



Evaluating the risk of manual-based standard operating procedure failures in surface water distribution subject to inflow fluctuations

Misagh Bidabadi¹ | Behzad Azadegan^{2✉} | Mahmoud Mashal³

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: misagh.bidabadi@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: bazad@ut.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mmashal@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 18 May 2026

Received in revised form

15 June 2026

Accepted 17 June 2026

Published online 22 June 2026

Keywords:

Risk assessment

Hydraulic-operational simulation

Surface water distribution

Vulnerability and consequence mapping

Principal component analysis

ABSTRACT

This study introduces a practical, data-driven framework for assessing surface water delivery failure risk in irrigation districts exposed to inflow fluctuations at diversion dams. The framework evaluates the vulnerability of manual standard operating procedures using a dynamic hydraulic-operational simulation model developed in MATLAB based on the Integrator–Delay model and manual SOP rules. Risk probability is estimated from historical diversion-flow records through frequency analysis. Vulnerability is quantified using a demand–delivery indicator that compares delivered water with allocated water rights. Risk consequence is represented by an integrated PCA-based index derived from adequacy, dependability, and efficiency indicators. The framework was applied to the Mahyar–Jarghooyeh Irrigation District in arid central Iran, including 659 irrigated units. Results indicate that under normal conditions, more than 90% of the district remains below a risk value of 0.4%. Under low fluctuation conditions, 30–35% of units show risk values between 1.5% and 3%, while 15–20% exceed 3%. Under moderate fluctuations, 60–80% of units fall within the 4–10% risk range. Under severe fluctuations, risk values exceed 60% across 50–60% of the district, and approximately 85% of units fall within the 40–100% range. The spatial results reveal a transition from localized risk under low-stress conditions to widespread systemic vulnerability under severe inflow fluctuations. The proposed framework can support revision of manual operating rules, targeted monitoring, and spatially explicit risk management in surface-water-dependent irrigation districts.

Cite this article: Bidabadi, M., Azadegan, B., & Mashal, M. (2026). Evaluating the risk of manual-based standard operating procedure failures in surface water distribution subject to inflow fluctuations. *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (1), 179-191. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.413920.1304>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.413920.1304>

Publisher: University of Tehran Press.



ارزیابی ریسک شکست دستورالعمل‌های استاندارد بهره‌برداری دستی در توزیع آب سطحی تحت تأثیر نوسانات جریان ورودی

میثاق بیدآبادی^۱ | بهزاد آزادگان^۲ | محمود مشعل^۳

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: misagh.bidabadi@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: bazad@ut.ac.ir
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mmashal@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱</p> <p>کلیدواژه‌ها: ارزیابی ریسک شبیه‌سازی هیدرولیکی-بهره‌برداری توزیع آب سطحی نقشه آسیب‌پذیری و پیامد تحلیل مؤلفه‌های اصلی</p>	<p>در این پژوهش، چارچوبی کاربردی و داده‌محور برای ارزیابی ریسک شکست تحویل آب سطحی در شبکه‌های آبیاری تحت تأثیر نوسانات جریان ورودی به بند انحرافی ارائه شد. تمرکز اصلی مطالعه بر شناسایی آسیب‌پذیری دستورالعمل‌های استاندارد بهره‌برداری دستی در شبکه‌های کانالی روباز و ارزیابی پیامدهای آن برای ذی‌نفعان پایین‌دست است. برای این منظور، یک مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی-بهره‌برداری در محیط MATLAB بر پایه مدل انتگرالی-تأخیری و قواعد بهره‌برداری دستی توسعه یافت. مؤلفه احتمال ریسک با استفاده از تحلیل فراوانی داده‌های تاریخی جریان انحرافی، مؤلفه آسیب‌پذیری با استفاده از نسبت تحویل واقعی آب به حبابه و مؤلفه پیامد با تلفیق شاخص‌های کفایت، پایداری و راندمان بر پایه تحلیل مؤلفه‌های اصلی محاسبه شد. منطقه مورد مطالعه، شبکه آبیاری مهیار-جرقویه در حوضه زاینده‌رود است که شامل ۶۵۹ واحد آبیاری در یک ناحیه خشک مرکزی ایران است. نتایج نشان داد که در شرایط عادی، بیش از ۹۰ درصد سطح منطقه دارای مقدار ریسک کم‌تر از ۴/۰ درصد است. در سناریوهای نوسان کم، حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد واحدها در بازه ریسک ۵/۱ تا ۳ درصد و حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد در مقادیر بالاتر از ۳ درصد قرار گرفتند. با افزایش شدت نوسان، ۶۰ تا ۸۰ درصد واحدها در محدوده ریسک ۴ تا ۱۰ درصد قرار گرفتند و در شرایط نوسان شدید، مقدار ریسک در ۵۰ تا ۶۰ درصد منطقه از ۶۰ درصد فراتر رفت. نتایج مکانی بیانگر گذار از ریسک‌های موضعی در شرایط کم‌تنش به آسیب‌پذیری گسترده و سیستمی در شرایط بحرانی است. چارچوب پیشنهادی می‌تواند مبنایی عملی برای بازنگری دستورالعمل‌های بهره‌برداری، اولویت‌بندی مداخلات مدیریتی و تهیه نقشه‌های ریسک در شبکه‌های آبیاری وابسته به آب سطحی فراهم کند.</p>

استناد: بیدآبادی، میثاق؛ آزادگان، بهزاد و مشعل، محمود (۱۴۰۵). ارزیابی ریسک شکست دستورالعمل‌های استاندارد بهره‌برداری دستی در توزیع آب سطحی تحت تأثیر نوسانات جریان ورودی. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۶ (۱)، ۱۷۹-۱۹۱.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.413920.1304>



۱. مقدمه

تداوم خشک‌سالی و افزایش تغییرپذیری اقلیمی، قابلیت اعتماد سامانه‌های تأمین آب سطحی را در بسیاری از شبکه‌های آبیاری کاهش داده است. در شبکه‌های متکی بر بندهای انحرافی، نوسان جریان ورودی در محل برداشت اصلی یکی از نشانه‌های مستقیم بی‌ثباتی تأمین آب به‌شمار می‌رود. این نوسانات می‌توانند استمرار بهره‌برداری، تحویل عادلانه حقا به و تاب‌آوری بهره‌برداران را با خطر مواجه کنند. در چنین شرایطی، ارزیابی ریسک می‌تواند با ترکیب احتمال وقوع خطر، آسیب‌پذیری سامانه و پیامدهای ناشی از شکست عملکرد، تصویری روشن از نقاط بحرانی شبکه ارائه دهد. مطالعات مختلف در حوزه مدیریت آب کشاورزی نشان داده‌اند که رویکردهای ارزیابی ریسک برای پشتیبانی از مدیریت پیش‌نگر، سازگاری با کم‌آبی و کاهش خسارات ناشی از اختلالات تأمین آب ضروری هستند. برخی پژوهش‌ها بر ریسک خشک‌سالی در مقیاس حوضه و مزرعه تمرکز کرده‌اند، برخی دیگر به ارزیابی کمبود آب ناشی از تغییر اقلیم یا مخاطرات مرتبط با سامانه‌های آبیاری پرداخته‌اند و گروهی نیز از روش‌های احتمالاتی، شاخص‌های خشک‌سالی، شبکه‌های بیزین یا روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی ریسک استفاده کرده‌اند. برای نمونه، رونکو و همکاران (۲۰۱۷)، تینگسانچالی و پیریاونگ (۲۰۱۸)، اورتگا-گائوسین و همکاران (۲۰۲۱) و لی و همکاران (۲۰۲۴) به ابعاد مختلف ارزیابی ریسک خشک‌سالی و کمبود آب در کشاورزی پرداخته‌اند.

با وجود اهمیت این مطالعات، بخش قابل‌توجهی از ادبیات موجود یا بر شکست سامانه‌های آبیاری در مقیاس مزرعه متمرکز است یا مسئله را در مقیاس حوضه و تخصیص کلان آب بررسی می‌کند. در مقابل، ریسک‌های عملیاتی شبکه‌های آبیاری در مقیاس واحدهای بهره‌بردار، به‌ویژه ریسک ناشی از ناکارآمدی دستورالعمل‌های بهره‌برداری دستی در شبکه‌های کانالی روباز، کم‌تر موردتوجه قرار گرفته است. این خلأ پژوهشی در مناطق خشک اهمیت بیش‌تری دارد، زیرا در چنین مناطقی حتی نوسانات نسبتاً محدود در جریان انحرافی می‌تواند به نابرابری مکانی، کاهش کفایت تحویل، افزایش ناپایداری زمانی و تشدید آسیب‌پذیری بهره‌برداران پایین‌دست منجر شود. در شبکه‌های آبیاری دارای بهره‌برداری دستی، تنظیم دریچه‌ها و سازه‌های آنگیر بیش‌تر بر پایه تجربه اپراتورها و برنامه‌های روزانه انجام می‌شود. این روش در شرایط پایدار می‌تواند تا حدی قابل‌قبول باشد، اما در مواجهه با نوسانات سریع یا مداوم جریان ورودی، واکنش شبکه اغلب کند، ناهماهنگ و وابسته به موقعیت مکانی است. بنابراین، فقط محاسبه شاخص‌های عملکردی به‌صورت میانگین کل شبکه برای مدیریت ریسک کافی نیست، بلکه لازم است آسیب‌پذیری و پیامدها در سطح هر واحد آبیاری محاسبه و به‌صورت نقشه‌های مکانی ارائه شوند.

این پژوهش با هدف ارائه یک چارچوب ریسک‌محور برای ارزیابی شکست دستورالعمل‌های استاندارد بهره‌برداری دستی در توزیع آب سطحی انجام شد. نوآوری اصلی پژوهش در سه بخش است؛ نخست، استفاده از تحلیل فراوانی داده‌های تاریخی جریان انحرافی برای برآورد احتمال وقوع نوسانات ورودی؛ دوم، معرفی شاخص آسیب‌پذیری مبتنی بر نسبت تحویل آب به حقا به برای سنجش عملکرد دستورالعمل‌های بهره‌برداری دستی و سوم، توسعه شاخص پیامد یکپارچه بر پایه تحلیل مؤلفه‌های اصلی با استفاده از شاخص‌های کفایت، پایداری و راندمان. خروجی نهایی چارچوب، نقشه‌های آسیب‌پذیری، پیامد و ریسک در سطح ۶۵۹ واحد آبیاری است که می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری برای اصلاح بهره‌برداری، پایش هدفمند و مداخلات مدیریتی باشد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲.۱. چارچوب کلی ارزیابی ریسک

در این پژوهش، ریسک شکست تحویل آب سطحی به‌عنوان حاصل ضرب سه مؤلفه احتمال وقوع خطر، آسیب‌پذیری سامانه و

پیامد ناشی از وقوع خطر تعریف شد. خطر موردبررسی، نوسان جریان ورودی در محل بند انحرافی است و مؤلفه آسیب‌پذیری و پیامد برای هر واحد آبیاری و هر سناریوی بهره‌برداری محاسبه می‌شود. رابطه کلی ریسک به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{Risk}(s,i) = P(s) \times V(s,i) \times C(s,i) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن، Risk مقدار ریسک، P احتمال وقوع سناریوی نوسان جریان، V آسیب‌پذیری واحد آبیاری، C شاخص پیامد، s سناریوی نوسان جریان ورودی و i واحد آبیاری است. این ساختار باعث می‌شود که ریسک نهایی هم‌زمان تحت تأثیر فراوانی وقوع نوسان، ضعف بهره‌برداری در تحویل آب و شدت پیامدهای عملکردی قرار گیرد.

۲.۲. برآورد احتمال ریسک نوسانات جریان ورودی

برای محاسبه احتمال ریسک، داده‌های تاریخی روزانه حجم آب انحرافی از بند در یک دوره حدود ۲۰ ساله گردآوری شد. پس از پاک‌سازی داده‌ها و حذف خطاهای آشکار و مقادیر پرت، رخدادهای نوسان جریان شناسایی شدند. فراوانی نسبی رخدادهای به‌عنوان مبنای احتمال وقوع هر طبقه نوسان در نظر گرفته شد. محاسبه احتمال تجربی به‌صورت زیر انجام شد:

$$P(s) = n(s) / N \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه، n_s تعداد رخدادهای مشاهده‌شده در طبقه یا سناریوی s و N کل تعداد دوره‌های زمانی یا رخدادهای بررسی‌شده است. پس از محاسبه فراوانی، شدت نوسانات براساس بزرگی تغییرات جریان طبقه‌بندی شد و سه سطح احتمال کم، متوسط و زیاد برای تفسیر مدیریتی نتایج تعریف گردید. این روش، برخلاف رویکردهای کاملاً کیفی یا مبتنی بر قضاوت کارشناسی، از داده‌های واقعی بهره‌برداری برای تعیین احتمال استفاده می‌کند.

۳.۲. ارزیابی آسیب‌پذیری دستورالعمل‌های بهره‌برداری دستی

آسیب‌پذیری در این پژوهش به‌معنای ناتوانی سامانه بهره‌برداری دستی در تحویل مقدار مورد انتظار آب به هر واحد آبیاری است. برای این منظور، مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی-بهره‌برداری، مقدار متوسط آب تحویلی به هر ذی‌نفع را در طول دوره شبیه‌سازی محاسبه کرد و سپس این مقدار با حبابه یا تقاضای تخصیص‌یافته مقایسه شد. شاخص آسیب‌پذیری به‌صورت زیر تعریف شد:

$$V(i,s) = [1 - Q_{\text{bar_del}}(i,s) / Q_{\text{right}}(i)] \times 100 \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن، $Q_{\text{bar_del}}(i,s)$ میانگین دبی تحویلی به واحد I در سناریوی s و $Q_{\text{right}}(i)$ حبابه یا نیاز مصوب همان واحد است. مقدار صفر برای این شاخص نشان‌دهنده تحویل کامل و نبود آسیب‌پذیری است، درحالی‌که مقدار ۱۰۰ بیانگر عدم تحویل آب و بیش‌ترین سطح آسیب‌پذیری است. ویژگی مهم این شاخص آن است که به‌صورت مستقیم انتظارات بهره‌بردار و تعهدات سامانه توزیع را در قالب یک معیار ساده و قابل تکرار منعکس می‌کند.

۴.۲. شاخص پیامد و تحلیل مؤلفه‌های اصلی

برای سنجش پیامدهای عملکردی ناشی از نوسانات جریان ورودی، سه شاخص شناخته‌شده عملکرد توزیع آب شامل کفایت، راندمان و پایداری محاسبه شد. شاخص کفایت نشان می‌دهد که تحویل آب تا چه اندازه با نیاز یا حبابه مطابقت دارد. شاخص راندمان میزان کنترل اضافه‌تحویل یا اتلاف عملکردی را نشان می‌دهد و شاخص پایداری بیانگر یکنواختی زمانی تحویل آب است. مقادیر این شاخص‌ها برای هر واحد آبیاری و هر سناریو از خروجی مدل هیدرولیکی-بهره‌برداری استخراج شد.

$$PA(i) = (1/T) \times \sum \min[QD(i,t)/QR(i), 1] \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

$$PE(i) = (1/T) \times \sum \min[QR(i)/QD(i,t), 1] \times 100 \quad \text{رابطه ۵}$$

$$PD(i) = CV_t[QD(i,t)/QR(i)] \times 100 \quad \text{رابطه ۶}$$

در روابط بالا، PA شاخص کفایت، PE شاخص راندمان، PD شاخص پایداری، QD دبی تحویلی، QR دبی مورد نیاز یا حبابه و T طول دوره بهره‌برداری است. از آنجا که هر یک از این شاخص‌ها بعد متفاوتی از عملکرد را توصیف می‌کند، برای تلفیق آن‌ها در یک شاخص پیامد، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. وزن‌های حاصل از مؤلفه اصلی اول به‌عنوان ضرایب تلفیق شاخص‌ها در نظر گرفته شدند:

$$C(i) = w_1 \times PA(i) + w_2 \times PD(i) + w_3 \times PE(i) \quad \text{رابطه ۷}$$

در این رابطه، C(i) شاخص پیامد برای واحد آبیاری i و w₁ تا w₃ وزن‌های استخراج‌شده از مؤلفه اصلی اول هستند. در تفسیر نتایج، مقادیر پایین‌تر شاخص پیامد نشان‌دهنده پیامد شدیدتر و عملکرد ضعیف‌تر هستند، درحالی‌که مقادیر بالاتر به شرایط مطلوب‌تر اشاره دارند. استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی باعث کاهش ابعاد، کاهش وابستگی به قضاوت ذهنی و افزایش قابلیت مقایسه مکانی بین واحدهای آبیاری می‌شود.

۵.۲. مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی-بهره‌برداری

برای شبیه‌سازی رفتار جریان در شبکه کانالی، از مدل انتگرالی-تأخیری استفاده شد. این مدل، هر بازه کانال را به دو بخش انتقال موج و ذخیره تقسیم می‌کند. در بخش نخست، تغییرات دبی با یک زمان تأخیر به پایین دست منتقل می‌شود و در بخش دوم، تغییرات تراز سطح آب براساس اختلاف دبی ورودی و خروجی در حجم ذخیره کانال محاسبه می‌شود. فرم کلی معادله پیوستگی در بخش ذخیره به‌صورت زیر است:

$$dh/dt = [Q_{in} - Q_{out}] / A_s \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن، h تراز یا عمق آب، Q_{in} دبی ورودی، Q_{out} دبی خروجی و A_s سطح ذخیره افقی است. مدل انتگرالی-تأخیری به‌دلیل سادگی محاسباتی و قابلیت اتصال به دستورالعمل‌های بهره‌برداری روزانه، برای تحلیل پاسخ سامانه‌های کانالی نسبت به نوسانات جریان ورودی مناسب است. دستورالعمل بهره‌برداری دستی نیز در مدل به‌صورت قواعد تنظیم روزانه سازه‌ها و آبگیرها پیاده‌سازی شد تا پاسخ شبکه تحت شرایط واقعی بهره‌برداری بازآفرینی شود.

۶.۲. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، شبکه آبیاری مهیار-جرقوبه در حوضه آبریز زاینده‌رود و در مجاورت نواحی خشک مرکزی ایران است. این شبکه حدود ۲۵ سال سابقه بهره‌برداری دارد و منبع اصلی تأمین آب سطحی آن بند انحرافی ذوب‌آهن است. آب سطحی معمولاً در بخش عمده سال آبی، از آبان‌ماه تا مردادماه، در اختیار شبکه قرار می‌گیرد. میانگین بارندگی سالانه منطقه حدود ۱۳۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد است که نشان‌دهنده شرایط گرم و خشک منطقه است. ظرفیت طراحی برداشت از بند حدود ۱۲ مترمکعب بر ثانیه است، اما در سال‌های اخیر به‌دلیل خشک‌سالی، جریان قابل انحراف معمولاً در محدوده ۳ تا ۹ مترمکعب بر ثانیه قرار گرفته است. شبکه برای سطح ناخالص حدود ۲۵ هزار هکتار و سطح خالص حدود ۲۲ هزار هکتار طراحی شده است، اما سطح زیر کشت اخیر در بهترین شرایط به حدود ۱۱ هزار هکتار رسیده است. طول کل کانال‌های روباز حدود ۱۲۱ کیلومتر است که ۱۱۲ کیلومتر آن پوشش بتنی و ۹ کیلومتر آن خاکی است. شبکه شامل ۲۵ تنظیم‌کننده هیدرومکانیکی، حدود ۴۰ سرریز اردکی، ۲۶۲ سازه آبگیر،

۳۵ سیفون معکوس و ۳۸ ریزش و آبشار است. این شبکه برای انتقال آب سطحی به نواحی محروم مهیار و جرقویه احداث شده است، اما تشدید دوره‌های خشک در دهه اخیر موجب کاهش قابل توجه تحویل آب و افزایش فشار بر بهره‌برداران شده است (شکل ۱).

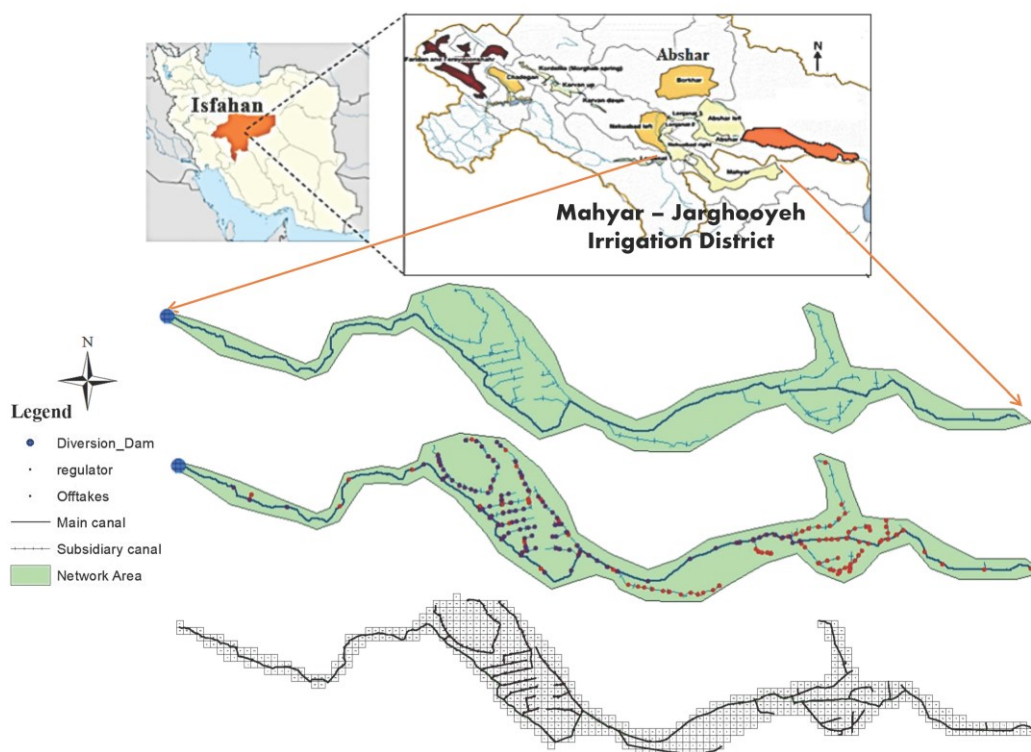


Figure 1. Study area and spatial configuration of the Nekouabad irrigation network in central Iran, including canal alignments and groundwater well distribution

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳.۱. احتمال ریسک نوسانات جریان ورودی

تحلیل داده‌های تاریخی بند انحرافی نشان داد که نوسانات جریان ورودی یک رخداد استثنایی و نادر نیست، بلکه بخشی تکرارشونده از شرایط بهره‌برداری شبکه است (شکل ۲). در مجموع، ۳۹۰ رخداد نوسان جریان در دوره مورد بررسی شناسایی شد. از این تعداد ۲۹۳ رخداد معادل ۱/۷۵ درصد، در طبقه نوسان زیاد با بزرگی بیش از ۲ مترمکعب بر ثانیه قرار گرفتند. تعداد ۵۳ رخداد معادل ۶/۱۳ درصد، در طبقه متوسط با دامنه ۶/۰ تا ۲ مترمکعب بر ثانیه و تنها ۴۴ رخداد معادل ۳/۱۱ درصد، در طبقه نوسان کم با دامنه کم‌تر از ۶/۰ مترمکعب بر ثانیه قرار داشتند. غلبه رخدادهای با بزرگی زیاد نشان می‌دهد که سامانه تأمین آب سطحی در محل ورودی شبکه با بی‌ثباتی قابل توجهی روبه‌رو است. اگرچه احتمال هر رخداد به صورت منفرد ممکن است پایین باشد، تجمع فراوانی رخدادهای بزرگ در بازه ۲ تا ۳ مترمکعب بر ثانیه بیانگر الگوی تکرارشونده نوسان در تأمین آب است. بنابراین، فرض پایداری جریان انحرافی برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری دستی قابل اتکا نیست و لازم است ریسک ناشی از این نوسانات به صورت سناریومحور در ارزیابی عملکرد شبکه وارد شود.

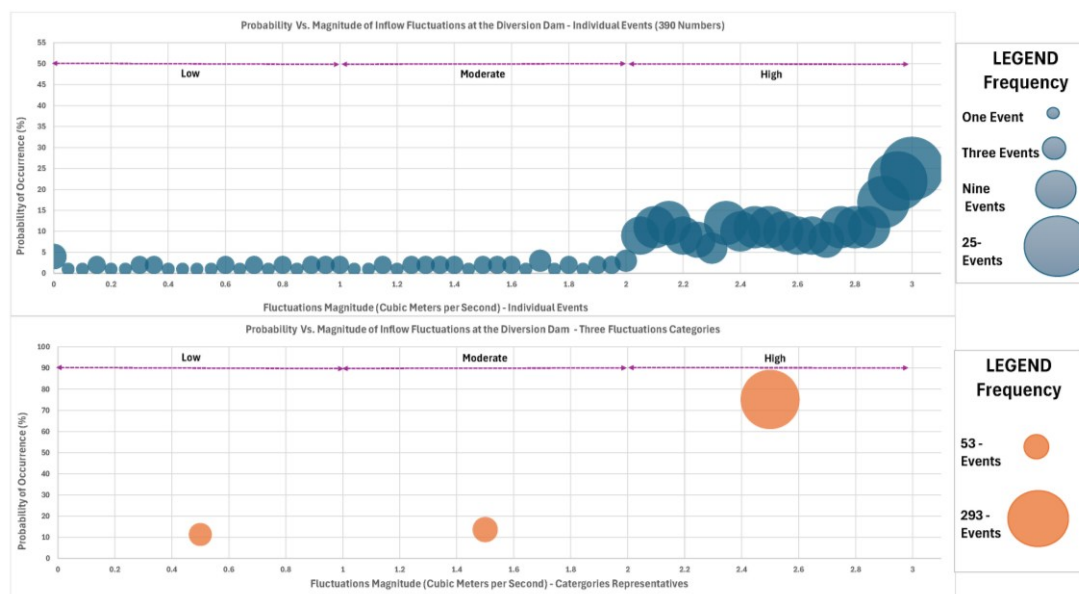


Figure 2. Risk probability component results including inflow fluctuation magnitudes and event frequency distributions: (upper subplot) individual events and (lower subplot) classified probability groups

۲.۳. آسیب‌پذیری دستورات عمل‌های بهره‌برداری دستی

نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی-بهره‌برداری نشان داد که پاسخ شبکه نسبت به نوسانات جریان ورودی به‌شدت به نوع سازه تنظیم، موقعیت مکانی آبگیر و شدت نوسان وابسته است. در شرایط بدون نوسان، عملکرد برخی آبگیرها قابل قبول بود، اما حتی در این حالت نیز کم‌تحویلی در بخش‌هایی از شبکه مشاهده شد. با ورود نوسانات متوسط و شدید، ضعف بهره‌برداری دستی آشکارتر شد؛ آبگیرهای نزدیک به سازه‌های ثابت به‌ویژه در پایین دست با افت دبی، زمان بازیابی طولانی و کمبودهای بیش از ۳۰ درصد مواجه شدند. سازه‌های تنظیم متحرک عملکرد بهتری نسبت به سازه‌های ثابت نشان دادند، اما در رخدادهای شدید نیز از ایجاد کمبود و تأخیر جلوگیری کامل نکردند. نقشه‌های آسیب‌پذیری نشان دادند که بخش‌های نزدیک به سرشبکه عموماً آسیب‌پذیری کم‌تری دارند، زیرا دسترسی مستقیم‌تر به جریان ورودی و زمان انتقال کوتاه‌تری دارند. در مقابل، واحدهای میانی و انتهایی شبکه به‌دلیل افزایش زمان سفر موج، تأخیر در پاسخ تنظیمات دستی و تجمع خطاهای بهره‌برداری، آسیب‌پذیری بیش‌تری نشان دادند. در سناریوی بدون نوسان، بیش‌تر واحدها آسیب‌پذیری کم‌تر از ۲۰ درصد داشتند، اما در سناریوهای نوسان متوسط، آسیب‌پذیری در بخش‌های میانی و پایین دست به محدوده ۳۰ تا ۵۰ درصد رسید. در شدیدترین سناریو، بسیاری از واحدهای انتهایی آسیب‌پذیری بالاتر از ۸۰ درصد را تجربه کردند که نشان‌دهنده نزدیک‌شدن سامانه به شکست تحویل آب در این نواحی است (شکل ۳).

۳.۳. پیامدهای عملکردی و شاخص پیامد یکپارچه

شاخص پیامد محاسبه‌شده با تحلیل مؤلفه‌های اصلی، سه بعد عملکردی کفایت، پایداری و راندمان را در یک معیار تلفیق کرد. نتایج آماری نشان داد که حتی در شرایط بهره‌برداری عادی، همه واحدها در وضعیت پیامد پایین یا بدون مشکل قرار ندارند. بخشی از واحدها در طبقات پیامد بالا و بسیار بالا قرار گرفتند که بیانگر وجود محدودیت‌های ساختاری یا بهره‌برداری در خود شبکه است. با افزایش نوسان جریان ورودی، توزیع شاخص پیامد پهن‌تر شد و تعداد بیش‌تری از واحدها به سمت طبقات پیامد شدیدتر حرکت کردند (شکل ۴).

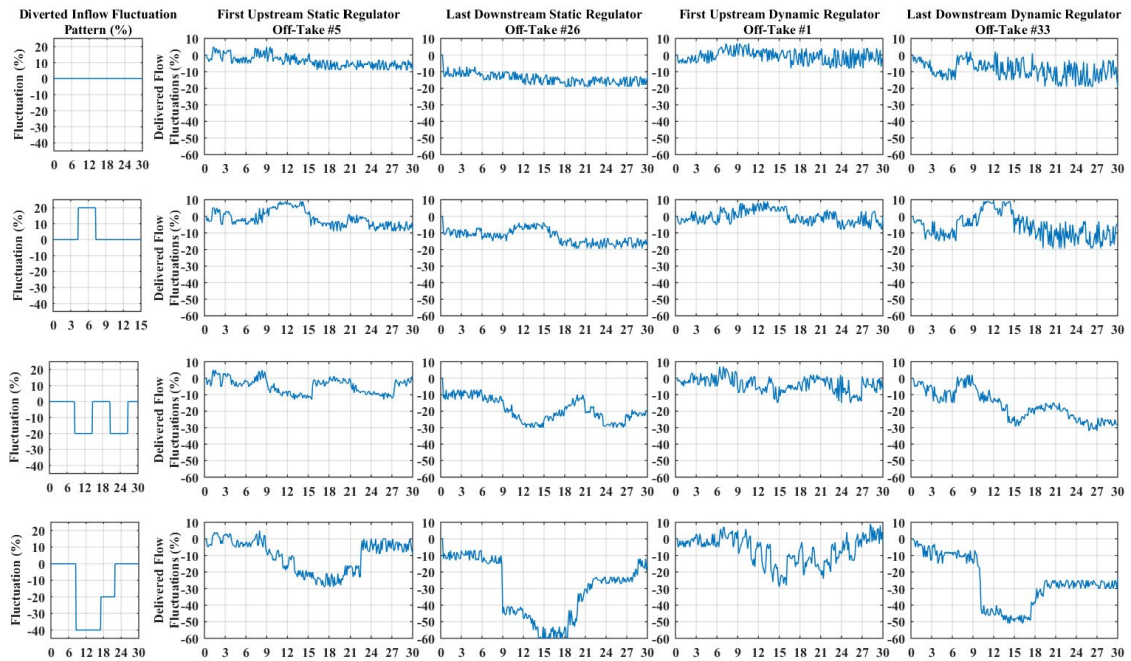


Figure 3. Hydraulic-operational response of static versus dynamic regulators under different inflow fluctuation scenarios

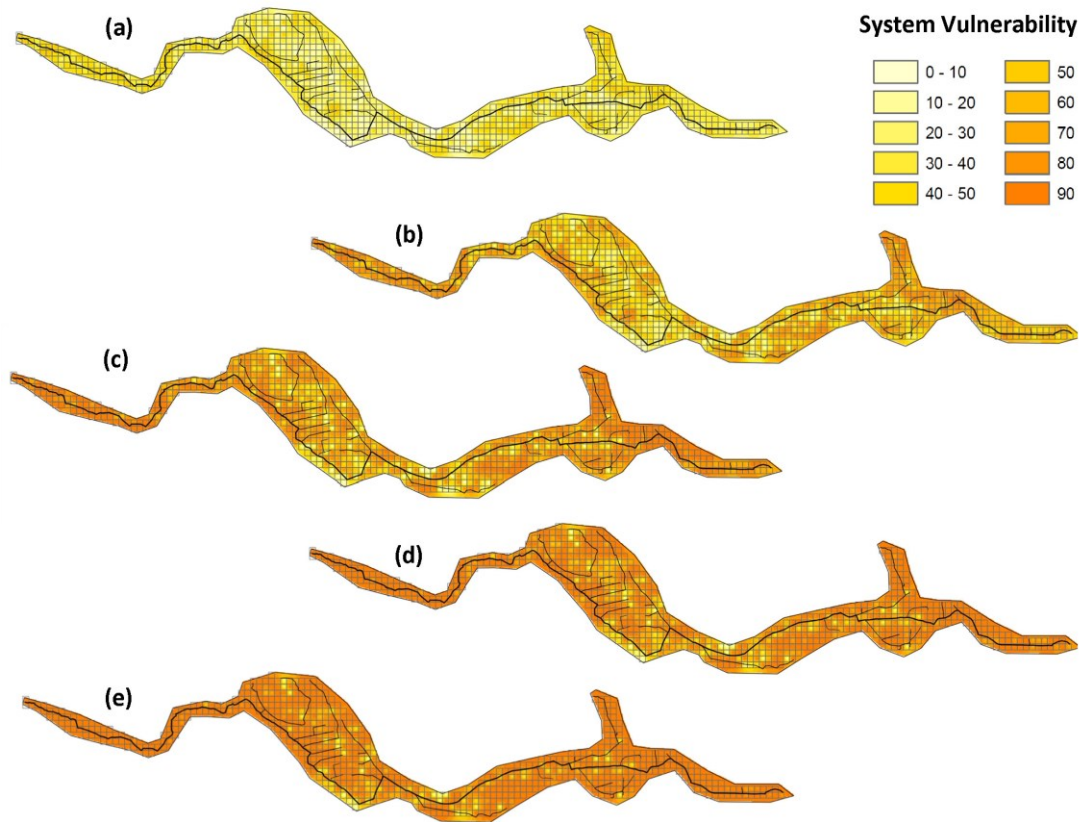


Figure 4. Vulnerability maps: spatial distribution of system vulnerability across the irrigation district under different operational scenarios

در تفسیر شاخص پیامد، مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده وضعیت نامطلوب‌تر هستند. در سناریوی عادی، مقادیر شاخص در بسیاری از واحدها در محدوده ۵۰ تا ۶۰ درصد متمرکز بود. در سناریوهای نوسان کم، بخشی از واحدها به محدوده ۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش یافتند که نشان‌دهنده آغاز افت عملکردی در برخی نواحی است. در سناریوهای متوسط و زیاد، پراکندگی شاخص افزایش یافت و واحدهای متعددی در محدوده ۲۰ تا ۳۰ درصد ظاهر شدند. در سناریوهای بسیار شدید، بخش قابل توجهی از واحدها به مقادیر کم‌تر از ۲۰ درصد رسیدند که بیانگر پیامدهای عملکردی شدید و ازدست‌رفتن هم‌زمان کفایت، پایداری و راندمان است (شکل ۵).

نقشه‌های پیامد نشان دادند که نواحی نزدیک به بند انحرافی، در بیش‌تر سناریوها وضعیت نسبی بهتری دارند، درحالی‌که افت عملکردی در بخش‌های میانی و انتهایی شبکه زودتر ظاهر می‌شود و با افزایش شدت نوسان گسترش می‌یابد. این الگو نشان‌دهنده نابرابری مکانی در تحمل پیامدهای نوسان جریان ورودی است. بنابراین، شاخص پیامد PCA نه تنها یک معیار آماری برای تلفیق شاخص‌ها فراهم می‌کند، بلکه امکان تشخیص زون‌های مکانی با افت عملکردی شدید را نیز فراهم می‌سازد.

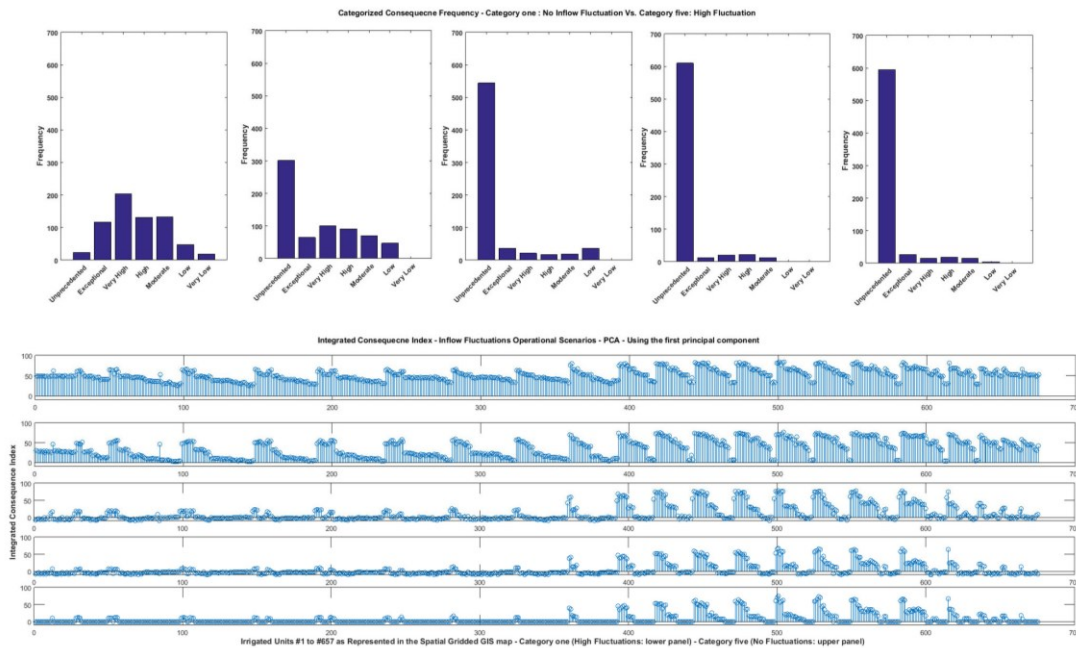


Figure 5. Consequence index results including categorized frequency distributions and PCA-computed consequence magnitudes

۴.۳. نقشه‌های ریسک شکست بهره‌برداری دستی

نقشه‌های ریسک حاصل از ترکیب احتمال، آسیب‌پذیری و پیامد (شکل ۶) نشان دادند که الگوی ریسک از شرایط موضعی به شرایط سیستمی تغییر می‌کند. در سناریوی بهره‌برداری عادی، دامنه ریسک بین صفر تا یک درصد بود و بیش از ۹۰ درصد سطح منطقه در مقادیر کم‌تر از ۴/۰ درصد قرار گرفت. در این وضعیت، نواحی با ریسک بالاتر، بیش‌تر به انتهای کانال‌ها و سلول‌های پیرامونی دور از بند انحرافی محدود شدند. بنابراین، در شرایط عادی، بخش عمده ریسک ناشی از محدودیت‌های ذاتی بهره‌برداری دستی و موقعیت مکانی است، نه تنش شدید تأمین آب. در سناریوی نوسان کم،

دامنه ریسک تا ۵ درصد افزایش یافت. حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد واحدها در محدوده ۵/۱ تا ۵/۳ درصد قرار گرفتند و حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد واحدها مقادیری بالاتر از ۵/۳ درصد نشان دادند. این نتیجه نشان می‌دهد که حتی کاهش‌های نسبتاً محدود در جریان ورودی می‌تواند چالش‌های قابل‌توجهی در واحدهای میانی و انتهایی ایجاد کند. در سناریوی نوسان متوسط، دامنه ریسک تا ۱۰ درصد گسترش یافت و حدود ۶۰ تا ۶۵ درصد منطقه در محدوده ۳ تا ۹ درصد قرار گرفت. مقادیر اوج ۹ تا ۱۰ درصد بیش‌تر در نواحی وابسته به مسیرهای طولانی‌تر کانال و حاشیه‌های فرماندهی مشاهده شد.

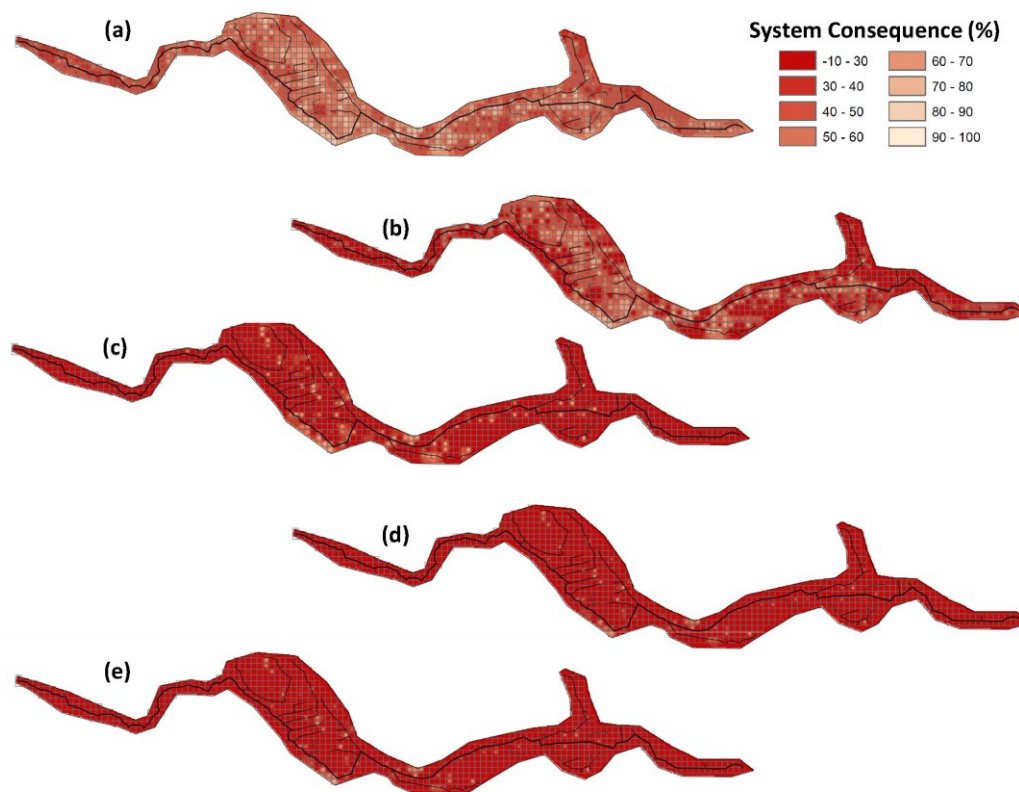


Figure 6. Consequence maps: spatial distribution of system consequences across the irrigation district under different operational scenarios

با افزایش شدت نوسان در سناریوی چهارم، کلاس‌های ریسک شش تا ۱۰ درصد بخش بزرگی از جنوب و پایین‌دست شبکه را پوشش دادند و حدود ۷۵ تا ۸۰ درصد سطح منطقه در محدوده چهار تا ۱۰ درصد قرار گرفت. در این حالت، ۲۵ تا ۳۰ درصد منطقه به کلاس‌های هشت تا ۱۰ درصد وارد شد. در شدیدترین سناریو، دامنه ریسک به صفر تا ۱۰۰ درصد رسید و بیش از ۸۵ درصد واحدها در محدوده ۴۰ تا ۱۰۰ درصد قرار گرفتند. حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد منطقه نیز در کلاس‌های بالاتر از ۶۰ درصد قرار داشت. این الگو نشان‌دهنده شکست سیستمی تحویل آب در اثر ترکیب احتمال بالای کاهش شدید جریان، آسیب‌پذیری بهره‌برداری دستی و پیامدهای گسترده عملکردی است.

مقایسه چارچوب پیشنهادی با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که این پژوهش چند تفاوت اصلی دارد. نخست، خطر موردبررسی در این مطالعه به‌طور مشخص نوسان جریان انحرافی در محل بند است، درحالی‌که بخشی از مطالعات پیشین بر مخاطرات انسانی، شکست سازه‌ای، خشک‌سالی حوضه‌ای یا چارچوب‌های چندمخاطره تمرکز داشته‌اند. دوم، احتمال

ریسک بر پایه داده‌های تاریخی و تحلیل فراوانی محاسبه شده است، نه صرفاً براساس قضاوت کارشناسی یا شاخص‌های عمومی خشک‌سالی. سوم، آسیب‌پذیری با یک شاخص تقاضا-تحویل تعریف شده که به‌طور مستقیم رابطه بین حبابه و آب تحویلی را برای هر بهره‌بردار نشان می‌دهد. چهارم، پیامدها با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی و براساس شاخص‌های عملکردی شبیه‌سازی شده محاسبه شده‌اند و بنابراین نسبت به روش‌های کاملاً ذهنی از عینیت بیشتری برخوردارند. از نظر مقیاس مکانی نیز تفاوت مهمی وجود دارد. بسیاری از مطالعات پیشین، ارزیابی را در سطح سامانه، چند سازه اصلی یا تعداد محدودی آبگیر انجام داده‌اند. در مقابل، این پژوهش کل شبکه را در سطح ۶۵۹ واحد آبیاری بررسی کرده و برای هر واحد مقدار آسیب‌پذیری، پیامد و ریسک را محاسبه کرده است. این تفکیک مکانی امکان شناسایی زون‌های اولویت‌دار، طراحی مداخلات هدفمند و تخصیص عادلانه‌تر منابع مدیریتی را فراهم می‌کند.

همان‌گونه‌که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، وجه تمایز اصلی پژوهش حاضر، تلفیق داده‌های تاریخی جریان، شبیه‌سازی هیدرولیکی-بهره‌برداری، شاخص جدید آسیب‌پذیری و شاخص پیامد مبتنی بر PCA در یک چارچوب مکانی و قابل تکرار است. این ترکیب باعث می‌شود خروجی پژوهش به‌طور مستقیم به تصمیم‌های مدیریتی، مانند بازنگری دستورالعمل‌های بهره‌برداری، اصلاح سازه‌ها، پایش زون‌های بحرانی و اولویت‌بندی حمایت از بهره‌برداران، قابل اتصال باشد.

Table 1. Comparative assessment of the methodology, framework components, and practical implications of the present study and previous studies in agricultural water risk assessment literature

مطالعه	نوع خطر و احتمال	آسیب‌پذیری و پیامد	شبیه‌سازی و مقیاس مکانی	خروجی مکانی
Orojloo <i>et al.</i> (2018)	شکست‌های عملیاتی/سازه‌ای؛ عمدتاً خبرگانی	شاخص‌های کیفی و قضاوت خبرگان؛ روش فازی SAW	مدل SOBek؛ شبکه آبیاری قزوین	ارزیابی مکانی و نقشه ریسک محدود
Babaei <i>et al.</i> (2018)	شکست‌های عملیاتی/سازه‌ای؛ احتمال شکست	وزن‌دهی خبرگانی و تحلیل فازی درخت خطا	RAS-HEC؛ شبکه آبیاری دز	تحلیل ریسک سازه‌ها و آبگیرها
Bozorgi <i>et al.</i> (2021, 2024)	چندمخاطره؛ خشک‌سالی و شکست‌های انسانی/سازه‌ای	شاخص‌های کمی و کیفی؛ شبکه بیزین و بیزین فازی پویا	مدل ID در MATLAB؛ شبکه رودشت	ارزیابی در سطح آبگیرهای اصلی
Pourmahmoud <i>et al.</i> (2023, 2024)	خشک‌سالی؛ استفاده از DrinC و SDI	شاخص‌های عملیاتی/سازه‌ای و MCDM-SAW	RAS-HEC؛ شبکه رودشت	ارزیابی در سطح تعداد محدودی آبگیر
Bayat <i>et al.</i> (2025)	چندبعدی؛ اقتصادی، محیط‌زیستی، اجتماعی و فنی	چارچوب پیوند آب-غذا-انرژی؛ WASPAS-Entropy-AHP و شبکه بیزین	RAS-HEC؛ شبکه رودشت	ارزیابی مکانی در سطح آبگیرهای اصلی
پژوهش حاضر	نوسان جریان انحرافی؛ تحلیل تاریخی و فراوانی رخدادها	شاخص جدید آسیب‌پذیری تقاضا-تحویل و شاخص پیامد PCA	مدل ID و SOP دستی در MATLAB؛ ۶۵۹ واحد آبیاری در مهیار-جرقویه	نقشه‌های آسیب‌پذیری، پیامد و ریسک در سطح کل واحدها

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش چارچوبی عملی برای ارزیابی ریسک شکست تحویل آب سطحی در شبکه‌های آبیاری تحت نوسانات جریان ورودی ارائه کرد. نتایج نشان داد که نوسانات جریان در محل بند انحرافی، به‌ویژه در شرایط کم‌آبی، می‌تواند از یک مسئله موضعی به یک عامل شکست سیستمی تبدیل شود. تحلیل فراوانی رخدادها نشان داد که بیش‌تر نوسانات

ثبت شده در طبقه نوسان زیاد قرار دارند و بنابراین فرض پایداری جریان ورودی برای بهره‌برداری دستی مناسب نیست. شاخص آسیب‌پذیری پیشنهادی نشان داد که واحدهای پایین‌دست و پیرامونی شبکه بیش‌ترین حساسیت را نسبت به نوسان جریان دارند. این حساسیت ناشی از افزایش زمان سفر جریان، تأخیر در اصلاح تنظیمات دستی و تجمع خطاهای بهره‌برداری است. شاخص پیامد مبتنی بر PCA نیز نشان داد که افت عملکرد فقط در شاخص کفایت خلاصه نمی‌شود، بلکه هم‌زمان با کاهش پایداری و تغییر راندمان، پیامدهای چندبعدی برای بهره‌برداران ایجاد می‌کند.

نقشه‌های ریسک بیانگر گذار مرحله‌ای از ریسک‌های محدود و مکانی در شرایط عادی و نوسان کم به ریسک‌های گسترده و سیستمی در شرایط نوسان شدید بودند. در شدیدترین سناریو، بخش عمده شبکه در طبقات ریسک بالا قرار گرفت و تنها نواحی محدود نزدیک به سرشبکه وضعیت نسبی بهتری داشتند. این یافته نشان می‌دهد که در شرایط بحرانی، مدیریت شبکه باید از اصلاحات موضعی به برنامه‌های ناحیه‌ای و اضطراری برای کاهش شکست تحویل آب تغییر جهت دهد. مزیت اصلی چارچوب پیشنهادی، قابلیت کاربرد آن در سطح واحدهای بهره‌بردار و تولید نقشه‌های مکانی ریسک است. چنین خروجی‌هایی می‌توانند برای بازنگری دستورالعمل‌های بهره‌برداری دستی، شناسایی زون‌های اولویت‌دار، اصلاح یا نوسازی سازه‌های تنظیم، طراحی برنامه‌های پایش و توزیع عادلانه‌تر منابع مدیریتی استفاده شوند. با این حال، چارچوب حاضر بر یک خطر مشخص، یعنی نوسان جریان ورودی، تمرکز دارد. برای اهداف چندمخاطره، لازم است این رویکرد از یک چارچوب شاخص‌محور به سمت مدل‌های احتمالاتی یا سیستم‌محور توسعه یابد. همچنین، کاربرد آن در شبکه‌های خودکار یا نیمه‌خودکار می‌تواند موضوع مطالعات آینده باشد.

۵. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶. منابع

- Abdulhamid, A., Rahman, M.M., Kabir, S., & Ghafir, I. (2024). Enhancing safety in IoT systems: A model-based assessment of a smart irrigation system using fault tree analysis. *Electronics*, 13, 1156.
- Babaei, M., Roozbahani, A., & Shahdany, S. (2018). Risk assessment of agricultural water conveyance and delivery systems by fuzzy fault tree analysis method. *Water Resources Management*, 32, 4079-4101.
- Bayat, F., Roozbahani, A., & Shahdany, S.M.H. (2025). An integrated risk-based water-food-energy nexus assessment framework for surface water operation governance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 229, 109659.
- Berbel, J., Expósito, A., Gutiérrez-Martín, C., & Mateos, L. (2019). Effects of the irrigation modernization in Spain 2002–2015. *Water Resources Management*, 33, 1835-1849.
- Bozorgi, A., Roozbahani, A., Hashemy Shahdany, S.M., & Abbassi, R. (2021). Development of multi-hazard risk assessment model for agricultural water supply and distribution systems using Bayesian network. *Water Resources Management*, 35, 3139-3159.
- Bozorgi, A., Roozbahani, A., Hashemy Shahdany, S.M., & Abbassi, R. (2024). Developing a risk management framework for agricultural water systems using fuzzy dynamic Bayesian networks and decision-making models. *Water Resources Management*, 1-23.
- Chernysh, Y., Stejskalová, L., Soldán, P., Lai, F.Y., Khan, U.A., Lundborg, C.S., Giambérini, L., Mínguez, L., Monte, M.C., & Blanco, A. (2024). Risk assessment as a tool to improve water resource management. *Water Resources Management*, 1-17.
- Das, A., Sahoo, B., & Panda, S.N. (2020). Evaluation of nexus-sustainability and conventional approaches for optimal water-energy-land-crop planning in an irrigated canal command. *Water Resources Management*, 34, 2329-2351.

- Deblais, L., Kauffman, M., & Rajashekara, G. (2024). Impact of irrigation source on the dissemination and persistence of coliforms and foodborne pathogens in fresh tomato high tunnel-dripline system from small specialty crop farms. *Journal of Food Protection*, 87, 100382.
- Dehghani, S., Massah Bavani, A., Roozbahani, A., & Sahin, O. (2024). Assessment of climate change-induced water scarcity risk by using coupled system dynamics and Bayesian network modeling approaches. *Water Resources Management*, 38, 3853-3874.
- Gao, D., Chen, A.S., & Memon, F.A. (2024). A systematic review of methods for investigating climate change impacts on Water-Energy-Food Nexus. *Water Resources Management*, 38, 1-43.
- Izady, A., Khorshidi, M.S., Nikoo, M.R., Al-Maktoumi, A., Chen, M., Al-Mamari, H., & Gandomi, A.H. (2021). Optimal water allocation from subsurface dams: a risk-based optimization approach. *Water Resources Management*, 35, 4275-4290.
- Le, T., Sun, C., Choy, S., Kuleshov, Y., & Tran, T.D. (2024). Agricultural drought risk assessments: a comprehensive review of indicators, algorithms, and validation for informed adaptations. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15, 2383774.
- Liu, X., Guo, P., Tan, Q., Zhang, F., Huang, Y., & Wang, Y. (2021). Drought disaster risk management based on optimal allocation of water resources. *Natural Hazards*, 108, 285-308.
- Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23, 881-897.
- Orojloo, M., Shahdany, S.M.H., & Roozbahani, A. (2018). Developing an integrated risk management framework for agricultural water conveyance and distribution systems within fuzzy decision making approaches. *Science of the Total Environment*, 627, 1363-1376.
- Ortega-Gaucin, D., Ceballos-Tavares, J.A., Ordoñez Sánchez, A., & Castellano-Bahena, H.V. (2021). Agricultural drought risk assessment: A spatial analysis of hazard, exposure, and vulnerability in Zacatecas, Mexico. *Water*, 13, 1431.
- Pourmahmoud, J., Hashemy Shahdany, S.M., & Roozbahani, A. (2023). Drought risk assessment for surface water distribution systems in irrigation districts. *Water Resources Management*, 37, 5325-5342.
- Pourmahmoud, J., Hashemy Shahdany, S.M., & Roozbahani, A. (2024). Practical drought risk assessment and management framework: A step toward sustainable modernization in agricultural water management. *Journal of Hydrology*, 644, 132121.
- Ronco, P., Zennaro, F., Torresan, S., Critto, A., Santini, M., Trabucco, A., Zollo, A., Galluccio, G., & Marcomini, A. (2017). A risk assessment framework for irrigated agriculture under climate change. *Advances in Water Resources*, 110, 562-578.
- Roozbahani, A., & Ghanian, T. (2024). Risk assessment of inter-basin water transfer plans through integration of Fault Tree Analysis and Bayesian Network modelling approaches. *Journal of Environmental Management*, 356, 120703.
- Shelar, A., Singh, A.V., Chaure, N., Jagtap, P., Chaudhari, P., Shinde, M., Chaskar, M., Patil, R., & Nile, S.H. (2024). Nanoprimers in sustainable seed treatment: molecular insights into abiotic-biotic stress tolerance mechanisms for enhancing germination and improved crop productivity. *Science of the Total Environment*, 175118.
- Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2012). Drought and climatic change impact on streamflow in small watersheds. *Science of the Total Environment*, 440, 33-41.
- Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2015). DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics*, 8, 697-709.
- Tingsanchali, T., & Piriya Wong, T. (2018). Drought risk assessment of irrigation project areas in a river basin. *Engineering Journal*, 22, 279-287.
- Yue, W., Liu, Z., Su, M., Xu, M., Rong, Q., Xu, C., Tan, Z., Jiang, X., Su, Z., & Cai, Y. (2022). Inclusion of ecological water requirements in optimization of water resource allocation under changing climatic conditions. *Water Resources Management*, 36, 551-570.