکاران (۱۳۹۹)	دشت اردبیل	کلاسیک ثابت	۲/۲ - ۱۷/۷
۱۸	میربلوچ و همکاران (۱۳۹۹)	خاش	کلاسیک ثابت	۱۲/۲۹ - ۲/۶
۱۹	کیانی و همکاران (۱۳۹۶)	استان گلستان	کلاسیک ثابت، عقربه‌ای، خطی، قرقره‌ای	۵ - ۴۰
۲۰	مجدسلیمی و همکاران (۱۳۹۴)	استان گیلان	کلاسیک ثابت	۴/۸ - ۱۳
۲۱	رحمت‌آبادی و همکاران (۱۳۹۱)	اهواز	کلاسیک ثابت	۱/۴ - ۱۲/۸
۲۲	دلیر حسن‌نیا و همکاران (۱۳۹۰)	تبریز	سامانه عقربه‌ای	۱۰/۴ - ۲۲/۶
۲۳	سی‌وسه مرده و بایزیدی (۱۳۹۰)	مهاباد	کلاسیک ثابت	۸/۲ - ۲۷/۵
۲۴	عرفانیان و همکاران (۱۳۸۷)	استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی	لوله چرخ‌دار	۱۰/۱ - ۱۶/۶

1. Seyedzadeh et al
2. Maroufpoor et al
3. Hamdi et al

روش پژوهش

۱. نمودار فراست و شوالن

فراست و شوالن^۱ در سال ۱۹۵۵، با استفاده از تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از ۷۰۰ آزمایش، نموداری را جهت تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی ارائه دادند (**Error! Reference source not found.**). آزمایش‌ها در مزارع کشاورزی و شرایط اقلیمی نیمه خشک ایلات آریزونا انجام شد. در این نمودار ۷ خط با دو محور وجود دارد. پارامترهای مورد نیاز در این نمودار شامل درجه حرارت محیط، رطوبت نسبی، سرعت باد، فشار آبپاش و قطر نازل است. بازه تغییرات رطوبت نسبی، ۰ تا ۱۰۰ درصد، درجه حرارت محیط، ۳۰ تا ۱۱۰ درجه فارنهایت (۱/۱ - تا ۴۳/۳ درجه سانتی‌گراد)، قطر نازل، ۸:۶۴ تا ۶۴:۶۴ اینچ (۳/۲ تا ۲۵/۴ میلی‌متر)، فشار کارکرد آبپاش، ۲۰ تا ۸۰ پوند بر اینچ مربع (۱۳۷/۹ تا ۵۵۱/۶ کیلوپاسکال)، سرعت باد، ۰ تا ۱۵ مایل بر ساعت (۰ تا ۶/۷ متر بر ثانیه) است. آن‌ها دریافتند که میزان تلفات تبخیر و بادبردگی رابطه مستقیم با سرعت باد و فشار آب و رابطه عکس با رطوبت نسبی و اندازه قطر نازل دارد. آزمایش‌های فراست و شوالن نشان داد میزان تلفات تبخیر و بادبردگی در مواقع آفتابی، دمای بالای محیط و رطوبت نسبی پایین، حدود ۳۵ تا ۴۵ درصد است. نمودار مذکور، هنوز یکی از جامع‌ترین روش‌ها در مجامع بین‌المللی برای محاسبه تلفات تبخیر و بادبردگی است. کلر و بلایسنر (۱۹۹۰) بر پایه نتایج آزمایشات فراست و شوالن، روشی را بر مبنای پتانسیل تبخیر و تعرق منطقه، برای برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی ارائه دادند. در بسیاری از کشورها، همچون امریکا (کلر و بلایسنر، ۱۹۹۰)، هندوستان (میکائیل، ۲۰۰۸)، اسپانیا (پلایان و ماتئوس^۲، ۲۰۰۶) و ایران (استاندارد شماره ۲۸۶)، روش فراست و شوالن (۱۹۵۵) به‌عنوان یک روش معتبر برای برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی معرفی و پیشنهاد می‌شود. اما یکی از محدودیت‌ها و معایب کاربرد نمودار مذکور این است که جهت تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی، بایستی بر روی نمودار و به‌صورت گرافیکی، اقدامات لازم صورت گیرد.



شکل ۱. نمودار ارائه‌شده توسط فراست و شوالن در سال ۱۹۵۵ جهت تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی (فراست و شوالن، ۱۹۵۵)

۲. رابطه تریمر

تریمر (۱۹۸۷) روی نمودار فراست و شوالن تجزیه و تحلیل های زیادی را به عمل آورد و سرانجام مطالعات او منجر به ارائه معادله ای شد که با استفاده از آن می توان میزان تلفات تبخیر و بادبردگی را تخمین زد. در ابتدا تریمر با استفاده از معادله تنس^۱ (۱۹۳۰)، و با استفاده از پارامترهای درجه حرارت محیط و رطوبت نسبی، پارامتر کمبود فشار بخار اشباع را محاسبه کرد (معادله ۱). سپس ابعاد هر یک از خطوط اصلی نمودار، با استفاده از یک تبلت دیجیتالی اندازه گیری شد. سپس با استفاده از روابط مثلثات متشابه و مقادیر اندازه گیری شده، معادله ۲ را برای محاسبه تلفات تبخیر و بادبردگی ارائه داد. مزیت این روش آن است که با معادله ریاضی قابل محاسبه بوده و می توان آن را در برنامه های کامپیوتری وارد نمود.

$$e_s - e_a = 0.61(1 - RH)e^{\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)} \quad (1)$$

$$WDEL = \left[1.98D_n^{-0.72} + 0.22(e_s - e_a)^{0.63} + 3.6 \times 10^{-4}P^{1.16} + 0.14V_w^{0.7} \right]^{4.2} \quad (2)$$

که در این روابط، $WDEL$ ، تلفات تبخیر و بادبردگی (درصد)؛ D_n ، قطر نازل اصلی (میلی متر)؛ $e_s - e_a$ ، کمبود فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)؛ P ، فشار کارکرد آبیاش (کیلو پاسکال)؛ V_w ، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)؛ T ، درجه حرارت محیط (درجه سانتی گراد)؛ e ، عدد نپر (2.718؛ e) و RH ، رطوبت نسبی (بدون بُعد) است. پارامتر کمبود فشار بخار اشباع به صورت تابعی از درجه حرارت بوده و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می شود.

به گزارش تریمر، معادله مذکور، بیشترین تطابق را با نمودار فراست و شوالن (۱۹۵۵) در مقادیر نزدیک به محدوده مرکزی پارامترها دارد. میزان خطای معادله در نزدیکی مقادیر مرکزی، حدود ۱۰ درصد است. در نزدیک مقادیر انتهایی نمودار، خطاها بیشتر و ممکن است به بیش از ۴۰ درصد برسد (تریمر، ۱۹۸۷). همچنین اگر از این معادله برای فشارهای زیر ۲۰۷ کیلو پاسکال یا نازل های با قطر بزرگ تر از ۱۲/۷ میلی متر استفاده شود، مقدار تلفات را نسبت به نمودار، بیش بر آورد محاسبه می کند. جهت بهبود دقت در محدوده های مذکور، می توان از ضرایب جایگزین در بخش های مربوط به نازل و فشار کارکرد، در معادله استفاده نمود (تریمر، ۱۹۸۷).

به منظور افزایش دقت معادله تریمر، در این پژوهش، تلاش گردید نمودار فراست و شوالن، رقوم سازی شده و مجموعه داده های مناسبی از آن استخراج گردد. در همین راستا، تعداد ۶۵۰۱ سری داده (هر سری، شامل متغیرهای مستقل ورودی: رطوبت نسبی، درجه حرارت محیط، کمبود فشار بخار اشباع، قطر نازل، فشار کارکرد آبیاش، سرعت باد و متغیر وابسته: تلفات تبخیر و بادبردگی) از نمودار مذکور استخراج شد و مورد استفاده قرار گرفت. رقوم سازی نمودار مذکور و استخراج داده ها با استفاده از نرم افزار (Grapher (Ver. 7.0.1870, Golden, Colorado 80401 انجام شد. از مجموع کل داده ها، ۷۰ درصد (۴۵۵۰ سری) به طور تصادفی و برای آموزش استفاده شد و ۳۰ درصد باقی مانده (۱۹۵۱ سری)، جهت صحت سنجی معادله اصلاح شده، در نظر گرفته شد.

۳. شاخص های ارزیابی

جهت ارزیابی دقت و صحت معادله تریمر و معادله اصلاح شده آن، از شاخص های آماری قدر مطلق میانگین خطای نسبی ($AMRE^2$, %)، سطح پیش بینی ۲۵ درصد ($P_{0.25}$ ، درصد مقادیر تخمینی $WDEL$ که کمتر از ۲۵ درصد با مقدار اندازه گیری شده تفاوت دارند)، و شاخص خطای نسبی (RE , %) استفاده خواهد شد. شاخص های $AMRE$ و RE ، به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$AMRE(\%) = \frac{100}{n} \sum \left| \frac{(WDEL_{Exp} - WDEL_{Cal})}{(WDEL_{Exp})} \right| \quad (3)$$

$$RE(\%) = \frac{(WDEL_{Exp} - WDEL_{Cal})}{(WDEL_{Exp})} \times 100 \quad (4)$$

1. Tetens

2. Absolute Mean Relative Error (AMRE)

در این روابط، $WDEL_{Cal}$ و $WDEL_{Exp}$ ، به ترتیب، تلفات تبخیر و بادبردگی در دو حالات محاسباتی و مشاهداتی (مقادیر مستخرج از نمودار) می‌باشند. شاخص $AMRE$ ، یکی از معیارهای مهم جهت ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینی است. این شاخص میزان اختلاف مطلق پیش‌بینی‌ها از مقادیر واقعی را به صورت نسبی (نسبت به مقدار واقعی) اندازه‌گیری می‌کند. به طور کلی، $AMRE$ بین ۰٪ تا ۱۰٪ نشان‌دهنده عملکرد عالی مدل است که پیش‌بینی‌ها با دقت بالا و نزدیک به داده‌های واقعی انجام شده است. $AMRE$ بین ۱۰٪ تا ۲۰٪ نشان‌دهنده عملکرد خوب تا متوسط است. در صورتی که $AMRE$ بالاتر از ۲۰٪ باشد، این نشان‌دهنده عملکرد ضعیف مدل است.

بر اساس ۷۰ درصد داده‌های انتخابی برای آموزش و مبتنی بر معیار حداقل کردن میانگین قدرمطلق خطای نسبی، ضرایب معادله تریمر اصلاح‌شده و تعیین گردید. این فرایند از طریق ابزار Solver در محیط نرم‌افزار Excel انجام شد.

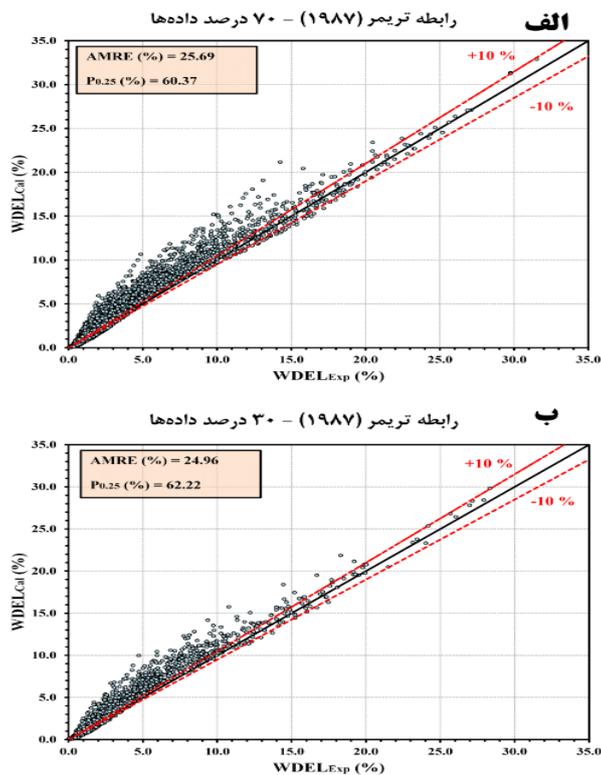
یافته‌های پژوهش

۱. بررسی دقت و صحت رابطه تریمر (۱۹۸۷)

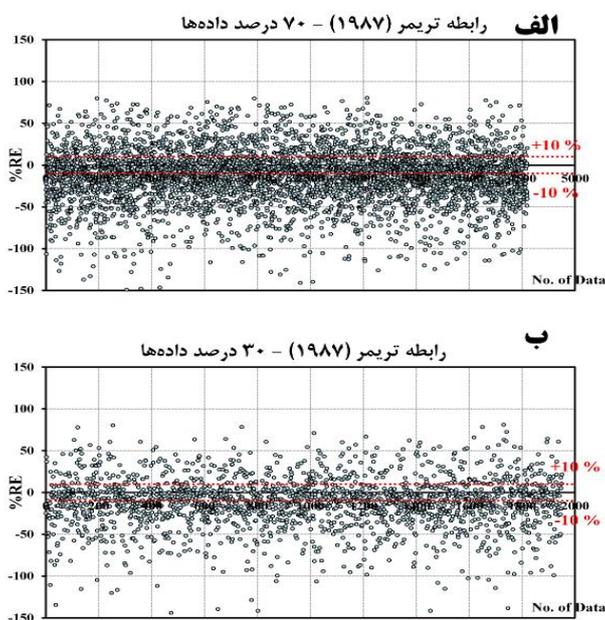
جهت بررسی دقت و صحت معادله پیشنهادی توسط تریمر (۱۹۸۷) از ۶۵۰۱ سری داده استخراج‌شده از نمودار فراست و شوالن استفاده شد. شکل ۲ دقت و صحت معادله پیشنهادی را در دو حالت مختلف (۷۰ درصد داده‌ها، استفاده‌شده جهت آموزش معادله جدید؛ ۳۰ درصد داده‌ها، مورداستفاده جهت واسنجی معادله جدید) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دقت و صحت رابطه تریمر (۱۹۸۷) مبتنی بر مجموعه داده‌های مورداستفاده، مطلوب نیست؛ به گونه‌ای که میانگین قدرمطلق خطای نسبی در شرایط استفاده از ۷۰ درصد داده‌ها (آموزش) و ۳۰ درصد داده‌ها (واسنجی)، به ترتیب، ۲۵/۶۹ و ۲۴/۹۶ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف معادله تریمر در تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی است. همچنین مقدار شاخص $P_{0.25}$ ، به ترتیب، ۶۰/۳۷ و ۶۲/۲۲ درصد بود. به عبارت دیگر، در حدود ۴۰ درصد تخمین‌های معادله تریمر، خطایی بیش از ۲۵ درصد دارند. در شکل ۳، روند تغییرات خطای نسبی ($RE\%$) معادله پیشنهادی تریمر (۱۹۸۷) ارائه شده است. باتوجه به شکل مذکور، گستره تغییرات درصد خطای نسبی در شرایط کاربرد معادله مذکور، بسیار زیاد است، که بیانگر عدم دقت و صحت معادله مذکور در تخمین WDEL است.

۲. ارزیابی محدوده تغییرات خطای معادله تریمر (۱۹۸۷)

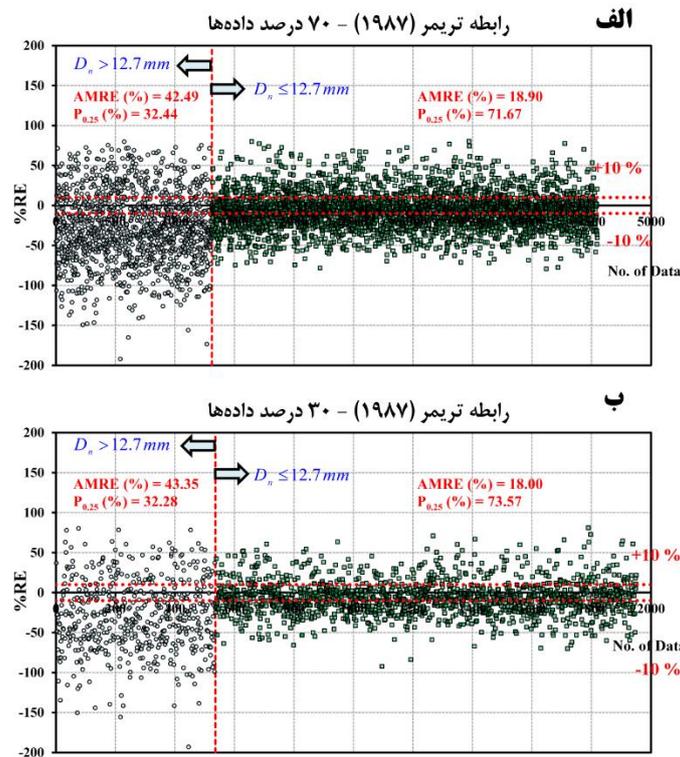
تریمر (۱۹۸۷) مقدار خطای معادله پیشنهادی خود را جهت تخمین WDEL، در یک سری از بازه‌های خاص ($D_n > 12.7 mm$ و یا $P < 270 kPa$) نامطلوب گزارش کرده و این موضوع را می‌توان یکی از ضعف‌های معادله مذکور دانست. شکل ۴ و شکل ۵، به ترتیب، روند تغییرات خطای نسبی و مقادیر شاخص‌های ارزیابی را به تفکیک بازه‌های مذکور برای اندازه قطر نازل و فشار کارکرد آبپاش نشان می‌دهد. باتوجه به شکل ۴، معادله پیشنهادی در شرایطی که اندازه نازل بیشتر از ۱۲/۷ میلی‌متر باشد، خطای بیشتری ($AMRE = 42.49\%; P_{0.25} = 32.28\%$)، در شرایط کاربرد مجموعه ۷۰ درصدی داده‌ها) نسبت به تخمین WDEL در نازل‌های با قطر کمتر از ۱۲/۷ میلی‌متر ($AMRE = 18.90\%; P_{0.25} = 71.67\%$)، در شرایط کاربرد مجموعه ۷۰ درصدی داده‌ها) داشته و این موضوع، ادعای تریمر (۱۹۸۷) را تأیید می‌نماید. این روند برای پارامتر فشار کارکرد آبپاش نیز صادق است. به گونه‌ای که میانگین قدرمطلق خطای نسبی از ۳۱/۰۲ درصد به ازای داده‌های با $P < 270 kPa$ ، به ۲۰/۸۹ درصد برای داده‌های با $P \geq 270 kPa$ تقلیل یافته است (شکل ۵). بنابراین، یکی از نقاط ضعف معادله مذکور، عدم دقت یکسان در تخمین WDEL در بازه‌های مختلف تغییرات پارامترهای مؤثر مستقل است.



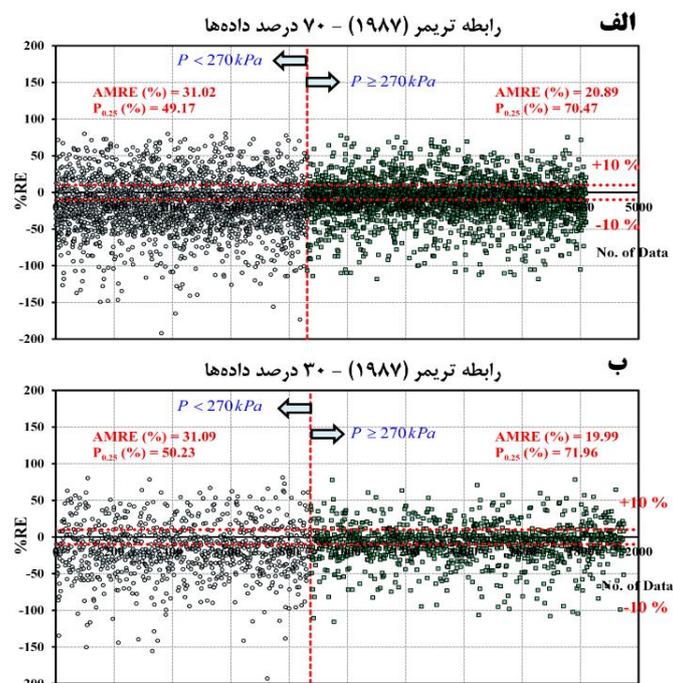
شکل ۲. روند تغییرات مقادیر تلفات تبخیر و بادبردگی مشاهداتی و محاسباتی (الف) بر اساس ۷۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش) (ب) بر اساس ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)



شکل ۳. روند تغییرات درصد خطای نسبی معادله پیشنهادی تریمر (۱۹۸۷) (الف) مبتنی بر ۷۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش) (ب) مبتنی بر ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)



شکل ۴. روند تغییرات خطای نسبی در محدوده‌های مختلف قطر نازل (الف) مبتنی بر ۷۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش) (ب) مبتنی بر ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)



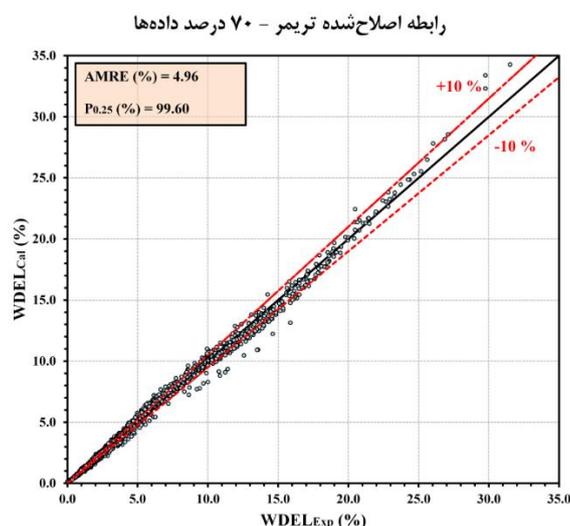
شکل ۵. روند تغییرات خطای نسبی در محدوده‌های مختلف فشار کارکرد آبیاش (الف) مبتنی بر ۷۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش) (ب) مبتنی بر ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)

۳. توسعه معادله جدید

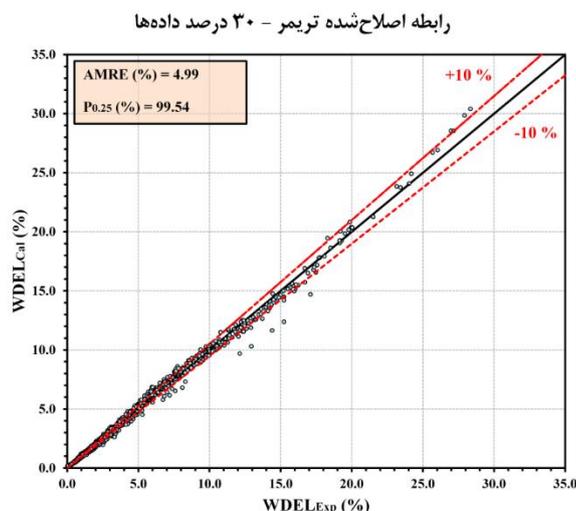
باتوجه به خطاهای قابل توجه معادله پیشنهادی تریمر (۱۹۸۷) در تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی، به ویژه در شرایط مرزی خاص، اصلاح ضرایب و توان‌های ثابت معادله مذکور مبتنی بر ۷۰ درصد داده‌های انتخابی تصادفی (جهت آموزش) صورت گرفت. معادله اصلاح شده به صورت زیر است:

$$WDEL = \left[0.962 D_n^{-7.4 \times 10^{-3}} + 4.2 \times 10^{-3} (e_s - e_a)^{0.622} + 2.2 \times 10^{-2} P^{0.138} + 3.5 \times 10^{-3} V_w^{0.564} \right]^{145.35} \quad (5)$$

پارامترهای معادله قبلاً تعریف شده است. شکل ۶ دقت و صحت معادله پیشنهادی را مبتنی بر ۷۰ درصد داده‌های مورد استفاده جهت آموزش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دقت و صحت معادله پیشنهادی به طور قابل توجهی بهبود پیدا کرده است؛ به گونه‌ای که، میانگین قدرمطلق خطای نسبی از ۲۵/۶۹ درصد (برای معادله تریمر (۱۹۸۷)) به ۴/۹۶ درصد کاهش یافته است. همچنین شاخص $P_{0.25}$ ، از ۶۰/۳۷ درصد به ۹۹/۶۰ درصد افزایش یافته است. در شکل ۷، دقت معادله اصلاح شده مبتنی بر ۳۰ درصد داده‌های واسنجی ارائه شده است. باتوجه به شکل مذکور، شاخص‌های ارزیابی در این حالت نیز بسیار مطلوب بوده ($AMRE = \%4.99; P_{0.25} = \%99.54$) و این موضوع، بیانگر دقت بسیار مناسب معادله توسعه یافته جهت برآورد WDEL است. به عبارت دیگر، دقت معادله توسعه یافته در تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی، با درجه عالی بوده و تقریباً ۱۰۰ درصد نتایج، خطایی کمتر از ۲۵ درصد دارند. در شکل ۸ روند تغییرات خطای نسبی برای معادله اصلاح شده ارائه گردیده است. باتوجه به شکل مذکور و مقایسه آن با شکل ۳، می‌توان نتیجه گرفت که دقت و صحت معادله پیشنهادی جدید بسیار مطلوب بوده و تقریباً در تمام شرایط، در بازه $\pm 10\%$ درصد تغییر می‌کند.



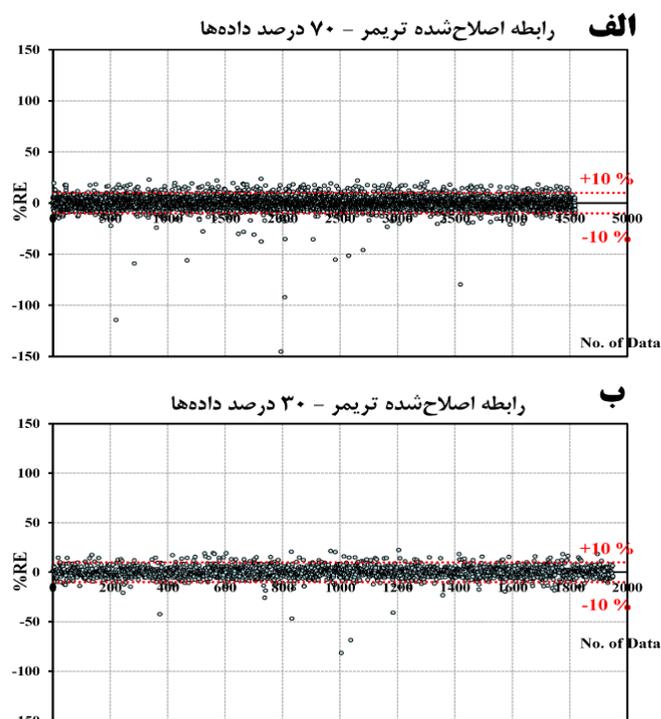
شکل ۶. روند تغییرات مقادیر تلفات تبخیر و بادبردگی مشاهداتی و محاسباتی مبتنی بر معادله اصلاح شده تریمر، بر اساس ۷۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش)



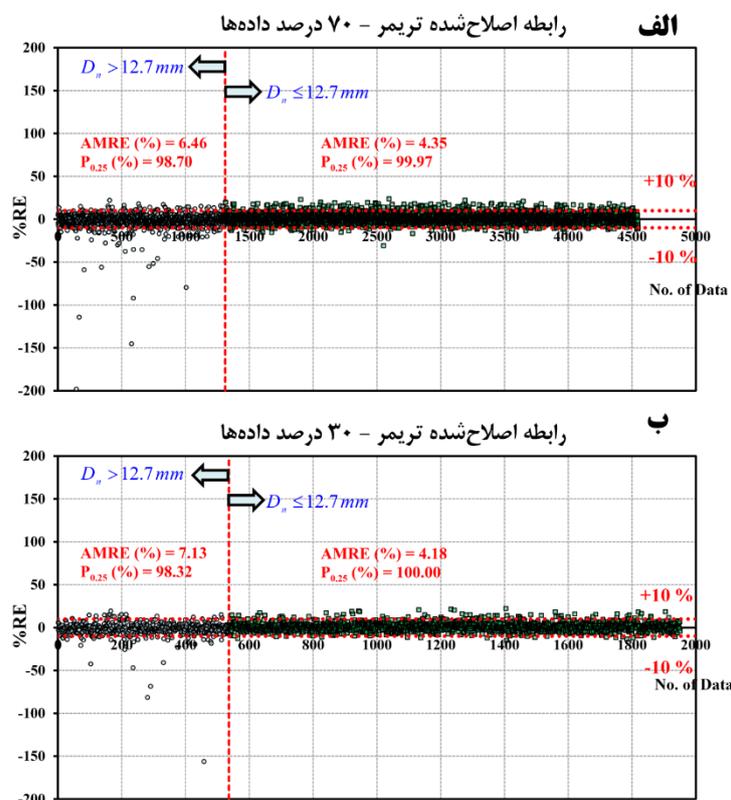
شکل ۷. روند تغییرات مقادیر تلفات تبخیر و بادبردگی مشاهداتی و محاسباتی مبتنی بر معادله اصلاح شده تریمر، بر اساس ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)

۴. ارزیابی محدوده تغییرات خطای معادله پیشنهادی جدید

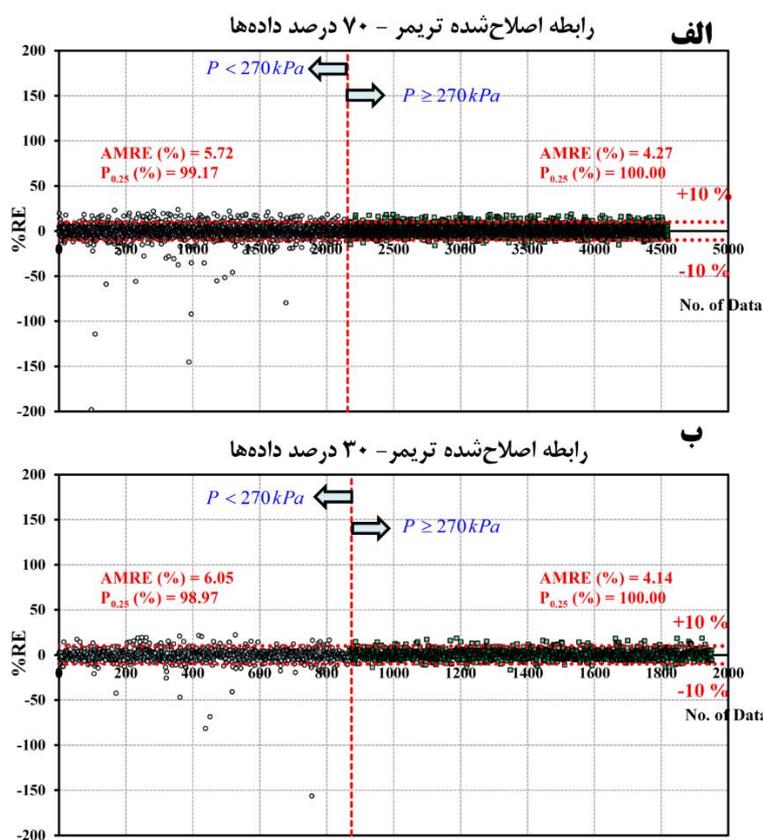
شکل ۹ و شکل ۱۰، به ترتیب، روند تغییرات خطای نسبی و مقادیر شاخص‌های آماری را برای اندازه قطر نازل و فشار کارکرد آبپاش را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹، معادله اصلاح شده برخلاف معادله تریمر (۱۹۸۷)، وابستگی به تغییرات اندازه نازل نداشته و مستقل از آن، به ازای همه شرایط، دقت و صحت بسیار مطلوبی دارد ($AMRE = 6.46\%$; $P_{0.25} = 98.70\%$). برای اندازه قطر نازل بیشتر از ۱۲/۷ میلی‌متر). شکل ۱۰ این موضوع را برای پارامتر فشار کارکرد آبپاش نیز تأیید می‌نماید (در شرایط کاربرد ۳۰ درصد از داده‌های واسنجی: $AMRE = 6.05\%$; $P_{0.25} = 98.97\%$). برای داده‌های با فشار کارکرد کمتر از ۲۷۰ کیلوپاسکال و $AMRE = 4.14\%$; $P_{0.25} = 100.00\%$). برای داده‌های با فشار کارکرد بیشتر از ۲۷۰ کیلوپاسکال). به عبارت بهتر، یکی از مزیت‌های اصلی معادله اصلاح شده نسبت به معادله تریمر (۱۹۸۷)، عدم وابستگی به روند تغییرات پارامترهای ورودی و اطمینان از تخمین دقیق آن در همه شرایط بهره‌برداری است.



شکل ۸. روند تغییرات درصد خطای نسبی معادله اصلاح شده تریمر (الف) مبتنی بر ۷ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش) (ب) مبتنی بر ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)



شکل ۹. روند تغییرات خطای نسبی معادله اصلاح شده تریمر، در محدوده‌های مختلف قطر نازل (الف) مبتنی بر ۷ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش) (ب) مبتنی بر ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)



شکل ۱۰. روند تغییرات خطای نسبی معادله اصلاح شده تریمر، در محدوده‌های مختلف فشار کارکرد آبپاش (الف) مبتنی بر ۷۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای آموزش) (ب) مبتنی بر ۳۰ درصد داده‌ها (انتخابی برای واسنجی)

بحث

هدف از پژوهش حاضر، مطالعه و بررسی دقت و صحت معادله پیشنهادی توسط تریمر (۱۹۸۷) جهت تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی در سامانه‌های آبیاری بارانی بود. علاوه بر ارزیابی معادله مذکور، تلاش گردید معادله‌ای دقیق‌تر، جامع‌تر و همچنین مستقل از محدوده تغییرات پارامترهای مؤثر توسعه یابد.

نتیجه‌گیری

میانگین قدرمطلق خطای نسبی (AMRE) معادله تریمر در شرایط استفاده از ۷۰ درصد داده‌ها (آموزش) و ۳۰ درصد داده‌ها (واسنجی)، به ترتیب، ۲۵/۶۹ و ۲۴/۹۶ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف معادله مذکور در تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی است. همچنین مقدار شاخص $P_{0.25}$ ، به ترتیب، ۶۰/۳۷ و ۶۲/۲۲ درصد به دست آمد که مقادیر مطلوبی نمی‌باشند. معادله مذکور، در شرایطی که اندازه نازل بیشتر از ۱۲/۷ میلی‌متر باشد، خطای بیشتری ($AMRE = \%42.49; P_{0.25} = \%32.28$) نسبت به نازل‌های با قطر کمتر از ۱۲/۷ میلی‌متر ($AMRE = \%18.90; P_{0.25} = \%71.67$) داشته و این موضوع، ادعای تریمر (۱۹۸۷) را تأیید می‌نماید. این روند برای پارامتر فشار کارکرد آبپاش نیز صادق است. به‌گونه‌ای که میانگین قدرمطلق خطای نسبی از ۳۱/۰۲ درصد به ازای داده‌های با $P < 270 kPa$ ، به ۲۰/۸۹ درصد برای داده‌های با $P \geq 270 kPa$ تقلیل یافته است. دقت و صحت معادله تریمر اصلاح‌شده، به طور قابل توجهی بهبود پیدا کرد؛ به‌گونه‌ای که، میانگین قدرمطلق خطای نسبی در شرایط استفاده از ۷۰ درصد و ۳۰ درصد داده‌ها، به کمتر از ۵ درصد کاهش یافت. همچنین شاخص $P_{0.25}$ ، تقریباً برابر

با ۱۰۰ درصد شد. این موضوع، بیانگر دقت بسیار مناسب معادله توسعه یافته جهت برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی است. به عبارت دیگر، دقت معادله توسعه یافته در تخمین تلفات تبخیر و بادبردگی، با درجه عالی بوده است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به طور برابر در شکل‌گیری ایده مقاله و نگارش نسخه اولیه و نسخه‌های بعدی آن مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم و تحقیقات و فناوری انجام شده است. بدین‌وسیله نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از مرکز اعلام می‌دارند.

منابع

- باقرخانی، علیرضا، زارع ابیانه، حمید، و قدمی فیروزآبادی، علی. (۱۳۹۸). عملکرد سیستم‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک در منطقه سنقر در استان کرمانشاه، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۳)، ۶۴۶-۶۳۸.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1398.13.3.7.7>
- بختیاری، سعید، محسنی موحد، سید اسدالله، مقدسی، مهنوش، و داوودمقامی، داود. (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک در استان مرکزی. نشریه پژوهش آب ایران، ۱۴(۱)، ۱۸-۹.
https://iwj.sku.ac.ir/article_10684.html?lang=en
- برادران هزاوه، فرانک. (۱۳۸۴). ارزیابی فنی سیستم‌های آبیاری تحت فشار اجرا شده در شهرستان اراک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و مهندسی آب دانشگاه اراک، اراک، ایران.
<https://dolat.ir/detail/410746> وب‌سایت پایگاه اطلاع‌رسانی دولت.
- حسینی، یاسر، رئوف، مجید، و نظری گیگلو، فردین. (۱۳۹۹). ارزیابی و مدل‌سازی تلفات تبخیر و باد بردگی سامانه آبیاری عقربه‌ای در منطقه مغان. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۷(۵)، ۱۲۷-۱۰۹.
<https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.17532.3302>
- دلیر حسن‌نیا، رضا، ناظمی، امیرحسین، اشرف صدرالدینی، علی، و فرسادی‌زاده، داود. (۱۳۹۰). مدل تعیین تلفات بادبردگی و تبخیر در اسپری نازل‌های سامانه آبیاری سنترپیوت. مجله دانش آب و خاک، ۲۱(۱)، ۱۴-۱.
https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_1241.html
- رحمت‌آبادی، وحید، برومندنسب، سعید، سخایی‌راد، حسین، و باوی، عادل. (۱۳۹۱). تلفات تبخیر و باد دو نوع آبپاش تک نازله و سه نازله در سیستم آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک در شرایط اقلیمی اهواز. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۴(۶)، ۲۷۲-۲۶۵.
<https://www.sid.ir/paper/131412/en>
- رستمیان، بهاره، معروف پور، عیسی، آذربو، نسیم، و فرزانه کیا، فروغ. (۱۳۹۳). بررسی اثر عوامل جوی و هیدرولیکی بر میزان تلفات تبخیر و باد آبپاش‌های ضربه‌ای در سیستم آبیاری بارانی کلاسیک ثابت. نشریه آب و خاک، ۲۸(۴)، ۶۶۹-۶۶۱.
<https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.29061>

- رئوف، مجید، حسینی، یاسر، و نظری گیگلو، فردین. (۱۳۹۷). ارزیابی سیستم کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک و مدل‌سازی تلفات تبخیر و باد بردگی در آبپاش مدل ADF 25 در منطقه مغان. *نشریه حفاظت منابع آب و خاک*، ۴(۷)، ۱۳۴-۱۱۷. <https://sanad.iau.ir/en/Journal/wsrcj/Article/828917>
- زارع ابیلنه، حمید، دلنایی، اعظم، اخوان، سمیرا، و جوزی، مهدی. (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبیاری نوین در شهرستان همدان. *مجله مدیریت آب و آبیاری*، ۱۰(۳)، ۳۸۱-۳۹۵. <https://doi.org/10.22059/jwim.2021.300563.784>
- زمانی سپهوند، سعید، ترابی پوده، حسن، و نصرالهی، علی حیدر. (۱۴۰۲). برآورد تلفات تبخیر و بادبردگی سامانه‌های آبیاری بارانی تحت تأثیر مدیریت‌های مختلف بهره‌برداری (مطالعه موردی: طرح چغاهرووشی خرم‌آباد). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۷(۱)، ۱۲۹-۱۴۱. https://idj.iaid.ir/article_168111_en.html
- سالمی، حمید رضا، و رضوانی، سید معین‌الدین. (۱۳۹۵). ارزیابی فنی سیستم آبیاری بارانی در شرایط زارعین (استان اصفهان و همدان). *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۳(۳)، ۳۴۵-۳۵۰. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.3204>
- سی و سه مرده، معروف، و بایزیدی، مطلب. (۱۳۹۰). ارزیابی فنی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت در مطالعه موردی استان آذربایجان غربی-مهاباد. *مجله مهندسی منابع آب*، ۴(۸)، ۶۳-۷۶. <https://www.magiran.com/p869893>
- عباسی، فریبرز، سهراب، فرحناز، و عباسی، نادر. (۱۳۹۵). ارزیابی وضعیت راندمان آب آبیاری در ایران. *مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*، ۱۷(۶۷)، ۱۲۰-۱۱۳. <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.109617>
- عرفانیان ارغوانیان سرشوری، مریم، علیزاده، امین، موسوی بایگی، محمد، انصاری، حسین، و باغانی، جواد. (۱۳۸۷). مطالعه پتانسیل اثرات تبخیر و بادبردگی بر کارایی سیستم‌های آبیاری بارانی در دشت‌های استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی. *نشریه علوم و صنایع کشاورزی*، ۲۲(۱)، ۱۷۲-۱۶۱. https://www.researchgate.net/publication/277797904_
- فاریابی، ارسلان، معروف پور، عیسی، و قمرنیا، هوشنگ. (۱۳۸۹). بررسی و ارزیابی سیستم‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت دشت دهگلان کردستان، *مجله علوم آب و خاک*، ۱۴(۵۴)، ۱-۱۵. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763594.1389.14.54.1.0>
- کریمی، بختیار، محمدی‌نسب، آمانج، و عبدی، چنور. (۱۳۹۵). ارزیابی تلفات تبخیر و بادبردگی در سیستم آبیاری بارانی شبانه و روزانه. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۰(۵۵)، ۱۳۵-۱۲۸. https://idj.iaid.ir/article_55275_en.html
- کیانی، علیرضا، شاکر، مجتبی، و طبرسا، رحیم. (۱۳۹۶). بررسی کارایی سامانه‌های آبیاری بارانی اجراشده در استان گلستان. *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۴(۶)، ۲۷۰-۲۵۷. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12201.2670>
- مجدسلیمی، کوروش، صلواتیان، سید بابک، و امیری، ابراهیم. (۱۳۹۴). ارزیابی فنی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک اجراشده در باغ‌های چای استان گیلان. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۹(۲)، ۳۴۹-۳۳۶. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.29497>
- محمدی، مهران، عزیزی مبصر، جوانشیر، و رئوف، مجید. (۱۳۹۹). ارزیابی فنی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک در دشت اردبیل. *مجله پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۴(۳)، ۳۷۳-۳۳۵. <https://doi.org/10.22092/jwra.2020.342287.771>
- مولایی، زینب، معروف پور، عیسی، و ملکی، عباس. (۱۳۹۵). بررسی و ارزیابی فنی برخی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت دشت کوه‌دشت. *پژوهش آب ایران*، ۱۰(۲)، ۱۳۲-۱۲۵. <https://doi.org/10.1002/ird.648>

- میربلوچ، محمد حنیف، دلبری، معصومه، و پیری، حلیمه. (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری بارانی کلاسیک با آبپاش متحرک در شهرستان خاش. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۰(۱)، ۳۱-۴۴.
<https://doi.org/10.22059/jwim.2020.292131.732>
- ناصری، ابوالفضل، عباسی، فریبرز، و اکبری، مهدی. (۱۳۹۶). برآورد آب مصرفی در بخش کشاورزی به روش بیلان آب. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۸(۶۸)، ۱۷-۳۲.
<https://doi.org/10.22092/aridse.2017.105338.1057>
- نشریه شماره ۲۸۶. (۱۳۸۳). ضوابط و معیارهای فنی آبیاری تحت فشار (طراحی). دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، تهران، ایران. <https://sazeplus.com/n-286>
- یمین مشرفی، گوران، معروف پور، عیسی، قمرنیا، هوشنگ، و فاریابی، ارسلان. (۱۳۸۹). یادداشت فنی: تعیین مناسب‌ترین تابع توزیع ضریب یکنواختی و یکنواختی توزیع سیستم‌های آبیاری بارانی دشت دهگلان کردستان. نشریه مجله پژوهش آب/ایران، ۴(۶)، ۹۵-۹۷. https://iwrrj.sku.ac.ir/article_10819.html?lang=en

References

- Abbasi, F., Naseri, A., Sohrab, F., Baghani, J., Abbasi, N., & Akbari, M. (2016). Promoting water use productivity. Agricultural Engineering Research Institute. Agricultural Extension, *Education and Research Organization*, 17(67), 113-120. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.109617>
- Anonymous (2023). *Dolat.ir official information website*. (In Persian) <https://dolat.ir/detail/410746>
- Bagherkhani, A., Zare Abyaneh, H., & Ghadami Firoozabadi, A. (2019). *Performance of fixed classic sprinkler irrigation systems with portable sprinklers in the Songhor region of Kermanshah Province*. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(3), 638–646. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1398.13.3.7.7>
- Bakhtiari, S., Mohseni Movahed, S. A. , Moghaddasi, M., & Davoudmaghami, D. (2020). Performance evaluation of semi-portable sprinkler irrigation systems in Markazi Province. *Iranian Water Researches Journal*, 14(1), 9-18. (In Persian) https://iwj.sku.ac.ir/article_10684.html?lang=en
- Bavi, A., Kashkuli, H., Boroomand, S., Naseri, A., & Albaji, M. (2009). Evaporation losses from sprinkler irrigation systems under various operating conditions. *Journal of Applied Sciences*, 9(3), 597-600. <http://www.scialert.net/qredirect.php?doi=jas.2009.597.600&linkid=pdf>
- Delirhasannia, R., Nazemi, A., Sadraddini, A. and Farsadizadeh, D. (2014). Wind Drift and Evaporation Losses Model in Spray Nozzles of Center Pivot Irrigation system. *Water and Soil Science*, 21(1), 1-14. (In Persian) https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_1241.html
- Dylla, A., & Shull, H. (1983). Estimating losses from a rotating-boom sprinkler. *Transactions of the ASAE*, 26(1), 123-0125. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=33887>
- EP496, A. S. A. E. (2006). 3. Agricultural Machinery Management. *ASAE Standard*, 384-390. <https://webstore.ansi.org/Standards/ASABE/ASAEEP496FEB2006R2015Cor?source=preview>
- Erfanian Arghavanian Soroushri, M., Alizadeh, A., Mousavi Baygi, M., Ansari, H., & Baghani, J. (2008). Study of the potential effects of evaporation and wind drift on the efficiency of sprinkler irrigation systems in the plains of Razavi, North, and South Khorasan provinces. *Journal of Agricultural Science and Industries*, 22(1), 161–172. (In Persian) https://www.researchgate.net/publication/277797904_
- Faci, J., & Bercero, A. (1991). Efecto del viento en la uniformidad en las perdidas por evaporacion y arrastre en el riego por aspersion. *Investigación agraria. Producción y protección vegetales*, 6(2), 171-182. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6533523>
- Faryabi, A., Maroufpoor, E., & Ghamarnia, H. (2011). Investigation and evaluation of solid-set systems in Dehgolan Plain of Kurdistan. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 14(54), 1-16. (In Persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763594.1389.14.54.1.0>
- Frost, K.R. & H.C. Schwalen. (1955). Sprinkler evaporation losses. *Agricultural Engineering*, 36, 526-528. <https://www.semanticscholar.org/paper/Sprinkler-Evaporation-Losses-Schwalen-Frost/a3685020d207512d7d756d01de4ae5383627dbce>
- Hamdi Ahmadabad, Y., Liaghat, A., Sohrabi, T., Rasoulzadeh, A., Nazari, B., & Liaghat, A. (2016). Performance evaluation of center pivot systems in Moghan Agro-Industry and Livestock. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(4), 723-729. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.59979>
- Hazaveh, F. B. (2005). Technical evaluation of pressurized irrigation systems implemented in Arak City (Unpublished master's thesis). Faculty of Water Science and Engineering, *Arak University*, Arak, Iran.

- Hendawi, M., Molle, B., Folton, C., & Granier, J. (2005). Measurement accuracy analysis of sprinkler irrigation rainfall in relation to collector shape. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(5), 477-483.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:5\(477\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:5(477))
- Hoseini, Y., Raouf, M., & Nazari-Gigloo, F. (2020). Evaluation and Modeling Wind drift and Evaporation Losses of the Center Pivot Irrigation System in Moghan Region. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(5), 109-127. (In Persian)
<https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.17532.3302>
- Karimi, B., Mohammadi Nasab, A., & Abdi, C. (2016). Evaluation of Evaporation and Wind drift Losses at Day and Night Sprinkler Irrigation. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 10(1), 128-135. (In Persian) https://idj.iaid.ir/article_55275_en.html
- Keller, J. (1983). SCS national engineering handbook Section 15. *US Government Office Publications, Washington, DC*.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/21/SCS_national_engineering_handbook_%28IA_CAT71334647011%29.pdf
- Keller, J., & Bliesner, R. D. (1990). Sprinkle and trickle irrigation, Springer Publications, New York. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=599708>
- Kiani, A. R., Shaker, M. and Tabarsa, R. (2018). Assessment of implemented sprinkler irrigation systems in Golestan province.. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(6), 257-270. (In Persian) <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12201.2670>
- King, B., Dungan, R., & Bjorneberg, D. (2012). Evaluation of center pivot sprinkler wind drift and evaporation loss. 2012 Dallas, Texas, United states.
<https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=41716>
- Kinzer, G. D., & Gunn, R. (1951). The evaporation, temperature and thermal relaxation-time of freely falling waterdrops. *Journal of Atmospheric Sciences*, 8(2), 71-83.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1951\)008%3C0071:TETATR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1951)008%3C0071:TETATR%3E2.0.CO;2)
- Luz, P., & Heermann, D. (2005). A statistical approach to estimating runoff in center pivot irrigation with crust conditions. *Agricultural Water Management*, 72(1), 33-46.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.013>
- Majdsalimi, K., Salavatian, B., & Amiri, E. (2015). Technical Evaluation of Sprinkler Irrigation Systems which were Implemented in Tea Fields of the Guilan Province. *Water and Soil*, 29(2), 336-349. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.29497>
- Maroufpoor, S., Maroufpoor, E., & Khaledi, M. (2019). Effect of farmers' management on movable sprinkler solid-set systems. *Agricultural Water Management*, 223, 105691. (In Persian) <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105691>
- Maroufpoor, E., Sanikhani, H., Emamgholizadeh, S., & Kişi, Ö. (2018). Estimation of Wind drift and evaporation losses from sprinkler irrigation systems by different data-driven methods. *Irrigation and drainage*, 67(2), 222-232.
<https://doi.org/10.1002/ird.2182>
- Maroufpoor, S., Shiri, J., & Maroufpoor, E. (2019). Modeling the sprinkler water distribution uniformity by data-driven methods based on effective variables. *Agricultural Water Management*, 215, 63-73. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.008>
<https://portalinvestigacion.upct.es/documentos/5d5ba6df2999520e90d04554?lang=gl>
- Mirbalooch, M. H., Delbari, M., & Piri, H. (2020). Evaluation of performance of classical sprinkler irrigation systems with mobile sprinkler in Khash city. *Water and Irrigation Management*, 10(1), 31-44. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jwim.2020.292131.732>
- Mohamadi, M., Azizi mobaser, J., & Raouf, M. (2020). Technical Evaluation of Movable Sprinkler Solid-Set Irrigation Systems in Ardabil Plain. *Journal of Water Research in Agriculture*, 34(3), 335-373. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/jwra.2020.342287.771>

- Mohamed, A. E., Hamed, A. M. N., Ali, A. A. M., & Abdalhi, M. A. (2019). Effect of Weather Conditions, Operating Pressure and Riser Height on the Performance of Sprinkler Irrigation System. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 12(1), 01-09. <http://dx.doi.org/10.9790/2380-1201010109>
- Mohamed, A. Z., Peters, R. T., Sarwar, A., Molaei, B., & McMoran, D. (2021). Impact of the intermittency movement of center pivots on irrigation uniformity. *Water*, 13(9), 1167. <https://doi.org/10.3390/w13091167>
- Moulaee, Z., maroufpoor, E. and maleki, A. (2016). Investigation and technical evaluation of solid set sprinkler irrigation systems in Koohdasht plain. *Iranian Water Researches Journal*, 10(2), 125-132. (In Persian) https://iwrij.sku.ac.ir/article_10486.html?lang=en
- Molle, B., Tomas, S., Hendawi, M., & Granier, J. (2012). Evaporation and wind drift losses during sprinkler irrigation influenced by droplet size distribution. *Irrigation and Drainage*, 61(2), 240-250. <https://doi.org/10.1002/ird.648>
- Montero Martínez, J. (1999). Análisis de la distribución de agua en sistemas de riego por aspersión estacionario. Desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersión (sirlas). Colección Tesis Doctorales N°103. *Ediciones Universidad de Castilla La Mancha*, España. <https://portalinvestigacion.upct.es/documentos/5d5ba6df2999520e90d04554?lang=gl>
- Naseri, A., Abbasi, F., & Akbari, M. (2017). Estimating agricultural water consumption by analyzing water balance. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(68), 17-32. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.105338.1057>
- Playán, E., Garrido, S., Faci, J., & Galán, A. (2004). Characterizing pivot sprinklers using an experimental irrigation machine. *Agricultural Water Management*, 70(3), 177-193. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.06.004>
- Playán, E., & Mateos, L. (2006). Modernization and optimization of irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 82(1-2), 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.007>
- Playán, E., Salvador, R., Faci, J., Zapata, N., Martínez-Cob, A., & Sánchez, I. (2005). Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. *Agricultural Water Management*, 76(3), 139-159. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.01.015>
- Rahmat Abadi, V., Boroomand Nasab, S. Sakhaeerad, H. Bavi, A. (2012). Evaporation and Wind Drift Losses for Two Types of Sprinklers With one and Three Nozzles in Solid Set Systems in Ahwaz Climate Conditions, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 6(4), 265. (In Persian) <https://www.sid.ir/paper/131412/en>
- Raooof, M., Hosseini, Y., & Nazari-Gigloo, F. (2018). Evaluation of classic semi-permanent sprinkler system and modeling evaporation losses and wind drift in ADF 25° nozzle sprinkler model in Moghan region. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 7(4), 117-134. (In Persian) <https://sanad.iau.ir/en/Journal/wsrcj/Article/828917>
- Rostamian, B., Maroufpoor, E., Azarboo, N. and Farzankia, F. (2014). Investigation of The Effect Hydraulic and Atmospheric Factors on the Evaporation and Wind Draft Losses in The Fixed Head Sprinkle Irrigation System. *Water and Soil*, 28(4), 661-669. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.29061>
- Sadeghi, S.-H., Peters, T. R., Amini, M. Z., Malone, S. L., & Loescher, H. W. (2015). Novel approach to evaluate the dynamic variation of wind drift and evaporation losses under moving irrigation systems. *Biosystems Engineering*, 135, 44-53. (In Persian) <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.04.011>
- Salemi, H., & Rezvani, S. (2016). Technical evaluation of sprinkler irrigation system on farm (Isfahan and Hamadan Provinces). *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(3), 345-350. (In Persian) <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.3204>

- Sanchez, I., Faci, J., & Zapata, N. (2011). The effects of pressure, nozzle diameter and meteorological conditions on the performance of agricultural impact sprinklers. *Agricultural Water Management*, 102(1), 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.002>
- Santos, F. L., Reis, J. L., Martins, O. C., Castanheira, N. L., & Serralheiro, R. P. (2003). Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigated soils. *Biosystems Engineering*, 86(3), 355-364. https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/6036/1/BiosysEng_Santos_compartive%20assessment.pdf
- Sarwar, A., Peters, R. T., & Mohamed, A. Z. (2020). Linear mixed modeling and artificial neural network techniques for predicting wind drift and evaporation losses under moving sprinkler irrigation systems. *Irrigation Science*, 38, 177-188. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00659-x>
- Sarwar, A., Peters, R. T., Shafeeque, M., Mohamed, A., Arshad, A., Ullah, I., Saddique, N., Muzammil, M., & Aslam, R. A. (2021). Accurate measurement of wind drift and evaporation losses could improve water application efficiency of sprinkler irrigation systems— A comparison of measuring techniques. *Agricultural Water Management*, 258, 107209. <https://ideas.repec.org/a/eee/agiwat/v258y2021ics0378377421004868.html>
- Seyedzadeh, A., Khazae, P., Siosemardeh, A., & Maroufpoor, E. (2022). Irrigation management evaluation of multiple irrigation methods using performance indicators. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(3), 303-312. <https://doi.org/10.1080/09715010.2021.1891470>
- SioseMoradeh, M., Maroof, M., & Bayzidi, M. (2011). *Technical evaluation of fixed classic sprinkler irrigation systems: A case study in Mahabad, West Azerbaijan Province*. *Journal of Water Resources Engineering*, 4(8), 63–76. (In Persian) <https://www.magiran.com/p869893>
- Solomon, K. H. (1988). Irrigation systems and water application efficiencies. *California State University, Fresno, California*, 93740-90018. https://www.researchgate.net/profile/Terry-Howell/publication/43256707_Irrigation_Efficiency/links/566ec91c08aea0892c52a91c/Irrigation-Efficiency.pdf
- Tetens, O. (1930). Uber einige meteorologische Begriffe. *Environmental Science*, 130074018. <https://www.semanticscholar.org/paper/Uber-einige-meteorologische-begriffe-Tetens/33b71d32374b7572d1399fcac74ef7fb9a40a9ef>
- Thompson, A., Gilley, J., & Norman, J. (1993). A sprinkler water droplet evaporation and plant canopy model: II. Model application. *Transactions of the ASAE*, 36(3), 743-750. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=28393>
- Thompson, A. L., Martin, D. L., Norman, J. M., Tolk, J. A., Howell, T., Gilley, J., & Schneider, A. (1997). Testing of a water loss distribution model for moving sprinkler systems. *Transactions of the ASAE*, 40(1), 81-88. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=21251>
- Trimmer, W. L. (1987). Sprinkler evaporation loss equation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 113(4), 616-620. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1987\)113:4\(616\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1987)113:4(616))
- Yamin-Moshrefi, G. , Maroufpoor, I. , Ghamarnia, H. and Faryabi, A. (2010). Determination of the best fit function for uniformity coefficient and distribution uniformity of sprinkler irrigation systems in Dehgolan Plain of Kurdistan. *Iranian Water Researches Journal*, 4(1), 95-97. (In Persian) https://iwj.sku.ac.ir/article_10819.html?lang=en
- Yan, H., Bai, G., He, J., & Li, Y. (2010). Model of droplet dynamics and evaporation for sprinkler irrigation. *Biosystems Engineering*, 106(4), 440-447. <https://www.researchgate.net/publication/248597947>

- Yazar, A. (1984). Evaporation and drift losses from sprinkler irrigation systems under various operating conditions. *Agricultural Water Management*, 8(4), 439-449. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378377484900702>
- Yonts, C. D., Kranz, W. L., & Martin, D. L. (2000). Water loss from above-canopy and in-canopy sprinklers. Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, *University of Nebraska-Lincoln*, Lincoln, NE, USA. <https://extensionpubs.unl.edu/publication/g1328/water-loss-from-above-canopy-and-in-canopy-sprinklers>
- Zamanisepahvand, S., Torabi, H., & 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. (In Persian) https://idj.iaid.ir/article_168111_en.html
- Zapata, N., Playán, E., Martínez-Cob, A., Sánchez, I., Faci, J., & Lecina, S. (2007). From on-farm solid-set sprinkler irrigation design to collective irrigation network design in windy areas. *Agricultural Water Management*, 87(2), 187-199. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377406002071>
- Zare Abyaneh, H., Danaii, A., Akhavan, S. and Jovzi, M. (2020). Performance evaluation of new irrigation systems in Hamedan. *Water and Irrigation Management*, 10(3), 381-395. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jwim.2021.300563.784>