



Original Article

Evaluation of Surface Irrigation Management Scenarios and Their Impacts on System Performance Indicators Using SIRMOD: A Case Study of Kabutarabad, Isfahan

Bijan Nazari^{1*}, Morteza Kamali², Ali Ghadami Firouzabadi³

1-Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran .

2-PhD student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

3-Associate Professor, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, (AREEO), Hamedan, Iran.

Received:2026/02/18

Accepted:2026/07/08

Revised:2026/07/04

Published online:2026/07/08

* Corresponding Author's Email:binazari@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Input discharge,
Furrow length,
Time of cutoff,
Application efficiency,
Tail water ration,

Introduction

Surface irrigation remains one of the most widely used irrigation methods in many developing countries. However, its relatively low performance, primarily caused by deep percolation losses and tailwater runoff, necessitates improved management strategies to enhance water productivity. In regions facing increasing water scarcity, climate variability, and recurrent droughts, optimizing surface irrigation systems has become a critical priority for sustainable agricultural production. Furrow irrigation, as a common surface irrigation method, can achieve acceptable performance when properly designed and managed. Key operational parameters such as inflow discharge, furrow length, and time of cutoff strongly influence infiltration dynamics, advance and recession behavior, and ultimately irrigation efficiency. However, field based evaluation of these parameters is often costly, time consuming, and operationally constrained. Consequently, simulation models such as SIRMOD provide a practical and reliable tool for analyzing hydraulic processes and evaluating management scenarios without extensive field experimentation. SIRMOD incorporates hydrodynamic, zero inertia, and kinematic wave approaches to simulate flow and infiltration processes and has been widely validated for furrow irrigation systems. Despite numerous studies employing SIRMOD, most have examined the effect of input variables in isolation, whereas real-world field conditions involve simultaneous changes in multiple parameters. Understanding the combined influence of inflow discharge, time of cutoff, and furrow length on irrigation performance indicators, including application efficiency (E_a), irrigation requirement efficiency (E_r), deep percolation ratio (DPR), and tail water ratio (TWR), is therefore essential for identifying optimal management strategies. This study aims to evaluate the simultaneous effects of these parameters using SIRMOD and to determine the most effective combinations for improving water use efficiency under field conditions.

Materials and Methods

How to cite: Nazari,B.Kamali,M. Ghadami Firouzabadi,A. *Evaluation of Surface Irrigation Management Scenarios and Their Impacts on System Performance Indicators Using SIRMOD: A Case Study of Kabutarabad, Isfahan.* Journal of Hydraulics and Water Science, 35 (4):73-90. <https://doi.org/10.22034/hws.2026.71586.1047>

How to cite:



This is an open-access article under the CC BY NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



The study utilized field data from the Kabutarabad Research Station in Isfahan, Iran, previously reported by Salemi et al. (2022). Soil physical properties, hydraulic characteristics, and furrow geometry were employed as model inputs. The soil texture across the 0–60 cm depth was classified as silty clay loam, with bulk density ranging from 1.34 to 1.41 g/cm³ and field capacity between 34% and 36% (vol.). The baseline furrow characteristics included a length of 120 m, width of 0.6 m, slope of 0.002 m/m, and inflow discharge of 1.5 L/s. Infiltration parameters (K , a , f_0) were incorporated based on the Kostiakov–Lewis equation. The hydrodynamic model of SIRMOD, which demonstrated the highest accuracy in predicting advance and recession times in the reference study, was selected for simulations. To assess sensitivity and performance, three key management variables of discharge (Q), cutoff time (T_{co}), and furrow length (L) were each increased and decreased by 20% relative to their baseline values. This yielded 26 combined scenarios in addition to the reference condition. For each scenario, SIRMOD simulated infiltration, runoff, and water distribution along the furrow. Performance indicators were calculated using standard equations: application efficiency (E_a); defined as the ratio of stored water to applied water; irrigation requirement efficiency (E_r), defined as the ratio of stored water to soil moisture deficit; deep percolation ratio (DPR), defined as the ratio of deep percolation to applied water; and tailwater ratio (TWR), defined as the ratio of runoff to applied water. Model accuracy was evaluated by comparing simulated and measured infiltration and runoff volumes. All simulations were performed under identical soil and hydraulic conditions to isolate the effects of management parameters.

Results and Discussion

Model validation demonstrated strong agreement between measured and simulated values, with relative errors of 6.55% for runoff, 2.22% for infiltrated water, and 0.68% for advance time, thereby confirming the suitability of the hydrodynamic model for simulating furrow irrigation processes. Scenario analysis revealed that reducing inflow discharge significantly decreased deep percolation ratio (DPR) and tailwater ratio (TWR) while increasing application efficiency (E_a), indicating improved water application uniformity and reduced losses. Conversely, increasing discharge led to higher runoff and deep percolation, reducing overall efficiency. Variations in furrow length showed that longer furrows reduced TWR and increased E_a due to extended opportunity time at downstream sections, whereas shorter furrows increased runoff and diminished efficiency. Among all parameters, E_a and TWR exhibited the greatest sensitivity to furrow length, while E_r and DPR were most responsive to cutoff time. Cutoff time exerted the strongest influence on DPR and irrigation requirement efficiency (E_r). Shortening the cutoff time minimized deep percolation and increased E_a ; however, it reduced E_r due to insufficient soil moisture replenishment in downstream portions of the furrow. In contrast, extending the cutoff time substantially increased DPR, indicating excessive infiltration beyond the root zone. The scenario combining reduced discharge, reduced cutoff time, and increased furrow length produced the highest E_a (86.2%) and lowest TWR (13.8%). Conversely, the highest DPR (95.8%) occurred when discharge was held constant while both furrow length and cutoff time were increased. Collectively, these findings underscore the nonlinear and interactive effects of management variables on irrigation performance, highlighting the necessity of integrated, multi-parameter optimization strategies for improving water use efficiency in surface irrigation systems.

Conclusion

The study demonstrates that effective optimization of furrow irrigation performance cannot be achieved through isolated adjustments of individual management parameters; rather, it necessitates the simultaneous consideration of inflow discharge, cutoff time, and furrow length. The results clearly indicate that reducing inflow discharge and cutoff time while increasing furrow length can substantially improve application efficiency (E_a) and significantly reduce tailwater ratio (TWR). This improvement is primarily attributed to enhanced opportunity time distribution along the furrow, which promotes a more uniform infiltration pattern and minimizes both runoff and deep percolation losses. However, the findings also reveal important trade-offs among management variables. Excessively short cutoff times may result in insufficient soil moisture replenishment in downstream sections of the furrow, thereby reducing irrigation requirement efficiency and potentially inducing water stress within the root zone. Conversely, prolonged cutoff times markedly increase deep percolation losses, particularly in upstream areas, which in turn diminishes overall system performance and water productivity. These results underscore the critical need to balance applied water depth with crop root-zone moisture requirements in order to avoid both under- and over-irrigation conditions. The application of the SIRMOD simulation model proved to be highly effective for evaluating a wide range of management scenarios and identifying optimal combinations of design and operational parameters without the need for extensive, time-consuming field experiments. Based on the simulation outcomes, the study suggests that farmers and irrigation managers can improve water use efficiency by adopting moderate inflow rates, adjusting cutoff times according to advance and recession behavior, and selecting furrow lengths that provide sufficient opportunity time while minimizing runoff and deep percolation losses. Ultimately, integrating simulation-based decision support tools like SIRMOD into routine irrigation management offers a cost-effective and practical pathway toward sustainable water resource utilization in regions facing increasing water scarcity.

Keywords: Input discharge, furrow length, time of cutoff, application efficiency, tail water ration



نشریه دانش آب و هیدرولیک

شاپا الکترونیکی: 3092-6114

درگاه نشریه: hws.tabrizu.ac.ir/



مقاله پژوهشی

ارزیابی سناریوهای مدیریت آبیاری سطحی و تأثیر آنها بر شاخص‌های عملکرد سامانه با استفاده از SIRMOD: مطالعه موردی کبوترآباد، اصفهان

بیژن نظری^{۱*}، مرتضی کمالی^۲، علی قدمی فیروزآبادی^۳

۱- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳- دانشیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۷

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۶

* نویسنده مسئول: binazari@ut.ac.ir

چکیده

آبیاری جویچه‌ای به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های آبیاری سطحی، در صورت مدیریت صحیح، قادر خواهد بود ضمن کاهش تلفات آب به افزایش راندمان و کارایی سامانه منجر شود. با وجود مطالعات متعدد در زمینه ارزیابی متغیرهای مدیریتی در آبیاری جویچه‌ای، بررسی اثرات هم‌زمان و اندرکنش این متغیرها بر شاخص‌های عملکرد آبیاری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، از نرم‌افزار SIRMOD برای شبیه‌سازی و بررسی تأثیر تغییر هم‌زمان عوامل ورودی شامل دبی ورودی، زمان قطع جریان و طول جویچه بر شاخص‌های کارایی آبیاری شامل راندمان کاربرد آب (Ea)، راندمان نیاز آبیاری (Er)، نسبت نفوذ عمقی (DPR) و نسبت رواناب پایاب (TWR) استفاده شد. برای دستیابی به این هدف، هر یک از عوامل ورودی به میزان ۲۰ درصد نسبت به مقدار اولیه اضافه و کاهش یافته و مدل در سناریوهای مختلف اجرا مقایسه گردید. نتایج نشان داد که بالاترین میزان پارامتر Ea (۸۶/۲ درصد) و پایین‌ترین میزان پارامتر TWR (۱۳/۸ درصد) مربوط به سناریوی کاهش دبی ورودی و زمان قطع جریان و افزایش طول جویچه و بیشترین میزان پارامتر DPR (۸/۹۵) در سناریوی ثابت نگه داشتن دبی ورودی و زمان قطع جریان و افزایش طول جویچه است. تحلیل حساسیت نشان داد که پارامترهای Ea و TWR به ترتیب با میانگین ۱۹/۱۲ و ۲۹/۹۹ درصد، بیشترین حساسیت را نسبت به عامل طول جویچه دارند، در حالی که پارامترهای Er و DPR به ترتیب با میانگین ۱۱۲/۹۸ و ۶/۹۲ درصد، بیشترین حساسیت را نسبت به عامل زمان قطع جریان نشان دادند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با وجود پیچیدگی مدیریت آبیاری جویچه‌ای، می‌توان با استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز نظیر SIRMOD و بدون نیاز به تغییر زیرساخت فیزیکی مزرعه، ترکیب بهینه‌ای از پارامترهای مدیریتی را برای افزایش کارایی و بهره‌وری آب در شرایط واقعی مزرعه انتخاب و اجرا کرد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنایی برای تدوین دستورالعمل‌های مدیریتی کم‌هزینه و قابل اجرا در مزارع تحت آبیاری سطحی، به‌ویژه در شرایط محدودیت منابع آب فراهم آورد.

کلمات کلیدی: دبی ورودی، طول جویچه، زمان قطع جریان، راندمان کاربرد، نسبت رواناب پایاب

۱-مقدمه

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، افزایش دمای هوا، وقوع خشکسالی‌های متوالی و کاهش منابع در دسترس آب، چالش‌های جدی و روزافزونی را پیش‌روی بخش کشاورزی در بسیاری از مناطق جهان قرار داده است (Bellvert et al., 2025). از آنجا که کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب شیرین محسوب می‌شود، هرگونه اختلال در چرخه تأمین آب می‌تواند به‌طور مستقیم بر پایداری تولیدات کشاورزی و امنیت غذایی اثرگذار باشد (FAO, 2017). از این رو حساسیت بالای محصولات کشاورزی نسبت به تغییرات اقلیمی و نوسانات آب‌وهوایی از یک‌سو (Piao et al., 2010) و پیامدهای نامطلوب مدیریت نادرست منابع آب از سوی دیگر (Hashemi et al., 2019)، ضرورت بازنگری در شیوه‌های بهره‌برداری از آب و به‌کارگیری راهکارهای مدیریتی کارآمدتر را بیش از پیش آشکار ساخته است.

در این راستا، استفاده از سامانه‌های آبیاری با راندمان بالا، توسعه کشت محصولات متحمل به کم‌آبی و اتخاذ رویکردهای کشاورزی پایدار، به‌عنوان راهبردهای کلیدی برای مقابله با بحران کمبود آب و تضمین امنیت غذایی مطرح شده‌اند (Peng et al., 2023). اگرچه سامانه‌های آبیاری تحت فشار در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند، اما روش‌های آبیاری سطحی همچنان سهم قابل توجهی از اراضی کشاورزی جهان، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، را به خود اختصاص داده‌اند (Romay et al., 2024). سادگی در طراحی و اجرا، نیاز اندک به انرژی، هزینه اولیه پایین و سازگاری با شرایط اقتصادی کشاورزان از جمله عواملی هستند که سبب تداوم استفاده گسترده از این روش‌ها شده‌اند (Mazarei et al., 2020). در ایران نیز، با توجه به شرایط اقلیمی و ساختار بهره‌برداری از اراضی کشاورزی، بیش از ۷۰ درصد اراضی زیر کشت همچنان با روش‌های آبیاری سطحی آبیاری می‌شوند (Radmanesh et al., 2023). با این حال، راندمان نسبتاً پایین این روش‌ها در قیاس با سامانه‌های آبیاری تحت فشار، منجر به تلفات قابل توجه آب از دو مسیر نفوذ عمقی و رواناب پایاب شده و ضرورت بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها را بیش از پیش آشکار می‌سازد (Lalehzari et al., 2015). در چنین شرایطی، ارتقای کارایی روش‌های متداول آبیاری سطحی در کشورهای نظیر ایران که همچنان وابستگی بالایی به این روش‌ها دارند، اهمیتی دوچندان می‌یابد.

یکی از متداول‌ترین روش‌های آبیاری سطحی، آبیاری جویچه‌ای است که در صورت طراحی مناسب و مدیریت صحیح می‌تواند عملکرد قابل قبولی از نظر بهره‌وری آب داشته باشد (Wu et al., 2017; Ebrahimian & Playán, 2014). پارامترهای متعددی از جمله دبی ورودی به جویچه، طول و شکل هندسی جویچه، فاصله بین جویچه‌ها، شیب زمین، زمان قطع جریان و نحوه مدیریت مزرعه بر کارایی این روش تأثیرگذار هستند (Farasati et al., 2018). تنظیم بهینه این عوامل می‌تواند ضمن کاهش تلفات آب ناشی از نفوذ عمقی و رواناب

پایاب، سبب افزایش یکنواختی توزیع آب و راندمان کاربرد آن شود (Akbar et al., 2016; Khanna et al., 2003). با این وجود، بررسی عملی اثر هر یک از این پارامترها و ترکیب‌های مختلف آن‌ها در شرایط مزرعه، معمولاً فرآیندی زمان‌بر، پرهزینه و همراه با محدودیت‌های اجرایی است (Rezaei et al., 2025; Azizpour & Gholami, 2015; Sefidkahi, 2015).

در چنین شرایطی، استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز آبیاری سطحی به‌عنوان ابزارهایی کارآمد برای تحلیل، پیش‌بینی و بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های آبیاری، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مدل‌های شبیه‌ساز نظیر SIRM (Walker, 1993)، WinSRFR (Bautista et al., 2009) و SURDEV (Jurriëns et al., 2001) امکان ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریتی را بدون نیاز به اجرای میدانی پرهزینه و زمان‌بر فراهم می‌کنند (Hamdi Ahmadabad et al., 2017). اگرچه مدل‌های یادشده از قابلیت‌های مناسبی برخوردارند، اما SIRM به دلیل ارائه هر سه رویکرد حل معادلات سنت-ونانت (هیدرودینامیک کامل، موج سینماتیک و اینرسی صفر)، ساختار عددی پایدار و سادگی نسبی کالیبراسیون، برای تحلیل هم‌زمان سناریوهای مدیریتی در این پژوهش انتخاب گردید. این مدل با بهره‌گیری از ساختار عددی پایدار و قابلیت برآورد شاخص‌های عملکردی آبیاری سطحی، امکان تحلیل دقیق تر پاسخ سامانه به تغییرات مدیریتی را فراهم می‌سازد (Ding, 2018).

مطالعات متعددی کارایی نرم‌افزار SIRM را در ارزیابی و بهبود عملکرد سامانه‌های آبیاری جویچه‌ای تأیید کرده‌اند (Mehri et al., 2025; Reuben et al., 2023; Mehanna et al., 2015; Clark et al., 2009). نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که این مدل از صحت مناسبی در پیش‌بینی پارامترهایی نظیر زمان پیشروی و پسروی، راندمان کاربرد آب و تلفات آبی برخوردار است (Salemi et al., 2022; Wu et al., 2017; Gholami Sefidkahi & Koulaian, 2014). با این حال، بررسی ادبیات تحقیق حاکی از آن است که در اغلب مطالعات انجام‌شده، اثر متغیرهای ورودی مدل بر شاخص‌های کارایی آبیاری به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و پژوهش‌های محدودی به تحلیل اثرات هم‌زمان و ترکیبی این متغیرها پرداخته‌اند.

از آنجا که در شرایط واقعی مزرعه، پارامترهای مدیریتی نظیر دبی ورودی، زمان قطع جریان و طول جویچه به‌طور هم‌زمان تغییر می‌کنند، بررسی اثرات ترکیبی این متغیرها بر شاخص‌های عملکرد آبیاری از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، هدف از مطالعه حاضر بررسی تأثیر هم‌زمان تغییرات دبی ورودی، زمان قطع جریان و طول جویچه بر شاخص‌های کارایی سامانه آبیاری جویچه‌ای شامل راندمان کاربرد آب (Ea)، راندمان نیاز آبیاری (Er)، نسبت نفوذ عمقی (DPR) و نسبت رواناب پایاب (TWR) با استفاده از نرم‌افزار SIRM است. نتایج این

در نرم‌افزار SIRMOD برای ساده‌سازی و حل معادله سنت - و نانت فرضیاتی به کار می‌رود که منجر به سه مدل زیر شده است (Behbehani & Babazadeh, 2005).

۱- مدل هیدرودینامیک کامل: این مدل بر اساس حل کامل معادله سنت - و نانت است و چون تمامی اجزای این معادله را در برمی‌گیرد از پیچیدگی بیشتری در محاسبات برخوردار است (Bautista & Wallender, 1992).

۲- مدل اینرسی صفر: در این مدل با توجه به کم بودن سرعت آب در آبیاری سطحی، با صرف‌نظر از عوامل اینرسی، معادله به شکل زیر ساده شده است (Strelkoff & Katapodes, 1997):

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (4)$$

۳- مدل موج سینماتیک: در این مدل با در نظر گرفتن جریان یکنواخت در آبیاری سطحی و صرف‌نظر کردن از تغییرات عمق جریان و عامل اینرسی، معادله سنت - و نانت به صورت زیر خواهد بود (رابطه ۵). در این مدل با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده، سرعت محاسبات بالاتر است (Sherman & Singh, 1978).

$$S_0 = S_f \quad (5)$$

۳-۱- داده‌های ورودی مدل

برای بررسی تأثیر سناریوهای مختلف حاصل از ترکیب عوامل ورودی مختلف، داده‌های مربوط به پژوهش (Salemi et al. (2022 (ایستگاه تحقیقاتی کبوتر آباد اصفهان) استفاده شد (جدول‌های ۱ و ۲). در این پژوهش مدل هیدرودینامیک کامل نسبت به دو مدل اینرسی صفر و موج سینماتیک در پیش‌بینی زمان‌های پیشروی و پسروی دارای صحت بالاتری بود، بنابراین، پارامترهای نفوذ خاک و ضریب زبری مانینگ که در مطالعه مذکور واسنجی و صحت‌سنجی شده‌اند، به‌عنوان ورودی‌های مدل SIRMOD در این تحقیق به‌کار گرفته شدند. این رویکرد تضمین می‌کند که پارامترهای مدل با ویژگی‌های هیدرولیکی و نفوذی خاک منطقه مورد مطالعه تطابق دارند و نتایج شبیه‌سازی از اعتبار لازم برخوردارند.

پژوهش می‌تواند با ارائه دیدگاهی جامع‌تر نسبت به رفتار سامانه آبیاری جویچه‌ای، در انتخاب بهینه‌ترین ترکیب مدیریتی و بهبود کارایی مصرف آب در شرایط محدودیت منابع آبی نقش مؤثری ایفا کند.

۱- مواد و روش‌ها

۱-۱- روابط حاکم بر هیدرولیک آبیاری سطحی

جریان آب در آبیاری سطحی، جریان متغیر مکانی ناپایدار است که به سرعت نفوذ آب در خاک بستگی دارد. معادلات مربوط به این جریان به معادلات سنت - و نانت مشهور است که یک جفت معادله دیفرانسیل جزئی بوده که به شکل کامل، فاقد حل تحلیلی است و معمولاً با روش‌های عددی حل می‌شوند (Gholami Sefidkahi & Koulaian, 2014). این معادلات به صورت زیر ارائه شده است:

$$\frac{A \partial v}{\partial x} + \frac{B v \partial y}{\partial x} + \frac{B \partial y}{\partial t} + I = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f + \frac{DvI}{2gA} \quad (2)$$

که در آن، y عمق آب (m)، t زمان از آغاز آبیاری (s)، V سرعت جریان آب (تابعی از x و t) (m/s)، x فاصله از ابتدای شیار (m)، I شدت نفوذ آب به داخل خاک (تابعی از x و t) ($m^3/s/m$)، g شتاب ثقل (m/s^2)، S_0 شیب طولی جویچه (m/m)، S_f شیب خط انرژی (m/m)، A سطح مقطع جریان (m^2)، B عرض بالایی جریان آب (m) و D ثابت عددی است که اگر معادله مومنتم از قانون دوم نیوتن مشتق شده باشد مقدار آن برابر با یک و در صورتی که از قانون بقای انرژی مشتق شده باشد مقدار آن برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود (Walker & Skogerboe, 1987).

۲-۱- نرم‌افزار SIRMOD

SIRMOD به عنوان شبیه‌ساز هیدرولیکی سامانه‌های آبیاری سطحی در سطح مزرعه، برای طراحی، ترکیب بهینه‌ای از ابعاد (جویچه، کرت یا نوار) و پارامترهای کاربردی را جهت افزایش راندمان کاربرد انتخاب کرده و با به کارگیری روش دونقطه‌ای و داده‌های پیشروی، پارامترهای نفوذ را حل می‌کند. محاسبات این نرم‌افزار بر اساس روش‌های تحلیلی و عددی و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C++ است (Ostadi et al., 2024). در نرم‌افزار SIRMOD برای برآورد حجم آب نفوذ یافته از معادله کوستیاکف-لوئیس استفاده می‌شود (رابطه ۳):

$$z = kt^a + f_0 t \quad (3)$$

که در آن، z نفوذ تجمعی (m^3/m)، f_0 سرعت نفوذ نهایی ($m^3/min.m$)، t زمان نفوذ (min) و a و k ($m^3/m/min^a$) پارامترهای تجربی این معادله هستند.

۵-۱- شاخص‌های ارزیابی

برای انتخاب بهینه‌ترین ترکیب از عوامل ورودی به مدل و تعیین کارایی آن از شاخص‌های زیر استفاده شد:

۱- راندمان نیاز آبیاری (E_r): این مقدار برابر است با نسبت عمق ذخیره رطوبتی منطقه ریشه به عمق پتانسیل ذخیره رطوبتی خاک و با رابطه (۶) بیان می‌شود:

$$E_r = \frac{V_{rz}}{V_{rz} + V_{di}} \quad (6)$$

که در آن، V_{rz} حجم آب ذخیره شده در منطقه ریشه گیاه، V_{RZ} حجم کل پتانسیل ذخیره رطوبتی خاک و V_{di} حجم آب بیان‌کننده آبیاری ناقص است. با استفاده از این پارامترها می‌توان مشخص کرد که با آبیاری تا چه اندازه آب در اختیار منطقه ریشه قرار داده شود و چون ارتباط مستقیمی با تنش رطوبتی خاک دارد، در میزان محصول تأثیر مستقیمی می‌گذارد. مقدار E_r زمانی که آبیاری در مزرعه تمام می‌شود یا در حین آبیاری بارندگی رخ می‌دهد، دارای اهمیت است.

۲- راندمان کاربرد آب (E_a): عبارت از نسبت عمق متوسط آب آبیاری ذخیره شده در ناحیه ریشه گیاه به متوسط عمق آب کاربردی در مزرعه است (رابطه ۷):

$$E_a = \frac{V_{rz}}{V_{in}} = \frac{V_{rz}}{V_{rz} + V_{dp} + V_{di}} \quad (7)$$

که در آن، V_{in} حجم آب ورودی به جویچه بوده و V_{dp} حجم آبیست که به‌صورت نفوذ عمقی از محیط ریشه خارج می‌شود.

۳- نسبت نفوذ عمقی (DPR): عبارت است از حجم متوسط آبی که در عمق زمین نفوذ کرده و از منطقه ریشه پایین‌تر می‌رود نسبت به حجم آب کاربردی و از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$DPR = \frac{V_{dp}}{V_{in}} \quad (8)$$

۴- نسبت رواناب پایاب (TWR): عبارت است از حجم متوسط رواناب خارج شده از انتهای مزرعه نسبت به حجم آب کاربردی و از رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$TWR = \frac{V_{tw}}{V_{in}} = 100 - E_a - DPR \quad (9)$$

که در آن، V_{tw} حجم رواناب خروجی است.

۵- درصد حساسیت شاخص مورد نظر (S): عبارت است از تغییر مقدار هر شاخص در سناریوی مورد نظر نسبت به مقدار آن در سناریوی مرجع و مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$S(\%) = \frac{X_i - X_{ref}}{X_{ref}} \times 100 \quad (10)$$

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مزارع آزمایشی در این پژوهش

(Salemi et al., 2022)

Table 1. Physical characteristics of soil of experimental fields in this study (Salemi et al., 2022)

عمق خاک	بافت خاک	وزن مخصوص ظاهری (kg/m^3)	ظرفیت زراعی (درصد حجمی)	نقطه پژمردگی دائم (درصد حجمی)
0-20	Silty clay loam	1.34	36.00	19.00
20-40	Silty clay loam	1.37	34.50	18.50
40-60	Silty clay loam	1.41	35.00	19.10

جدول ۲- مشخصات هندسی و هیدرولیکی مزارع مورد مطالعه

(Salemi et al., 2022)

Table 2. Geometric and hydraulic characteristics of the studied fields (Salemi et al., 2022)

عامل	مقدار اولیه
عرض جویچه (m)	0.6
طول جویچه (m)	120
شیب (m/m)	0.002
جریان ورودی (lit/s)	1.5
a	0.297
K	0.00652
f ₀	0.0003
n (ضریب مانینگ)	0.03
زمان قطع جریان (min)	222
حجم آب ورودی اندازه‌گیری شده (m^3/ha)	20
حجم رواناب اندازه‌گیری شده (m^3/ha)	6.5
حجم آب نفوذ یافته اندازه‌گیری شده (m^3/ha)	13.5

۴-۱- تعریف سناریوها

جهت ارزیابی کارایی مدل و آنالیز حساسیت، عامل‌های زمان قطع جریان، دبی ورودی به جویچه و طول جویچه به میزان ۲۰ درصد افزایش و کاهش داده شده (جدول ۳). بنابراین، در این پژوهش یک سناریوی مرجع (وضعیت فعلی شامل مقادیر اولیه سه پارامتر دبی ورودی، زمان قطع جریان و طول جویچه) و ۲۶ سناریوی مدیریتی حاصل از ترکیب حالات مختلف پارامترهای مدیریتی تعریف و در مجموع ۲۷ سناریو ارائه شد.

جدول ۳- مقدار عوامل ورودی جهت ارزیابی کارایی مدل

Table 3. Input factors for evaluating model performance

نوع عامل	مقدار اولیه	مقدار با ۲۰ درصد افزایش	مقدار با ۲۰ درصد کاهش
دبی (lit/s)	1.5	1.8	1.2
زمان قطع جریان (min)	222	266.4	177.6
طول جویچه (m)	120	144	96

جدول ۴- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده میزان نفوذ توسط مدل.

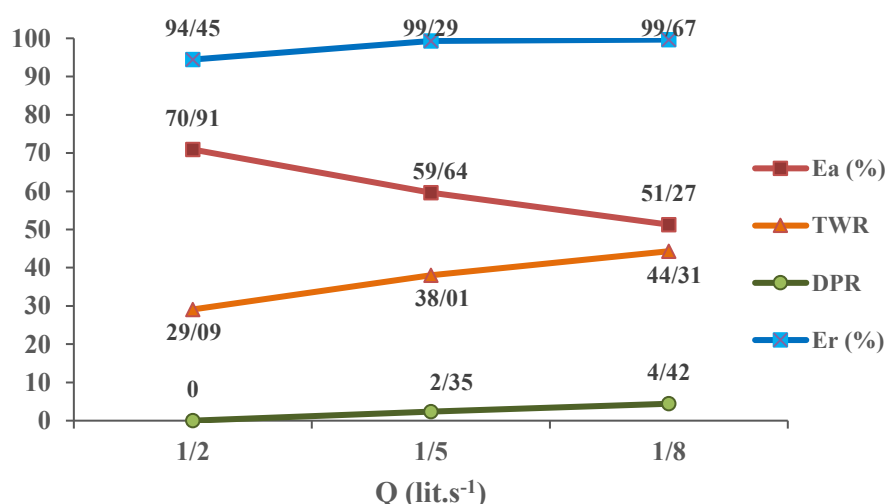
Table 4. Comparison of measured and calculated values of infiltrated rate by the model

شبیه‌سازی شده			اندازه‌گیری شده		
زمان	حجم	حجم	زمان	حجم	حجم
پیشروی	نفوذ یافته	رواناب	پیشروی	نفوذ یافته	رواناب
(min)	(m ³ /ha)	(m ³ /ha)	(min)	(m ³ /ha)	(m ³ /ha)
43.8	13.8	6.1	44.1	13.5	6.5

جهت تشریح و بررسی تأثیر ترکیبی عوامل ورودی بر خروجی‌های مدل و مقایسه آن‌ها با سناریوی مرجع ($Q=1.5 \text{ lit/s}$, $L=120 \text{ m}$, $T_{co}=222 \text{ min}$) نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

الف- تغییر دبی ورودی

اثرات تغییر دبی ورودی و ثابت ماندن طول جویچه و زمان قطع جریان بر پارامترهای Ea , Er , TWR , DPR در مقایسه با سناریوی مرجع در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- تأثیر تغییرات دبی بر شاخص‌های خروجی مدل

Fig 1. The effect of discharge changes on model output indicators

کاهش دبی ورودی سبب افزایش Ea از ۵۹/۶۴ به ۷۰/۹۱ درصد و افزایش دبی ورودی سبب کاهش Ea از ۵۹/۶۴ به ۵۱/۲۷ درصد شد که تأثیر کاهش دبی بر Ea بیشتر از افزایش آن بود (۱۸/۹۰+ درصد در برابر ۱۴/۰۳- درصد). با افزایش دبی ورودی، و افزایش حجم رواناب خروجی از انتهای جویچه، میزان Ea کاهش می‌یابد. کاهش دبی ورودی سبب کاهش Er از ۹۹/۲۹ به ۹۴/۴۵ درصد و افزایش دبی ورودی سبب افزایش Er از ۹۹/۲۹ به ۹۹/۶۷ درصد شد که تأثیر کاهش دبی بر Er بیشتر از افزایش آن بود (۴/۸۷- درصد در برابر ۰/۳۸+ درصد). این نتایج با نتایج حاصل از پژوهش (Azizpour & Ostadi et al. (2024)

که در آن، X_i مقدار شاخص در سناریوی i و X_{ref} مقدار همان شاخص در سناریوی مرجع است.

۲- نتایج و بحث

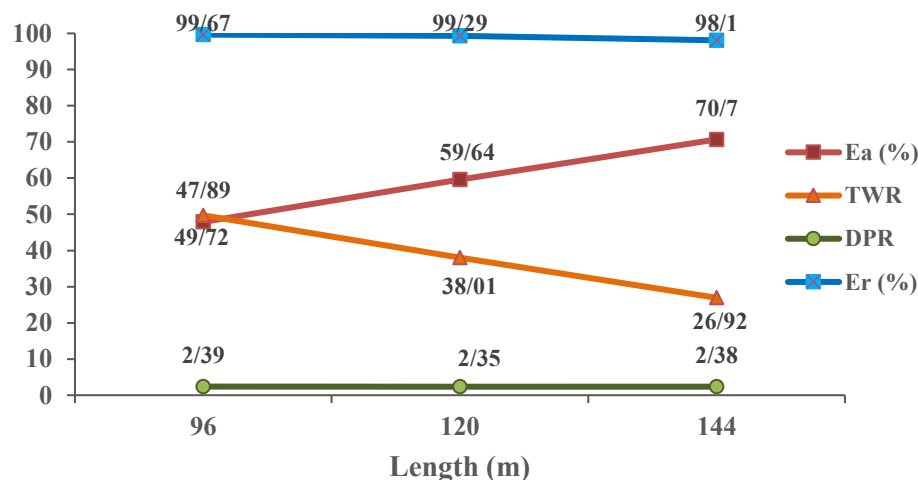
به‌منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل، مقادیر شبیه‌سازی شده حجم رواناب، حجم نفوذ و زمان پیشروی با مقادیر اندازه‌گیری شده مزرعه مقایسه گردید (جدول ۴). طبق این جدول، میزان خطای نسبی مدل نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده در برآورد حجم رواناب، حجم نفوذ یافته و زمان پیشروی به‌ترتیب ۶/۵۵ درصد، ۲/۲۲ درصد و ۰/۶۸ درصد به‌دست آمد.

همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، به ازای طول و زمان قطع جریان ثابت، کاهش دبی ورودی سبب کاهش DPR از ۲/۳۵ به ۴/۴۲ شده است که تأثیر کاهش دبی بر DPR بیشتر از اثر افزایش آن است (۱۰۰- درصد در برابر ۸۸/۱+ درصد). کاهش دبی ورودی سبب کاهش TWR از ۳۸/۰۱ به ۲۹/۰۹ و افزایش دبی ورودی سبب افزایش TWR از ۳۸/۰۱ به ۴۴/۳۱ شد که تأثیر کاهش دبی بر TWR بیشتر از افزایش آن بود (۲۳/۴۷- درصد در برابر ۱۶/۵۷+ درصد).

اثرات تغییر طول جویچه و ثابت ماندن دبی ورودی و زمان قطع جریان بر پارامترهای Ea ، TWR ، DPR و Er در مقایسه با سناریوی مرجع در شکل ۲ نشان داده شده است.

Gholami Sefidkahi (2015) و Holzapfel et al. (2010) همخوانی دارد.

ب- تغییر طول جویچه



شکل ۲- تأثیر تغییرات طول جویچه بر شاخص‌های خروجی مدل

Fig 2. The effect of furrow length changes on model output indicators

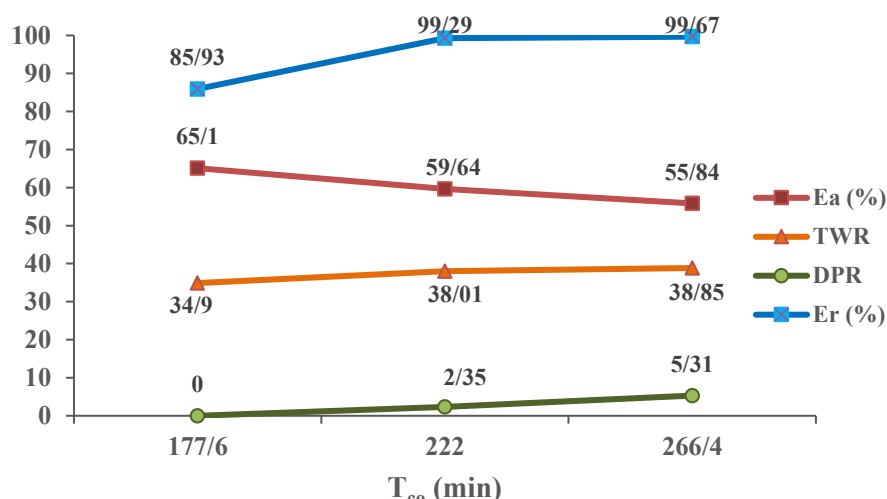
در برابر $18/5\%$ درصد). کاهش طول جویچه سبب افزایش Er از $99/29$ به $99/67$ درصد و افزایش طول جویچه ورودی سبب کاهش Er از $99/29$ به $98/1$ درصد شد که تأثیر طول جویچه بر Er بیشتر از افزایش آن بود ($1/20\%$ درصد در برابر $0/39\%$ درصد). Ostadi et al. (2024) و Javadi et al. (2019) نیز بیان کردند که با ثابت نگه داشتن دبی ورودی و زمان قطع جریان، کاهش طول سبب کاهش Ea و افزایش TWR می‌شود.

پ- تغییر زمان قطع جریان

اثرات تغییر زمان قطع جریان ورودی و ثابت ماندن دبی ورودی و طول جویچه بر پارامترهای Ea ، TWR ، DPR و Er در مقایسه با سناریوی مرجع در شکل ۳ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۲، به‌ازای دبی ورودی و زمان قطع جریان ثابت، کاهش طول جویچه سبب افزایش DPR از $2/35$ به $2/39$ و افزایش طول جویچه سبب افزایش DPR از $2/35$ به $2/38$ شد و تأثیر کاهش طول جویچه بر DPR اندکی بیشتر از اثر افزایش آن است ($1/7\%$ درصد در برابر $1/27\%$ درصد). کاهش طول جویچه سبب افزایش TWR از $38/01$ به $49/72$ و افزایش طول جویچه سبب کاهش TWR از $38/01$ به $26/92$ شد که تأثیر کاهش طول جویچه بر TWR اندکی بیشتر از افزایش آن بود ($30/1\%$ درصد در برابر $29/1\%$ درصد).

کاهش طول جویچه سبب کاهش Ea از $59/64$ به $47/89$ درصد و افزایش طول جویچه سبب افزایش Ea از $59/64$ به $70/7$ درصد شد که تأثیر کاهش طول جویچه بر Ea بیشتر از افزایش آن بود ($19/7\%$ درصد



شکل ۳- تأثیر تغییرات زمان قطع جریان بر شاخص‌های خروجی مدل.

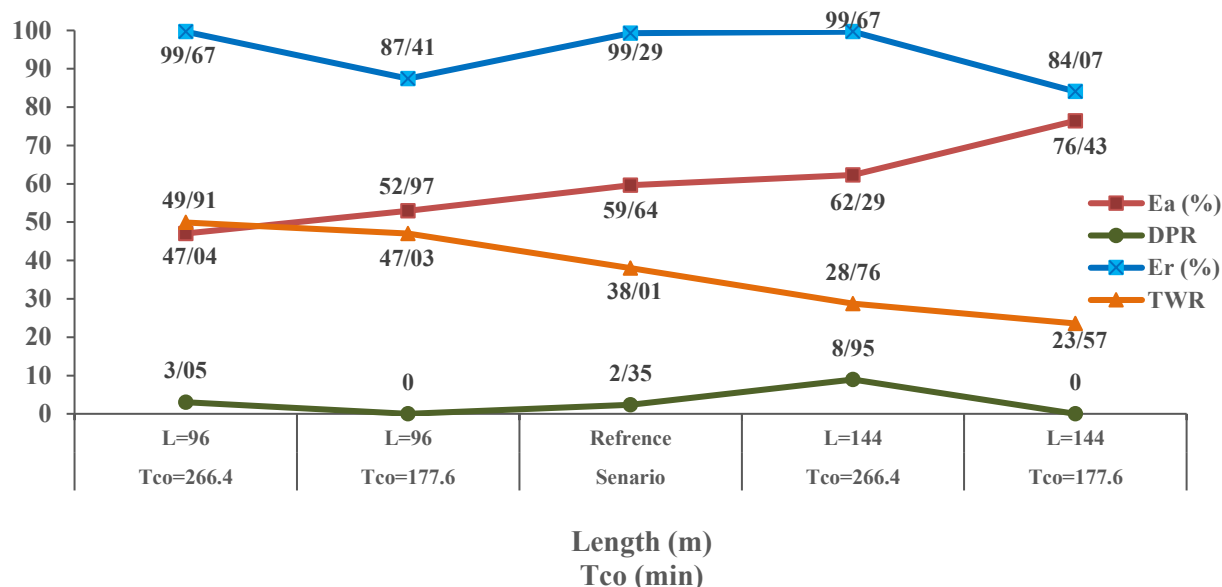
Fig 3. The effect of changes in time of cutoff on model output indicators

و همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، به ازای دبی ورودی و طول جویچه ثابت، کاهش زمان قطع جریان سبب کاهش DPR از ۲/۳۵ به ۵/۳۱ و افزایش زمان قطع جریان سبب افزایش DPR از ۲/۳۵ به ۵/۳۱ شده است و تأثیر افزایش زمان قطع جریان بر DPR بیشتر از اثر کاهش آن است (۱۲۵/۹۵ درصد در برابر ۱۰۰ درصد). کاهش زمان قطع جریان سبب کاهش TWR از ۳۸/۰۱ به ۳۴/۹ و افزایش زمان قطع جریان سبب افزایش TWR از ۳۸/۰۱ به ۳۸/۸۵ شد که تأثیر کاهش زمان قطع جریان بر TWR بیشتر از افزایش آن بود (۸/۱۸ درصد در برابر ۲/۲۱ درصد) که با نتایج (2017) Kifle et al. و (2018) Salahou et al. همسو است. کاهش زمان قطع جریان سبب افزایش Ea از ۵۹/۶۴ به ۶۵/۱ درصد و افزایش زمان قطع جریان سبب کاهش Ea از ۵۹/۶۴ به ۵۵/۸۴ درصد شد که تأثیر کاهش زمان قطع جریان بر Ea بیشتر از افزایش آن بود (۹/۱۵ درصد در برابر ۶/۳۷ درصد). کاهش زمان قطع جریان سبب کاهش Er از ۹۹/۲۹ به ۸۵/۹۳ درصد و افزایش زمان قطع جریان سبب کاهش Er از ۹۹/۲۹ به ۹۹/۶۷ درصد رسید که تأثیر کاهش زمان قطع جریان بر Er بیشتر از افزایش آن بود (۱۳/۴۵ درصد در برابر ۰/۳۸ درصد).

ت- تغییر طول جویچه و زمان قطع جریان و ثابت ماندن دبی ورودی

اثرات تغییر هم‌زمان در طول جویچه و زمان قطع جریان ورودی با ثابت ماندن دبی ورودی بر پارامترهای DPR، TWR، Er و Ea در شکل ۴ در مقایسه با سناریوی مرجع نشان داده شده است.

با توجه به نتایج سه بخش الف، ب و پ می‌توان بیان کرد که عوامل ورودی با بیشترین اثرگذاری بر پارامتر Ea (زمانی که یک پارامتر ورودی متغیر و دو پارامتر ورودی ثابت است) به‌ترتیب عبارت است از طول جویچه (میانگین ۱۹/۱۲ درصد)، دبی ورودی (میانگین ۱۶/۴۶ درصد)



شکل ۴- تأثیر تغییرات همزمان طول جویچه و زمان قطع جریان بر شاخص‌های خروجی مدل

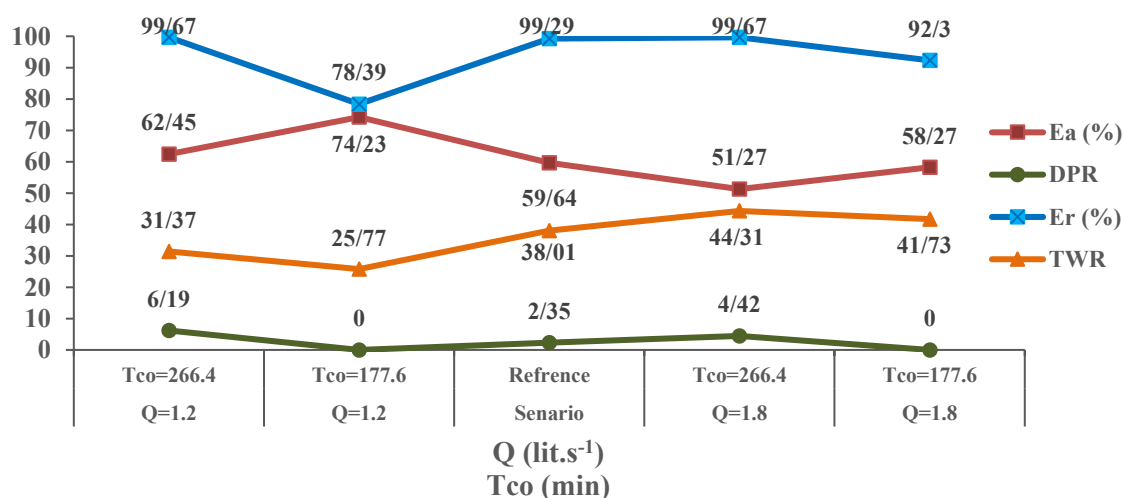
Fig 4. The effect of simultaneous changes in furrow length and time of cutoff on model output indicators

پارامترهای Ea ، Er و TWR نسبت به سناریوی افزایش طول جویچه و کاهش زمان قطع جریان (به ترتیب $+۲۸/۵$ ، $-۱۵/۳۳$ و $-۳۷/۹۹$ درصد) و بیشترین حساسیت پارامتر DPR نسبت به سناریوی افزایش همزمان طول جویچه و زمان قطع جریان ($+۲۸۰/۸۵$ درصد) بود.

مطابق شکل ۴، در دبی ثابت، با کاهش طول جویچه و افزایش زمان قطع جریان، پارامترهای DPR ، Er و TWR افزایش و پارامتر Ea کاهش یافتند. این نتایج با نتایج حاصل از پژوهش Azizpour & Gholami (2015) Sefidkoshi همخوانی دارد. در حالی که در دبی ثابت، با کاهش طول جویچه و زمان قطع جریان، پارامترهای DPR ، Ea و Er کاهش و TWR افزایش یافتند. اما در دبی ثابت، با افزایش طول جویچه و زمان قطع جریان، پارامترهای DPR ، Ea ، Er افزایش و پارامتر TWR کاهش یافت. همچنین در دبی ثابت، با افزایش طول جویچه و کاهش زمان قطع جریان، میزان پارامترهای DPR ، Er و TWR کاهش و پارامتر Ea افزایش یافت. با ثابت نگه داشتن دبی ورودی، بیشترین حساسیت

ث- تغییر دبی ورودی و زمان قطع جریان و ثابت ماندن طول جویچه

اثرات تغییر همزمان در دبی ورودی و زمان قطع جریان با ثابت ماندن طول جویچه بر چهار پارامتر DPR ، Er ، TWR و Ea در شکل ۵ در مقایسه با سناریوی مرجع نشان داده شده است.



شکل ۵- تأثیر تغییرات همزمان دبی ورودی و زمان قطع جریان بر شاخص‌های خروجی مدل

Fig 5. The effect of simultaneous changes in inflow discharge and time of cutoff on model output indicators

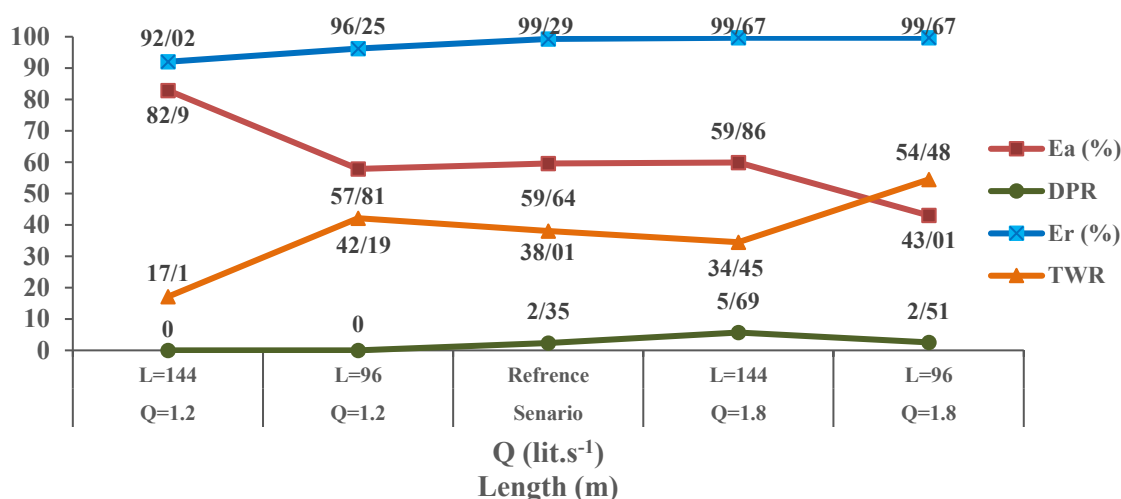
نفوذ را بدون افزایش قابل توجه تلفات عمقی کاهش داده و یکنواختی توزیع آب را بهبود می‌بخشد. همچنین افزایش زمان قطع در دبی‌های بالا موجب افزایش تلفات نفوذ عمقی شده و راندمان کاربرد را کاهش می‌دهد، که این الگو در پژوهش حاضر نیز مشاهده گردید. علاوه بر این از آنجا که تغییر طول جویچه در بسیاری از مزارع به دلیل محدودیت‌های هندسی و مالکیت زمین عملاً امکان‌پذیر نیست، مدیریت دبی ورودی و زمان قطع جریان به‌عنوان مؤثرترین و قابل‌کنترل‌ترین پارامترهای مدیریتی مطرح می‌شود.

ج- تغییر دبی ورودی و طول جویچه و ثابت ماندن زمان قطع جریان

اثرات تغییر هم‌زمان در دبی ورودی و طول جویچه با ثابت ماندن زمان قطع جریان بر چهار پارامتر DPR, TWR, Er و Ea در شکل ۶ در مقایسه با سناریوی مرجع نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، در طول جویچه ثابت، با کاهش دبی ورودی و کاهش زمان قطع جریان پارامترهای DPR, TWR و Er کاهش و پارامتر Ea افزایش یافتند، در حالی که افزایش زمان قطع جریان هم‌زمان با کاهش دبی سبب افزایش پارامترهای DPR, Er و Ea و کاهش پارامتر TWR شد. اما در طول جویچه ثابت، با افزایش دبی ورودی و کاهش زمان قطع جریان، پارامترهای DPR, Er و Ea کاهش و پارامتر TWR افزایش یافت و نیز با افزایش دبی ورودی و افزایش زمان قطع جریان، پارامترهای DPR, TWR و Er افزایش و پارامتر Ea کاهش یافت.

نتایج این پژوهش در تطابق با یافته‌های مطالعاتی همچون Chen et al. (2012) و Du et al. (2014), Mazarei et al. (2020) نشان می‌دهد که مدیریت صحیح دبی ورودی و زمان قطع جریان، مؤثرترین راهکار برای کنترل تلفات آب و بهبود شاخص‌های عملکرد آبیاری در جویچه‌های با طول ثابت محسوب می‌شود. این مطالعات تأکید کرده‌اند که کاهش دبی، اگر با زمان قطع مناسب همراه باشد، فرصت



شکل ۶- تأثیر تغییرات هم‌زمان دبی ورودی و طول جویچه بر شاخص‌های خروجی مدل

Fig 6. The effect of simultaneous changes in inflow discharge and furrow length on model output indicators

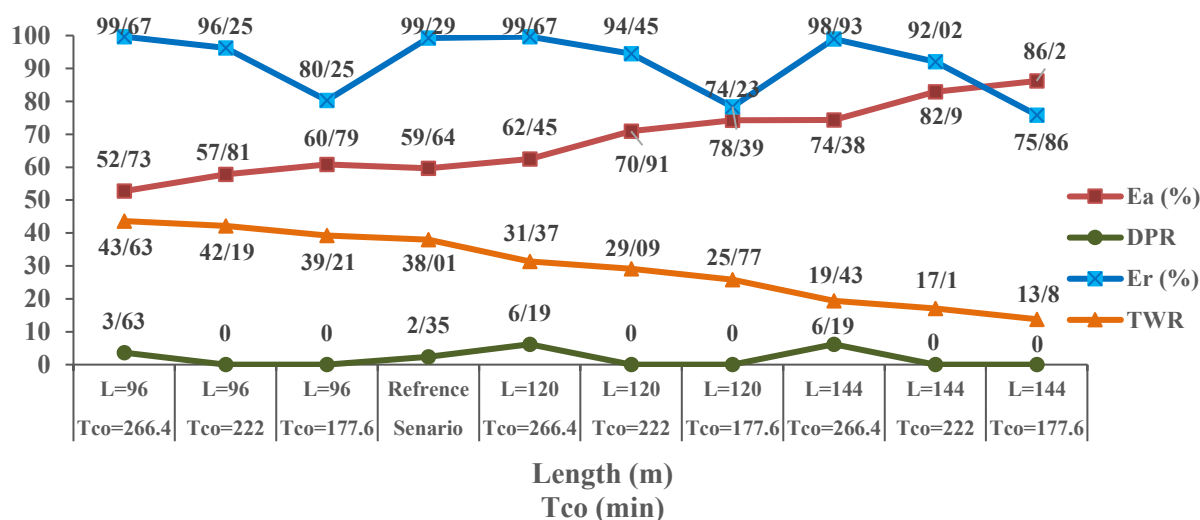
شاخص‌های عملکرد آبیاری را کنترل می‌کند. بنابراین هر ترکیب از این دو پارامتر قادر است توازن بین یکنواختی توزیع آب، راندمان کاربرد و میزان رواناب را به‌صورت متفاوتی تغییر دهد. به‌گونه‌ای که افزایش دبی ورودی و کاهش طول جویچه، سبب کاهش قابل توجه زمان پیشروی و Ea و افزایش TWR و کاهش دبی ورودی و افزایش طول جویچه نتیجه عکس خواهد شد. Gupta et al. (2025) نیز در پژوهش خود روند مشابهی از تأثیر دبی ورودی و طول جویچه بر Ea بیان کردند.

مطابق شکل ۶، در زمان قطع جریان ثابت، با کاهش دبی ورودی و کاهش طول جویچه پارامترهای DPR, Er و Ea کاهش و پارامتر TWR افزایش یافتند، در حالی که افزایش طول جویچه هم‌زمان با کاهش دبی سبب افزایش پارامتر Ea و کاهش پارامترهای DPR, TWR و Er شد. اما در زمان قطع جریان ثابت، با افزایش دبی ورودی و کاهش طول جویچه، پارامتر Ea کاهش و پارامترهای DPR, Er و TWR افزایش یافت و نیز با افزایش دبی ورودی و افزایش طول جویچه، پارامترهای DPR, Er و Ea افزایش و پارامتر TWR کاهش یافت.

این نتایج نشان می‌دهد که تغییرات هم‌زمان دبی ورودی و طول جویچه، با اثرگذاری بر زمان پیشروی و فرصت نفوذ، مستقیماً رفتار

اثرات کاهش ۲۰ درصدی دبی ورودی به جویچه و تغییر هم‌زمان در طول جویچه و زمان قطع جریان ورودی بر پارامترهای TWR, DPR, Er و Ea در شکل ۷ در مقایسه با سناریوی مرجع نشان داده شده است.

چ- کاهش دبی ورودی و تغییرات طول جویچه و زمان قطع جریان



شکل ۷- تأثیر کاهش ۲۰ درصدی دبی ورودی و تغییرات طول جویچه و زمان قطع جریان بر شاخص‌های خروجی مدل

Fig 7. The effect of a 20% reduction in inflow discharge and changes in furrow length and time of cutoff on the model output indicators

ابتدایی مسیر می‌شود. بنابراین، ترکیب‌های مختلف طول جویچه و زمان قطع جریان، با تغییر توزیع زمانی آب و فرصت نفوذ، به‌طور مستقیم بر توازن میان نفوذ عمقی، رواناب و یکنواختی توزیع آب اثر می‌گذارند. (Lima et al. (2014) بیان کردند که عملکرد بهینه آبیاری جویچه‌ای زمانی حاصل می‌شود که نرخ جریان ورودی نزدیک به حداقل مجاز باشد.

ح- افزایش دبی ورودی و تغییرات طول جویچه و زمان قطع جریان

اثرات افزایش ۲۰ درصدی دبی ورودی به جویچه و تغییر هم‌زمان در طول جویچه و زمان قطع جریان ورودی بر سه پارامتر Er, DPR و Ea در شکل ۸ و بر پارامتر TWR در شکل ۹ در مقایسه با سناریوی مرجع نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود، به‌هنگام افزایش ۲۰ درصدی دبی ورودی، بالاترین میزان Ea مربوط به سناریوی کاهش ۲۰ درصدی زمان قطع جریان و افزایش ۲۰ درصدی طول جویچه، پایین‌ترین میزان Er مربوط به سناریوی کاهش ۲۰ درصدی زمان قطع جریان و طول جویچه، بالاترین میزان DPR مربوط به سناریوی افزایش ۲۰ درصدی زمان قطع جریان و طول جویچه، و بالاترین میزان TWR مربوط به سناریوی کاهش ۲۰ درصدی طول جویچه و ثابت ماندن زمان قطع جریان است. طبق شکل ۸ به‌هنگام افزایش ۲۰ درصدی دبی ورودی، بیشترین حساسیت پارامتر DPR نسبت به سناریوی افزایش ۲۰ درصدی در طول جویچه و زمان قطع جریان است.

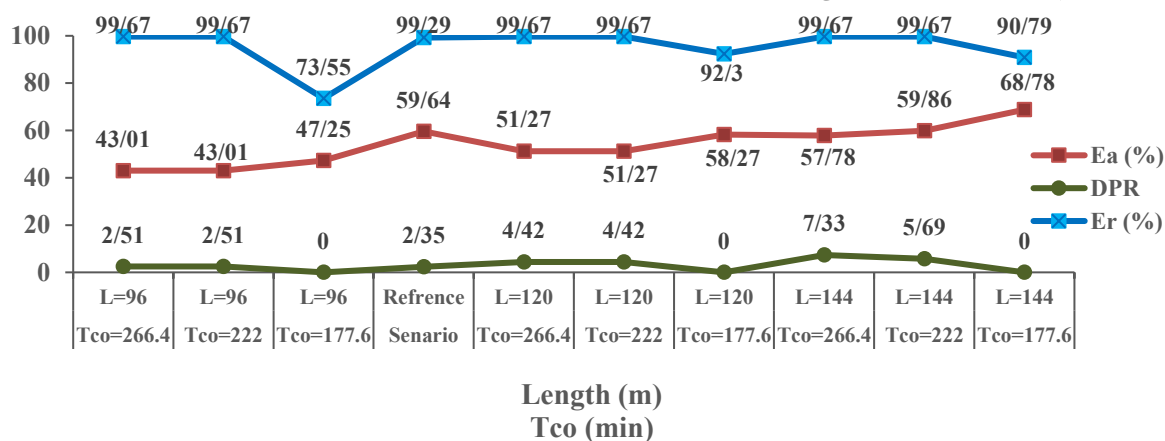
مطابق شکل ۷، به‌هنگام کاهش ۲۰ درصدی دبی ورودی، بالاترین میزان Ea مربوط به سناریوی کاهش ۲۰ درصدی زمان قطع جریان و افزایش ۲۰ درصدی طول جویچه، بالاترین میزان Er مربوط به سناریوی افزایش ۲۰ درصدی زمان قطع جریان و کاهش ۲۰ درصدی طول جویچه و نیز سناریوی افزایش ۲۰ درصدی زمان قطع جریان و ثابت ماندن طول جویچه، بالاترین میزان نفوذ عمقی مربوط به سناریوی افزایش ۲۰ درصدی زمان قطع جریان و ثابت ماندن طول جویچه و نیز سناریوی افزایش ۲۰ درصدی در زمان قطع جریان و طول جویچه، و بالاترین میزان پارامتر TWR مربوط به سناریوی افزایش ۲۰ درصدی زمان قطع جریان و کاهش ۲۰ درصدی دبی طول جویچه است.

مطابق شکل ۷، با کاهش ۲۰ درصدی دبی ورودی، بیشترین حساسیت پارامتر DPR نسبت به سناریوی افزایش ۲۰ درصدی در طول جویچه و زمان قطع جریان و نیز افزایش ۲۰ درصدی زمان قطع جریان به همراه ثابت ماندن طول جویچه است. بیشترین حساسیت پارامترهای Er و Ea با کاهش ۲۰ درصدی دبی ورودی، مربوط به سناریوی کاهش ۲۰ درصدی زمان قطع جریان و افزایش ۲۰ درصدی طول جویچه است. با کاهش ۲۰ درصدی دبی ورودی، بیشترین حساسیت پارامتر TWR مربوط به سناریوی کاهش ۲۰ درصدی زمان قطع جریان و افزایش ۲۰ درصدی طول جویچه است. همچنین با کاهش دبی ورودی، Ea متأثر از افزایش طول جویچه، روند افزایشی و TWR روند کاهشی دارد.

نتایج نشان می‌دهد که کاهش دبی ورودی باعث کندتر شدن پیشروی جریان در طول جویچه و افزایش فرصت نفوذ در بخش‌های

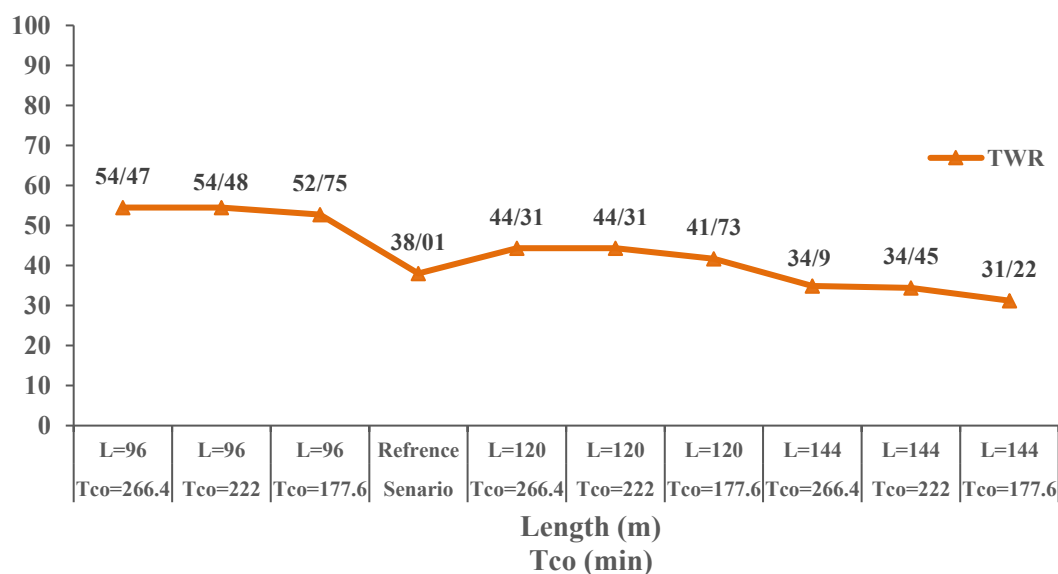
حساسیت پارامتر TWR مربوط به سناریوی کاهش ۲۰ درصدی طول جویچه و ثابت ماندن زمان قطع جریان است. با توجه به این نتایج افزایش دبی ورودی موجب افزایش سرعت پیشروی جریان و در نتیجه کاهش فرصت نفوذ در طول جویچه می‌شود.

بیشترین حساسیت پارامتر Ea به هنگام افزایش ۲۰ درصدی دبی ورودی، مربوط به سناریوی کاهش ۲۰ درصدی طول جویچه و ثابت ماندن زمان قطع جریان و نیز سناریوی افزایش ۲۰ درصدی زمان قطع جریان و کاهش بیست درصد طول جویچه است. بیشترین حساسیت پارامتر Er به هنگام افزایش ۲۰ درصدی دبی ورودی، مربوط به سناریوی کاهش ۲۰ درصدی زمان قطع جریان و طول جویچه است. همچنین طبق شکل ۹ به هنگام افزایش ۲۰ درصدی دبی ورودی، بیشترین



شکل ۸- تأثیر افزایش ۲۰ درصدی دبی ورودی و تغییرات طول جویچه و زمان قطع جریان بر پارامترهای DPR، Er و Ea

Fig 8. The effect of a 20% increase in inflow discharge and changes in furrow length and time of cutoff on DPR, Er, and Ea parameters



شکل ۹- تأثیر افزایش ۲۰ درصدی دبی ورودی و تغییرات طول جویچه و زمان قطع جریان بر پارامتر TWR.

Fig. 9 -The effect of a 20% increase in inflow discharge and changes in furrow length and time of cutoff on TWR parameter.

سرعت پیشروی بیشتر جریان و کاهش زمان ماند آب در ابتدای جویچه باشد. در مقابل، افزایش هم‌زمان طول جویچه و زمان قطع جریان موجب افزایش شاخص نفوذ عمقی (DPR) شد، زیرا طول مسیر بیشتر همراه با تداوم جریان باعث افزایش فرصت نفوذ در بخش‌های مختلف جویچه گردید. Kang et al. (2000) گزارش کردند که افزایش دبی ورودی از

در چنین شرایطی، تغییرات طول جویچه و زمان قطع جریان نقش تعیین‌کننده‌ای در تنظیم زمان ماند آب و کنترل نفوذ عمقی دارند. برای مثال، در این مطالعه بیشترین کارایی کاربرد آب (Ea) در سناریوی افزایش ۲۰ درصدی طول جویچه همراه با کاهش ۲۰ درصدی زمان قطع جریان مشاهده شد که می‌تواند ناشی از برقراری تعادل مناسب بین

Ahmadabad et al., 2021). در بررسی پارامتر TWR، بیشترین میزان تلفات رواناب پایاب (۵۴/۴۸- افزایش ۴۳/۳۳ درصدی نسبت به سناریوی مرجع) مربوط به سناریوی افزایش ۲۰ درصدی دبی ورودی (۱/۸ lit/s)، کاهش ۲۰ درصدی طول جویچه (۹۶ متر) و ثابت نگه داشتن زمان قطع جریان (۲۲۲ دقیقه) و کمترین میزان تلفات رواناب پایاب (۱۳/۸- کاهش ۶۳/۶۹ درصدی نسبت به سناریوی مرجع) مربوط به سناریوی کاهش ۲۰ درصدی دبی ورودی (۱/۲ lit/s) و زمان قطع جریان (۱۷۷/۶ دقیقه) و افزایش ۲۰ درصدی طول جویچه (۱۴۴ متر) است.

همچنین در بررسی پارامتر DPR، بیشترین تلفات نفوذ عمقی (۸/۹۵- افزایش ۲۸۰ درصدی نسبت به سناریوی مرجع) مربوط به سناریوی ثابت نگه داشتن دبی ورودی (۱/۵ lit/s) و افزایش ۲۰ درصدی طول جویچه (۱۴۴ متر) و زمان قطع جریان (۲۶۶/۴ دقیقه) است. در ۱۲ سناریو نیز میزان تلفات نفوذ عمقی برابر ۰ است که نشان‌دهنده امکان حذف تلفات عمقی در دامنه‌ای از شرایط مدیریتی است؛ با این حال، این سناریوها لزوماً بالاترین Ea را نداشته‌اند و لذا حذف تلفات عمقی به‌تنهایی معیار کافی برای انتخاب سناریوی بهینه محسوب نمی‌شود.

۱ به ۲ لیتر بر ثانیه باعث کاهش راندمان کاربرد به دلیل افزایش نفوذ عمقی می‌شود. جدول ۵ نشان‌دهنده میزان پارامترهای Ea، Er، DPR و TWR پس از اجرای ۲۶ سناریوی تعریف شده و مقایسه آن‌ها با سناریوی مرجع (سناریوی شماره ۱) است.

طبق این جدول بالاترین میزان پارامتر Ea (۸۶/۲ درصد- افزایش ۴۴/۵۳ درصدی نسبت به سناریوی مرجع) مربوط به سناریوی کاهش ۲۰ درصدی دبی ورودی (۱/۲ lit/s) و زمان قطع جریان (۱۷۷/۶ دقیقه) و افزایش ۲۰ درصدی طول جویچه (۱۴۴ متر) و پایین‌ترین میزان این پارامتر (۴۳/۰۱ درصد- کاهش ۲۷/۸۸ درصدی نسبت به سناریوی مرجع) مربوط به دو سناریوی افزایش ۲۰ درصدی دبی ورودی (lit/s) (۱/۸)، کاهش ۲۰ درصدی طول جویچه (۹۶ متر) و ثابت ماندن زمان قطع جریان (۲۲۲ دقیقه) و سناریوی افزایش ۲۰ درصدی دبی ورودی (۱/۸ lit/s) و زمان قطع جریان (۲۶۶/۴ دقیقه) و کاهش ۲۰ درصدی طول جویچه (۹۶ متر) است.

نتایج (Playan & Mateos (2004 در پژوهشی بیان کردند با کاهش زمان قطع جریان، Ea از ۴۴ درصد تا ۷۰ درصد افزایش یافت که دلیل آن اعمال کم آبیاری است (Sepaskhah & Ghahraman, 2004). بیان کردند که با تغییرات منطقی در مقادیر دبی ورودی و زمان قطع جریان می‌توان Ea را ۷۵ تا ۹۰ درصد نیز افزایش داد (Hamdi

جدول ۵- میزان پارامترهای خروجی از نرم‌افزار SIRMOD پس از اجرای سناریوهای مختلف

Table 5. Amount of output parameters from SIRMOD software after running different scenarios

سناریو	دبی (lit/s)	طول جویچه (m)	زمان قطع جریان (min)	Ea (%)	Er (%)	DPR	TWR
1 (مرجع)		120	222	59.64	99.29	2.35	38.01
2		96	266.4	47.04	99.67	3.05	49.91
3		96	222	47.89	99.67	2.39	49.72
4		96	177.6	52.97	87.41	0	47.03
5	1.5	120	266.4	55.84	99.67	5.31	38.85
6		120	177.6	65.10	85.93	0	34.90
7		144	266.4	62.29	99.67	8.95	28.76
8		144	222	70.70	98.10	2.38	26.92
9		144	177.6	76.43	84.07	0	23.57
10		96	266.4	52.73	99.67	3.63	43.63
11		96	222	57.81	96.25	0	42.19
12		96	177.6	60.79	80.25	0	39.21
13		120	266.4	62.45	99.67	6.19	31.37
14	1.2	120	222	70.91	94.45	0	29.09
15		120	177.6	74.23	78.39	0	25.77
16		144	266.4	74.38	98.93	6.19	19.43
17		144	222	82.90	92.02	0	17.10
18		144	177.6	86.20	75.86	0	13.80
19		96	266.4	43.01	99.67	2.51	54.47
20		96	222	43.01	99.67	2.51	54.48
21		96	177.6	47.25	73.55	0	52.75
22		120	266.4	51.27	99.67	4.42	44.31
23	1.8	120	222	51.27	99.67	4.42	44.31
24		120	177.6	58.27	92.30	0	41.73
25		144	266.4	57.78	99.67	7.33	34.9
26		144	222	59.86	99.67	5.69	34.45
27		144	177.6	68.78	90.79	0	31.22

که سناریوی «کاهش دبی ورودی، افزایش طول جویچه و کاهش زمان قطع جریان» علاوه بر دارا بودن بالاترین مقدار Ea، همزمان کمترین مقدار TWR و یکی از کمترین مقادیر DPR را نیز ثبت کرده و از نظر

چنانچه بخواهیم یک مقایسه ساختارمند از سناریوها بر اساس راندمان کاربرد آب (Ea) به‌عنوان شاخص اصلی و نسبت نفوذ عمقی (DPR) به‌عنوان پارامتر محدودکننده داشته باشیم، می‌توان بیان کرد

شاخص‌های کارایی شامل Ea ، Er ، TWR ، DPR و Ea مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه مطالعات پیشین عمدتاً به بررسی اثرات جداگانه این متغیرها بر شاخص‌های عملکرد آبیاری پرداخته‌اند، نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات هم‌زمان و ترکیبی این متغیرها می‌تواند منجر به پاسخ‌هایی متفاوت و در برخی موارد متضاد نسبت به تحلیل‌های تک‌عاملی شود. به‌ویژه، مشاهده بیشینه راندمان کاربرد آب در شرایط کاهش دبی ورودی و زمان قطع جریان همراه با افزایش طول جویچه، بیانگر اهمیت رویکرد سیستمی و چندمتغیره در مدیریت آبیاری جویچه‌ای است.

نتایج نشان داد که افزایش دبی ورودی و زمان قطع جریان موجب کاهش Ea و افزایش TWR و DPR می‌شود، در حالی که افزایش طول جویچه اثر معکوس داشته و سبب افزایش Ea و کاهش TWR و Er می‌گردد. بالاترین مقدار Ea در سناریوی کاهش دبی ورودی و زمان قطع جریان و افزایش طول جویچه حاصل شد که هم‌زمان با کاهش Er همراه بود و می‌تواند به‌عنوان راهکاری مناسب در شرایط کم‌آبی و کم‌آبیاری خودخواسته مورد توجه قرار گیرد. همچنین مشخص شد که پارامترهای Ea و TWR بیشترین حساسیت را نسبت به طول جویچه و پارامترهای Er و DPR بیشترین حساسیت را نسبت به زمان قطع جریان دارند، هرچند نقش دبی ورودی نیز در تعیین سناریوی مدیریتی مناسب بسیار حائز اهمیت است. این نتایج نشان می‌دهد استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز نظیر $SIRMOD$ به‌عنوان ابزارهای تصمیم‌ساز، امکان ارزیابی هم‌زمان سناریوهای مدیریتی و انتخاب ترکیب بهینه پارامترها را در شرایط مختلف فراهم می‌سازد.

از منظر عملیاتی، نتایج این پژوهش راهکارهای مدیریتی مبتنی بر تنظیم بهینه دبی ورودی، زمان قطع جریان و طول جویچه، از قابلیت اجرایی خوبی در شرایط واقعی مزرعه برخوردار هستند. راهکارهای اصلاح مدیریت آبیاری سطحی که در این مطالعه نیز ارزیابی شد می‌توانند بدون نیاز به سرمایه‌گذاری بالا و یا تغییر زیاد در زیرساخت فیزیکی مزرعه، منجر به بهبود راندمان و بهره‌وری آب شوند. در شرایط نوسان یا کاهش منابع آب، بهره‌برداران سامانه‌های آبیاری می‌توانند با اصلاح پارامترهای مدیریتی نظیر مقدار جریان ورودی و زمان‌بندی آبیاری، ضمن کاهش تلفات رواناب پایاب، ذخیره آب در ناحیه ریشه و راندمان ذخیره را افزایش دهند. به همین ترتیب تعیین طول بهینه جویچه به‌عنوان یک عامل بسیار کلیدی در آبیاری سطحی، می‌تواند نقش مکملی در افزایش کارایی سامانه ایفا کند. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که نرم‌افزار $SIRMOD$ با توجه به معادلات، مفروضات و قابلیت‌های تحلیلی خود، ابزاری کارآمد برای تدوین دستورالعمل‌های مدیریتی آبیاری جویچه‌ای و بهبود بهره‌وری آب در شرایط واقعی مزرعه و محدودیت‌های اقتصادی کشاورزان محسوب می‌شود. همچنین این پژوهش با برخی محدودیت‌ها نیز همراه بوده است. نتایج به‌دست‌آمده بر اساس داده‌های یک ایستگاه تحقیقاتی (کبوترآباد اصفهان) و شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل $SIRMOD$ استخراج

فیزیکی نشان‌دهنده تعادل مطلوب میان سرعت پیشروی، فرصت نفوذ و یکنواختی توزیع است و می‌توان آن را به عنوان سناریوی بهینه در این پژوهش معرفی کرد. (Holzapfel et al., 2010). عامل دبی ورودی را از مهم‌ترین عوامل در طراحی و مدیریت آبیاری جویچه‌ای معرفی کردند. تغییر در متغیرهایی نظیر دبی ورودی و زمان قطع جریان با توجه به انعطاف‌پذیری بالاتر آن‌ها نسبت به طول جویچه که تابعی از ابعاد زمین است، سبب بهبود قابل توجه شاخص‌های عملکرد نظیر راندمان کاربرد و نفوذ عمقی می‌شود (Yadeta et al., 2022; Hamdi Ahmadabad et al., 2021). بنابراین نتایج نشان می‌دهد که نرم‌افزار $SIRMOD$ ابزاری قدرتمند برای مدیریت آبیاری است که استراتژی‌های مختلفی را برای بهبود راندمان و کارایی سامانه‌های آبیاری ارائه می‌دهد که مطابق با نتایج مطالعات (Hornbuckle et al., 2023) و Sayari et al. (2015) است.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که رفتار شاخص‌های کارایی آبیاری جویچه‌ای در برابر تغییرات هم‌زمان متغیرهای ورودی، به فرآیندهای هیدرولیکی و نفوذ جریان سطحی بستگی دارد. کاهش دبی ورودی و زمان قطع جریان، موجب افزایش راندمان کاربرد آب و کاهش تلفات رواناب پایاب شد. در مقابل، افزایش زمان قطع جریان، به‌ویژه در طول‌های بیشتر جویچه، سبب افزایش قابل توجه نفوذ عمقی گردید که نشان‌دهنده غلبه نفوذ عمقی بر ذخیره آب در ناحیه ریشه است. این نتایج نشان‌دهنده اهمیت تنظیم زمان قطع جریان در کنترل تعادل میان ذخیره آب در ناحیه ریشه به عنوان نفوذ مفید و تلفات نفوذ عمقی به عنوان نفوذ غیرمفید در مفهوم کلاسیک آن است و تغییرات آن می‌تواند اثرات غیرخطی بر شاخص‌های کارایی داشته باشد (Ding, 2018).

همچنین تحلیل حساسیت انجام‌شده در این مطالعه نشان داد که شاخص‌های Ea و TWR بیشترین حساسیت را نسبت به طول جویچه و شاخص‌های Er و DPR بیشترین حساسیت را نسبت به زمان قطع جریان از خود نشان می‌دهند. این موضوع بیانگر تفاوت نقش پارامترهای ساختاری و مدیریتی در عملکرد سامانه آبیاری جویچه‌ای است؛ به‌طوری که طول جویچه به‌عنوان یک پارامتر ساختاری، الگوی کلی توزیع جریان و رواناب را در مزرعه تعیین می‌کند، در حالی که زمان قطع جریان به‌عنوان یک پارامتر مدیریتی، مستقیماً فرصت نفوذ و میزان تأمین آب ناحیه ریشه را کنترل می‌نماید. بنابراین در شرایط محدودیت منابع آب، اعمال مدیریت بهینه بر دبی ورودی و زمان قطع جریان، به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به تغییر طول جویچه، می‌تواند راهکاری عملی و کم‌هزینه برای افزایش بهره‌وری آب و کاهش تلفات آبی باشد (Holzapfel et al., 2010; Khanna et al., 2003).

۳- نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش، پس از شبیه‌سازی حجم رواناب، حجم آب نفوذیافته و زمان پیشروی با نرم‌افزار $SIRMOD$ که از صحت قابل قبولی برخوردار بود، تأثیر تغییرات دبی ورودی، طول جویچه و زمان قطع جریان بر

آینده، علاوه بر اعتبارسنجی میدانی سناریوهای منتخب، تحلیل‌های اقتصادی نظیر هزینه-فایده تغییر طول جویچه و اصلاحات مدیریتی نیز در کنار شاخص‌های عملکرد آبیاری مورد توجه قرار گیرد تا امکان تصمیم‌گیری جامع‌تر و کاربردی‌تر برای بهره‌برداران و مدیران منابع آب فراهم شود.

شده و سناریوهای مدیریتی پیشنهادی به صورت میدانی مورد ارزیابی و اجرا قرار نگرفته‌اند؛ از این رو تعمیم نتایج به سایر مناطق با شرایط خاک، شیب، الگوی مدیریتی و اقلیمی متفاوت باید با احتیاط صورت گیرد. همچنین در این مطالعه تمرکز اصلی بر شاخص‌های هیدرولیکی و عملکردی سامانه آبیاری بوده و جنبه‌های اقتصادی اجرای سناریوها مورد بررسی قرار نگرفته است. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در مطالعات

منابع

- Akbar G, Ahmad MM, Ghafoor A, Khan M, and Islam Z, 2016. Irrigation efficiencies potential under surface irrigated farms in Pakistan. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 35(2), 15-24.
- Azizpour S, and Gholami Sefidkahi MA, 2015. Assessment of the performance indicators and input variables of border irrigation system. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(2), 243-253, doi.org/10.1001.1.23222069.1394.22.2.16.0 (In Persian with English Abstract).
- Bautista E, and Wallender WW, 1992. Hydrodynamic furrow irrigation model with specified space step. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118(3), 450-465, doi.org/10.1061/(ASCE)0733-4377(1992)118:3(450).
- Bautista E, Clemmens AJ, Strelkoff TS, and Schlegel J, 2009. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management*, 96(7), 1146-1154, doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.007
- Behbehani MR, and Babazadeh H, 2005. Field evaluation of surface irrigation model (SIRMOD) (case study in furrow irrigation). *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 12(2), 1-10, (In Persian with English Abstract).
- Bellvert J, Pamies-Sans M, Casadesus J, and Girona J, 2025. Evaluating the impact of drought and water restrictions on agricultural production in irrigated areas through crop water productivity functions and a remote sensing-based evapotranspiration model. *Agricultural Water Management*, 309, 109319, doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109319
- Chen B, Ouyang Z, and Zhang SH, 2012. Evaluation of hydraulic process and performance of border irrigation with different regular bottom configurations. *Journal Resources Ecology*. 3(2), 151-160, doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2012.02.007 (2012).
- Clark B, Hall L, Davids G, Walker W, and Eckhardt J, 2009. Application of SIRMOD to evaluate potential tailwater reduction from improved irrigation management. *World Environmental and Water Resources Congress (ASCE)*, doi.org/10.1061/41036(342)426
- Ding K, 2018. State of knowledge of irrigation techniques and practicalities within given socio-economic settings. *Irrigation and Drainage*, 68(1), 31-45, doi.org/10.1002/ird.2237
- Du T, Kang S, Zhang X, and Zhang J, 2014. China's food security is threatened by the unsustainable use of water resources in north and northwest China. *Food and Energy Security*, 3(1), 7-18, doi.org/10.1002/fes3.40
- Ebrahimian H, and Playán E, 2014. Optimum management of furrow fertigation to maximize water and fertilizer efficiency and uniformity. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 16(3), 591-607, doi.org/10.1001.1.16807073.2014.16.3.10.8
- FAO, 2017. Water for sustainable food and agriculture. A Report Produced for the G20 Presidency of Germany. Rome.
- Farasati M, Farzi S, and Pourmohammad P, 2018. Field evaluation and analysis of furrow irrigation by SIRMOD and WinSRFR models. *Journal Environment Water Engineering*, 4(3), 207-215, doi.org/10.22034/jewe.2018.129534.1259 (In Persian with English Abstract).
- Gholami Sefidkahi MA, and Koulaian A, 2014. Field evaluation and sensitivity analysis of the SIRMOD model in furrow irrigation. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 3 (8). 473-483, (In Persian with English Abstract).
- Gupta A, Rao KR, Rajwade YA, Randhe RD, Singh K, Kumar M, and Singh RK, 2025. Optimizing furrow irrigation performance with WinSRFR software through field experiments and simulations in sunflower cultivation. *Scientific Reports*, 15(1), 33884, doi.org/10.1038/s41598-025-06158-8
- Hamdi Ahmadabad Y, Liaghat A, Sohrabi T, Rasoolzadeh A, and Nazari B, 2017. Improving irrigation performance by managing the irrigation cut-off time in SIRMOD (case study: Moghan agro-industry and husbandry). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(4), 811-822, doi.org/10.22059/ijswr.2017.216790.667547 (In Persian with English Abstract).
- Hamdi Ahmadabad Y, Liaghat A, Sohrabi T, Razoulzadeh A, and Ebrahimian H, 2021. Improving performance of furrow irrigation systems using

- simulation modeling in the Moghan plain of Iran. *Irrigation and Drainage*, 70, 131-149, doi.org/10.1002/ird.2534
- Hashemi M, Mazandarani Zadeh H, Arasteh PD, and Zarghami M, 2019. Economic and environmental impacts of cropping pattern elements using systems dynamics. *Civil Engineering Journal*, 5(5), 1020-1032, doi.org/10.28991/cej-2019-03091308
 - Holzapfel EA, Leiva C, Mariño MA, Paredes J, Arumí JL, and Billib M, 2010. Furrow irrigation management and design criteria using efficiency parameters and simulation models. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70(2), 287-296, doi.org/10.4067/S0718-58392010000200012
 - Hornbuckle JW, Chisten EW, and Faulkner RD, 2023. Improving the efficiency and performance of furrow irrigation using simulation modeling in south-eastern Australia. *Environmental Engineering Department, University of New England: Armidale, NSW, Australia*.
 - Javadi A, Mostafazadeh-Fard B, Shayannejad M, and Ebrahimian H, 2019. Effect of initial soil water content on output Parameters of SIRMOD software under types of different irrigation management. *Irrigation and Drainage*, 68(3), 1-13, doi.org/10.1002/ird.2371
 - Jurriëns M, Zerihun D, Boonstra J, and Feyen J, 2001. SURDEV: Surface irrigation software; design, operation, and evaluation of basin, border, and furrow irrigation. *International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). Publication No. 59. Alterra*.
 - Kang SZ, Shi P, Pan YH, Liang ZS, Hu XT, and Zhang J, 2000. Soil water distribution, uniformity and water-use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas. *Irrigation Science*, 19(4), 181-190, doi.org/10.1007/s002710000019
 - Khanna M, Malano HM, Fenton JD, and Turrall H, 2003. Design and management guidelines for contour basin irrigation layouts in southeast Australia. *Agricultural Water Management*, 62(1), 19-35, doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00076-3
 - Kifle M, Gebremicael TG, Girmay A, and Gebremedihin T, 2017. Effect of surge flow and alternate irrigation on the irrigation efficiency and water productivity of onion in the semi-arid areas of north Ethiopia. *Agricultural Water Management*, 187, 69-76, doi.org/10.1016/j.agwat.2017.03.018
 - Lalehzari R, Ansari Samani F, and Boroomand-Nasab S, 2015. Analysis of evaluation indicators for furrow irrigation using opportunity time. *Irrigation and Drainage*, 64(1), 85-92, doi.org/10.1002/ird.1877
 - Lima VIA, Pordeus RV, Azevedo CD, Pereira JO, Lima VD, and Azevedo MRQA, 2014. Optimization of furrow irrigation systems with continuous flow using the software applied to surface irrigation simulations-SASI. *African Agricultural Research*, 9(42), 3115-3125, doi.org/10.5897/AJAR2013.8364
 - Mazarei R, Mohammadi AS, Naseri AA, Ebrahimian H, and Izadpanah Z, 2020. Optimization of furrow irrigation performance of sugarcane fields based on inflow and geometric parameters using WinSRFR in southwest of Iran. *Agricultural Water Management*, 228, 105899, doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105899
 - Mehanna HM, Abdelhamid MT, Sabreen K, and El-Noemani AS, 2015. SIRMOD Model as a management tool for basin irrigation method in calcareous soil. *International Journal of ChemTech Research*, 10(8), 39-44.
 - Mehri A, Ebrahimian H, and Boroomand Nasab S, 2025. A comparative analysis of WinSRFR and SIRMOD software for simulating surge and alternate furrow irrigation performance in maize fields. *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(4), 1-15, doi.org/10.22055/jise.2024.45967.2116
 - Ostadi E, Najafi MH, Khashei Siuki A, and Dstorani M, 2024. Using the CR index in the optimal design of a row irrigation system with the SIRMOD model. *Water and Soil Management and Modelling*, 4(3), 39-52, doi.org/10.22098/mmws.2023.12607.1256 (In Persian with English Abstract).
 - Peng J, Liu T, Chen J, Li Z, Ling Y, De Wulf A, and De Maeyer P, 2023. The conflicts of agricultural water supply and demand under climate change in a typical arid land watershed of Central Asia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47, 101384, doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101384
 - Piao S, Ciais P, Huang Y, Shen Z, Peng S, Li J, and Fang J, 2010. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *nature*, 467(7311), 43-51, doi.org/10.1038/nature09364
 - Playan E, and Mateos L, 2004. Modernization & optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural Water Management*, 80(1), 100-116, doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.007
 - Radmanesh M, Ahmadi SH, and Sepaskhah AR, 2023. Measurement and simulation of irrigation performance in continuous and surge furrow irrigation using WinSRFR and SIRMOD models. *Nature*, 13, 57-68, doi.org/10.1038/s41598-023-32842-8
 - Reuben TN, Phiri S, Chipula G, and Wiyo KA, 2023. SIRMOD and WinSRFR model simulation comparisons for furrow irrigation in a sugarcane field at kasinthula cane growers scheme, Malawi. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 132, 103491, doi.org/10.1016/j.pce.2023.103491
 - Rezaei M, Davatgar N, Amiri E, Kamali, M, and Nakhjavani Moghaddam, MM, 2025. Application of satellite data in simulating water productivity in rice fields. *Journal of Hydraulics and Water Science*,

- 35(2), 1-13, doi.org/10.22034/hws.2025.66372.1015 (In Persian with English Abstract).
- Romay C, Ezquerro-Canalejo A, and Botta GF, 2024. Sensitivity analysis of performance indices of surge-flow irrigation with system variables using the SIRMOD Model. *Agronomy*, 14, 1509, doi.org/10.3390/agronomy14071509
 - Salahou MK, Jiao X, and Lü H, 2018. Border irrigation performance with distance-based cutoff. *Agricultural Water Management*, 201, 27-37, doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.014
 - Salemi HR, Ghadami Firouzabadi A, Akbari M, 2022. Determination of optimum furrow length and application of SIRMOD model in furrow irrigation simulation. *Irrigation and Water Engineering*, 13(1), 176-190, doi.org/10.22125/iwe.2022.158523 (In Persian with English Abstract).
 - Sayari S, Rahimpour M, ZounematKermani M, 2015. Verification and validation of SIRMOD, WinSRFR, Furdev and Pozalmodels in furrow irrigation systems analysis. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 5(9), 750-760, (In Persian with English Abstract).
 - Sepaskhah AR, and Ghahraman B, 2004. The effects of irrigation efficiency and uniformity coefficient on relative yield and profit for deficit irrigation. *Biosystem Engineering*, 87(4), 495-507, doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.11.008
 - Sherman B, and Singh VP, 1978. A kinematic model for surface irrigation. *Water Resource Research*, 14(2), 357-364, doi.org/10.1029/WR018i003p00659
 - Strelkoff T, and Katapodes B, 1997. Border irrigation hydraulics with zero inertia. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 103(3), 357-364, doi.org/10.1061/JRCEA4.0001157
 - Walker WR, 1993. SIRMOD: Surface Irrigation simulation software. Utah State University, Logan, Utah, USA.
 - Walker WR, and Skogerboe GV, 1987. The theory and practice of surface irrigation. Logan, Utah.
 - Wu D, Xue J, Bo X, Meng W, Wu Y, and Du T, 2017. Simulation of irrigation uniformity and optimization of irrigation technical parameters based on the SIRMOD model under alternate furrow irrigation. *Irrigation and Drainage*, 66(4), 478-491, doi.org/10.1002/ird.2118
 - Yadeta B, Ayana M, Yitayew M, and Hordofa T, 2022. Performance evaluation of furrow irrigation water management practice under Wonji Shoa sugar estate condition, in Central Ethiopia. *Journal of Engineering and Applied Science*, 69(1), 21, doi.org/10.1186/s44147-022-00071-x.