

# بررسی اثر خطای بهره‌برداری بر عدم قطعیت عملکرد شبکه‌های آبیاری در روش تحویل

## توافقی

### چکیده

کاربرد روش تحویل توافقی برای افزایش اختیار کشاورزان در مدیریت آبیاری و بهبود بهره‌وری در شبکه‌های آبیاری توصیه شده است. در روش توافقی تنوع و تعدد درخواست‌ها در زمان و مکان، موجب پیچیدگی عملیات بهره‌برداری و افزایش احتمال خطا در تنظیم سازه‌ها می‌شود. هدف این پژوهش، بررسی اثرات خطای تنظیم سازه‌ها بر عدم قطعیت شاخص‌های عملکرد کانال‌ها می‌باشد. بدین منظور در یک کانال دو گزینه افزایش و کاهش درخواست در نظر گرفته شد. همچنین چهار سناریو برای خطای تنظیم سازه‌ها، شامل یک آب‌بند، یک آب‌بند و یک آبگیر، دو آب‌بند، دو آب‌بند و یک آبگیر تعریف شد. در سناریوهای مختلف اعداد تصادفی برای تنظیم سازه‌ها با استفاده از روش مونت‌کارلو تولید شد. سامانه کانال، سناریوهای تنظیم سازه‌ها و گزینه‌های تحویل آب با استفاده از مدل هیدرودینامیک ICSS شبیه‌سازی شدند. شاخص‌های خروجی شامل دبی تحویلی، کفایت، راندمان و پایداری تحویل، و خطای تنظیم عمق بررسی شدند. عدم قطعیت شاخص‌ها، برای احتمال خطای تنظیم سازه‌ها از ۳۸ تا ۹۵ درصد محاسبه شد. محدوده عدم قطعیت دبی تحویلی برای سناریوی افزایشی بین ۳۸ تا ۹۵ درصد، و برای سناریوی کاهش‌ی بین ۳۳ تا ۸۵ درصد به دست آمد. بنابراین سناریوهای افزایشی دارای عدم قطعیت بیشتری بودند، و دقت تنظیم سازه‌ها در شرایط افزایش جریان اهمیت بیشتری دارد. با افزایش سازه‌هایی که تنظیم آنها با خطا همراه بود، دامنه عدم قطعیت عموم شاخص‌ها افزایش یافته است، که بیشترین آنها در گزینه افزایشی برای پایداری تحویل با ۱۲ درصد، و در گزینه کاهش‌ی برای شاخص عمق با ۸ درصد بوده است. در سناریوهای افزایشی، دبی تحویلی با محدوده عدم قطعیت ۳۸ تا ۹۵ درصد حساسترین پارامتر بود. در سناریوهای کاهش‌ی شاخص‌های عمق با محدوده عدم قطعیت ۳۶ تا ۸۲ درصد نسبت به دبی تحویلی حساس‌تر بوده است. بنابراین در سناریوهای افزایشی تنظیم دبی تحویلی، و در سناریوهای کاهش‌ی تنظیم عمق اهمیت بیشتری داشته‌اند.

کلید واژه‌ها: بهره‌برداری سازه‌ها، تحویل توافقی، خطای بهره‌برداری، روش مونت‌کارلو، شبکه‌های آبیاری، عدم قطعیت.

## Investigation of the Effect of Operational Errors on the Performance Uncertainty of Irrigation Networks in Arranged Delivery

### Abstract

Arranged delivery is recommended for higher irrigation management flexibility and water productivity in irrigation networks. For arranged delivery, the spatial and temporal variations of numerous requests increase the complexity of the operation and the probability of operational errors. The objective of this research is to consider the operational errors and analyze their impact on output uncertainty. To this end, in a canal, two options of increase and decrease in demand, and four scenarios of structural operational errors are studied. The structural operational error scenarios include one check structure, one check and one intake, two check structures, two checks, and one intake. In each scenario, random numbers for structural adjustment were generated using the Monte Carlo simulation method. The canal system, operational scenarios, and delivery options were simulated using the Irrigation Conveyance System Simulation (ICSS) model. The analyzed outputs are delivery discharge, adequacy, efficiency, stability, and depth control error. The uncertainty of outputs is calculated for the operational error range of 38 to 95%. The uncertainty band of the flow delivery for the increasing scenario was between 38 to 95%, and 33 to 85% for the decreasing scenario. Therefore, increasing scenarios produce higher uncertainty, and require a more accurate operation. By increasing the number of structures that encounter operational error, the uncertainty of almost all outputs has increased. The highest increment of 12% was seen in the stability index for the increasing scenario and an 8% uncertainty band increase in the depth index for the decreasing scenario. For increasing scenarios, delivery discharge with an uncertainty band of 38 to 95% is the most sensitive parameter. For decreasing scenarios, the depth control parameter with an uncertainty band of 36 to 82% is more sensitive compared to delivery flow. Therefore, for increasing scenarios the delivery discharge, and for decreasing scenarios, the water depth are more important parameters to be controlled.

Keywords: Arranged Delivery, Irrigation Networks, Monte Carlo Method, Operational Errors, Structural Operation, Uncertainty.

## مقدمه

بهبود بهره‌وری شبکه‌های آبیاری مستلزم ارتقاء روش‌های توزیع و تحویل آب و افزایش اختیار کشاورزان و انعطاف‌پذیری در مدیریت آبیاری متناسب با نیاز گیاه است. عوامل اصلی توزیع و تحویل آب عبارتند از دبی (Q)، مدت زمان آبیاری (d) و دور آبیاری (f). بسته به چگونگی تغییر این عوامل و شخص مسئول تصمیم‌گیرنده در مورد آنها، روش‌های مختلف توزیع و تحویل آب تعریف شده است. در روش گردش عوامل تحویل توسط مدیر شبکه از قبل تعیین شده و کشاورز ملزم به تبعیت از آنها است. در روش توافقی درخواست آب توسط کشاورز صورت می‌گیرد و مدیر شبکه متناسب با امکانات موجود با توافق با کشاورزان نسبت به تحویل آب اقدام می‌نماید. بنا براین در روش توافقی انعطاف‌پذیری در مدیریت آبیاری افزایش یافته و امکان بهبود بهره‌وری فراهم می‌شود. جایگزینی روش تحویل توافقی به جای روش گردشی که توسط محققین توصیه شده، در شبکه‌های آبیاری موجود که به صورت دستی بهره‌برداری می‌شوند، بدون نیاز به سامانه‌های پرهزینه خودکار با اصلاح مدیریت شبکه امکان‌پذیر است. یکی از مهمترین مسائل در بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری، اجرای عملیات بهره‌برداری مطابق با دستورالعمل‌های توصیه شده می‌باشد. در روش تحویل توافقی، تنوع و تعدد درخواست‌های زارعین در زمان و مکان‌های مختلف، تنظیم سازه‌ها را پیچیده و دشوار می‌سازد. بنابراین امکان بروز خطا در تنظیم سازه‌ها افزایش می‌یابد. اگرچه کاربرد روش توافقی موجب بهبود انعطاف‌پذیری مدیریت آبیاری می‌شود، اما افزایش امکان خطا در عملیات بهره‌برداری ممکن است اثر معکوس بر عملکرد شبکه داشته باشد. بنابراین لازم است ضمن بررسی خطای بهره‌برداری در روش تحویل توافقی اثرات آن بر عدم قطعیت عملکرد شبکه‌های آبیاری تعیین شود تا بتوان با آگاهی کاملتر نسبت به جایگزینی روش توافقی تصمیم‌گیری نمود.

برای توسعه کاربرد روش توافقی در شبکه‌های آبیاری پژوهش‌های مختلفی صورت گرفته است. برخی محققین در زمینه دسته بندی روش‌های توافقی و رتبه‌بندی انعطاف‌پذیری آنها اقدام کرده‌اند (نقایی و منعم، ۱۳۹۸؛ ساوری و منعم ۱۴۰۰). گروهی از محققین نسبت به تعیین ظرفیت کانال‌های آبیاری متناسب با روش‌های تحویل توافقی تحقیقاتی را انجام داده‌اند (Monserrat et al., 2004; Anwar et al., 2006; Naghaee and Monem 2019; Monserrat. J. et al., 2021). جمعی از محققین در خصوص تعیین دستورالعمل‌های بهره‌برداری برای روش توافقی و ارزیابی هیدرولیکی آنها اقدام نموده‌اند (شاهوردی و همکاران، ۱۳۹۴؛ Savari et al. 2016; Shahverdi and Monem 2022; Ostovari and Monem 2022; ۱۴۰۱). ایجاد جریان غیرماندگار در شبکه‌های آبیاری به دلیل اجرای عملیات بهره‌برداری باعث تغییرات دبی و عمق در زمان و مکان در سراسر شبکه می‌شود که یکی از مشکلات مدیریت شبکه‌ها است (Shahverdi & Monem 2022). این مسئله در روش توافقی، بخصوص در شرایط خطای تنظیم سازه‌ها اهمیت بیشتری در مدیریت شبکه پیدا می‌کند. انجام تحقیقات در زمینه‌های مرتبط مستلزم استفاده از مدل‌های هیدرودینامیک است که با توجه به در اختیار داشتن متن برنامه ICSS<sup>۱</sup> در عمده تحقیقات معرفی شده و در این پژوهش از این برنامه استفاده شده است. در این بخش پژوهش‌های مرتبط با بهره‌برداری و عدم قطعیت در شبکه‌های آبیاری معرفی می‌شود و در انتها جمع‌بندی آنها ارائه می‌شود.

شاهوردی و همکاران و (2022) Shahverdi, and Monem مدل هوشمند دستورالعمل بهره‌برداری روش توافقی را برای شبکه‌های

<sup>1</sup> Irrigation Conveyance System Simulation

آبیاری با استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی سارسای فازی (FSL)<sup>۲</sup> توسعه دادند. این تحقیق در کانال E1R1 در شبکه دز آزمایش شد. ورودی الگوریتم یادگیری، دبی‌های درخواست شده، و خروجی آن میزان تنظیم سازه‌ها در شرایط جریان غیرمماندار بود. نتایج حاصل، با استفاده از نمودارهای تغییر عمق و دبی و همچنین شاخص‌های راندمان، عدالت و کفایت تحویل ارزیابی شد. نتایج به دست آمده بیانگر توانایی الگوریتم در تعیین الگوی مناسب بهره‌برداری بود (شاهوردی و همکاران، ۱۳۹۴). Savari et al. (2016) برای انواع روش‌های توافقی، روش بهره‌برداری دستی مرسوم را با بهره‌برداری هوشمند بر اساس یادگیری سارسای فازی در کانال عقیلی شرقی مقایسه نمودند. ایشان نشان دادند که در گزینه‌های ساده روش توافقی تفاوت معناداری میان دو روش بهره‌برداری وجود ندارد، ولی مزایای روش هوشمند برای گزینه‌های پیچیده‌تر روش توافقی کاملاً محسوس است. Savari and Monem (2022) با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی به عنوان مدل جایگزین هیدرودینامیک و روش بهینه‌سازی ژنتیک سعی در استخراج دستورالعمل‌های بهره‌برداری کانال‌های آبیاری برای روش توافقی نمودند. ایشان نشان دادند که برای روش‌های توافقی با مدت زمان تحویل کوتاه‌تر دستورالعمل بهینه موجب بهبود قابل توجه عملکرد کانال می‌شود، و از مدل توسعه یافته می‌توان در بهره‌برداری زمان واقعی روش‌های توافقی استفاده نمود. هادی‌سراجی و همکاران گزینه‌های مختلف تحویل و توزیع توافقی را از نظر هیدرولیکی در شبکه‌های آبیاری ارزیابی کردند. طبق نتایج این پژوهش چنانچه عملیات تنظیم سازه‌ها دقیقاً طبق دستورالعمل‌ها و بدون خطا انجام گیرد، تامین درخواست‌ها به خوبی انجام شده و انعطاف‌پذیری مورد نظر به دست خواهد آمد (هادی سراجی و همکاران ۱۴۰۰؛ هادی‌سراجی و همکاران، ۱۴۰۱).

وجود خطا و عدم قطعیت در بسیاری از مسائل مهندسی ضرورت بررسی آن را ایجاب می‌کند. خطاهای سیستمی و فردی موجب ایجاد عدم قطعیت در خروجی سامانه‌ها می‌شود. در شبکه‌های آبیاری خطای سیستمی ناشی از خطا در ساخت و نصب سازه‌ها، و خطای فردی ناشی از خطای بهره‌بردار در زمان و مقدار تنظیم سازه‌ها است (خورشیدی، ۱۴۰۱). موضوع عدم قطعیت در انواع مسائل منابع آب استفاده شده است ولی در مسائل شبکه‌های آبیاری به ندرت بررسی شده است. در اولین پژوهش‌های مرتبط با طراحی کانال‌های آبیاری، عدم قطعیت پارامترهای بارندگی، تبخیر و تعرق، راندمان کاربرد، ضریب زبری، و شاخص‌های تحویل آب، در نظر گرفته شد. در این تحقیقات اندازه بهینه آبیاری با لحاظ عدم قطعیت پارامترها تعیین شد (Gates Molden et al. 1989; Gates, T. G., & Alsheikh, A.A. 1993; et al. 1992; Li et al. (2018) با در نظر گرفتن عدم قطعیت بارش، تبخیر و تعرق و قیمت محصول، با استفاده از روش مونت کارلو و احتمال وقوع کران بالا و پایین، برنامه آبیاری بهینه را به دست آوردند. در یک مورد پژوهش مرتبط با بهره‌برداری کانال‌های آبیاری توسط آقای، اثر خطای تنظیم یک آبیگر بر عدم قطعیت شاخص‌های تحویل با استفاده از روش مونت کارلو و مدل هیدرودینامیک بررسی شده است. این پژوهش در کانال عقیلی شرقی برای یک برنامه تحویل آب و سه گزینه زمان تنظیم یک آبیگر انجام شد. نتایج نشان داد که گزینه زمان متوسط از نظر شاخص کفایت کمترین عدم قطعیت را در شاخص‌های تحویل دارد (آقای، ۱۳۹۸).

به عنوان جمع‌بندی بررسی سوابق موضوع می‌توان اظهار داشت که در تحقیقات گذشته جایگزینی روش توافقی به جای روش گردشی برای افزایش انعطاف‌پذیری مدیریت آبیاری در شبکه‌های آبیاری توصیه شده و تحقیقات مختلفی در این خصوص انجام شده است. با توجه به پیچیدگی دستورالعمل‌های بهره‌برداری در روش توافقی، روش‌های هوشمند از جمله FSL و بهینه‌سازی برای استخراج دستورالعمل‌های بهره‌برداری به کار گرفته شده است. عملکرد هیدرولیکی کانال‌های آبیاری با روش تحویل توافقی ارزیابی شده و نشان داده شد که در صورت اجرای دقیق عملیات بهره‌برداری، درخواست‌ها به خوبی تامین می‌شود و انعطاف‌پذیری مورد نظر قابل دستیابی است. مسائل مختلف روش توافقی تاکنون به صورت قطعی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به پیچیدگی عملیات بهره‌برداری روش برحسب درخواست، ناشی از تعدد و تنوع زمانی و مکانی درخواست‌ها، امکان بروز خطا در اجرای عملیات بهره‌برداری کاملاً محتمل است. در یک مورد بررسی خطای بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری، صرفاً یک سازه آبیگر و یک روش تحویل مورد بررسی قرار گرفته است.

<sup>2</sup> Fuzzy SARSA Learning

در این پژوهش موضوع خطا در تنظیم مجموعه‌ای از سازه‌های آب‌بند و آبگیر، برای سناریوهای مختلف روش توافقی بررسی شده و تاثیر آن بر عدم قطعیت عملکرد سامانه تعیین شده است. بدین ترتیب مشخص شد که شاخص‌های عملکرد و انعطاف‌پذیری مورد نظر در سناریوهای مختلف عملاً با چه احتمالی قابل دستیابی خواهد بود. در این روش با داشتن میانگین و انحراف معیار استاندارد و استفاده از تابع توزیع احتمال ورودی‌ها، تابع توزیع احتمال متغیرهای خروجی و میزان عدم قطعیت آنها تعیین شده است. برای ارزیابی عدم قطعیت از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است که مراحل آن به صورت کلی شامل تعیین تابع هدف، تعیین متغیرهای مورد نظر، ایجاد اعداد تصادفی متغیرها، شبیه‌سازی سناریوهای بهره‌برداری و ارزیابی و تحلیل نتایج بود. شبیه‌سازی سناریوها با تلفیق روش مونت کارلو در مدل ICSS انجام شده است که در ادامه معرفی می‌شوند.

## روش‌شناسی پژوهش

با توجه به هدف اصلی تحقیق روش شناسی پژوهش دارای اجزاء مختلفی به شرح زیر است. برای شبیه‌سازی جریان در کانال، اجرای عملیات بهره‌برداری و محاسبه شاخص‌ها از مدل هیدرودینامیک ICSS استفاده شده است. به منظور تولید سناریوهای مختلف خطا در تنظیم سازه‌ها مدل مونت کارلو به کار گرفته شده است. با تلفیق این دو مدل سناریوهای مختلف، تولید و شبیه‌سازی شده‌اند. مدل تلفیقی بر روی کانال عقیلی شرقی در شبکه عقیلی در استان خوزستان مورد آزمون قرار گرفته است. برای این امر ابتدا محاسبات نیاز آبی در بهره‌برداری توافقی در کانال عقیلی شرقی انجام شده و تنظیم سازه‌ها در شرایط معمول تعیین شده است. با توجه به تفاوت رفتار هیدرولیکی جریان افزایشی و کاهش‌ی، این دو گزینه برای تغییرات درخواست‌ها در نظر گرفته شد. سناریوهای مختلف خطای تنظیم سازه‌ها بر روی مجموعه‌ای از سازه‌ها در کانال عقیلی شرقی تعریف شد و برای دو گزینه افزایشی و کاهش‌ی شبیه‌سازی شدند. با تولید خروجی‌های مدل تلفیقی شاخص‌های ارزیابی محاسبه شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در ادامه هر یک از اجزای پژوهش و ارتباط آنها معرفی می‌شوند.

## مدل هیدرودینامیک ICSS

این مدل برای شبیه‌سازی جریان در حالت ماندگار از معادلات جریان متغیر تدریجی ارائه شده توسط Henderson (1966)، و در حالت غیرماندگار از معادلات سنت‌ونانت به شکل روابط ۱ و ۲ ارائه شده توسط Amin (1968) استفاده می‌کند.

$$\left(\frac{A}{B}\right) \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{V}{B} (A_x^y) - \frac{1}{B} (p - i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x} + g(S_f - S_0) + \frac{V}{A} (p - i) = 0 \quad (2)$$

در این روابط A سطح مقطع جریان، B عرض کانال در سطح فوقانی جریان، V سرعت جریان، y عمق جریان،  $A_x^y$  تغییرات سطح مقطع جریان نسبت به X با فرض Y ثابت، p جریان گسترده ورودی، i جریان گسترده خروجی، x و t به ترتیب متغیر مکان و زمان می‌باشند. این معادلات با روش تفاضل‌های محدود بر اساس سیستم چهار نقطه‌ای وزنی که از دقت، همگرایی، پایداری و صحت بالایی برخوردار است حل می‌شوند. صحت سنجی و اعتبار سنجی این مدل در تحقیقات مختلف آزمایشگاهی و میدانی انجام شده و کاربرد آن به تایید انجمن مهندسين عمران کانادا رسیده است (محسنی موحد و منعم ۱۳۸۶، Manz & Schaalje 1992). شایان ذکر است هدف اصلی این پژوهش تحلیل اثر سناریوهای مختلف بر رفتار مدل است و جنبه اجرایی سناریو‌ها هدف شبیه‌سازی نمی‌باشد، از این رو با تکیه بر تایید کاربرد گسترده مدل ICSS در شرایط مطالعاتی مشابه از آن برای شبیه‌سازی شبکه آبیاری مورد مطالعه استفاده شده است. در این پژوهش برای تعیین شرایط اولیه محاسبات و تنظیم اولیه سازه‌ها از بخش جریان ماندگار، و برای شبیه‌سازی سناریوها از بخش جریان غیرماندگار مدل استفاده شده است.

## مدل مونت کارلو

در شبیه‌سازی مونت کارلو برای کمی‌سازی عدم قطعیت خروجی مدل که ناشی از خطای داده‌های ورودی می‌باشد، مقادیر تصادفی از متغیرهای ورودی مورد نظر با توجه به توزیع احتمالی مربوط تولید می‌شوند و مدل به ازاء هر یک از متغیرها اجرا می‌گردد. در شبیه‌سازی مونت کارلو، کل فرایند به تعداد دفعات زیادی مثلاً ۵۰۰ یا ۱۰۰۰ بار اجرا می‌شود. برای هر شبیه‌سازی، عوامل غیرقطعی نمونه‌برداری می‌شود یعنی یک مقدار تصادفی از توزیع اختصاصی مربوط به هر پارامتر (تنظیم سازه‌ها)، انتخاب می‌شود، سپس نمونه منتخب در طول زمان شبیه‌سازی می‌شود. این امر منتج به ایجاد تعداد زیادی نتیجه مستقل و جداگانه خروجی (دبی‌های تحویلی و شاخص‌های عملکرد) می‌شود که توزیع‌های احتمالی آنها به دست می‌آید. برای دریچه‌های آبگیر و آب‌بند رابطه‌های ۳ و ۴ بترتیب برای جریان آزاد و مستغرق به کار می‌رود.

$$Q = C_d G_0 b \sqrt{2g y_{up}} \quad (3)$$

$$Q = C_d G_0 b \sqrt{2g (y_{up} - y_p)} \quad (4)$$

در این روابط  $Q$  میزان جریان عبوری از دریچه،  $C_d$  ضریب جریان،  $G_0$  میزان بازشدگی دریچه،  $y_{up}$  و  $y_p$  به ترتیب عمق آب بالادست و پایین دست دریچه،  $b$  عرض دریچه و  $g$  شتاب ثقل می‌باشد.

مقدار تنظیم سازه‌ها یا در نظر گرفتن خطا، به صورت توزیع نرمال در نظر گرفته شد. برای یک متغیر تصادفی  $x$  (مقدار تنظیم سازه‌ها  $G_0$ ) با توزیع نرمال که دارای میانگین  $\mu_x$  و انحراف معیار  $\sigma_x$  می‌باشد، رابطه بین متغیر  $x$  و متغیر نرمال استاندارد  $Z$  (با میانگین صفر و انحراف معیار یک) به صورت روابط ۵ تا ۷ بیان می‌شود.

$$X = N(\mu_x, \delta_x) \quad (5)$$

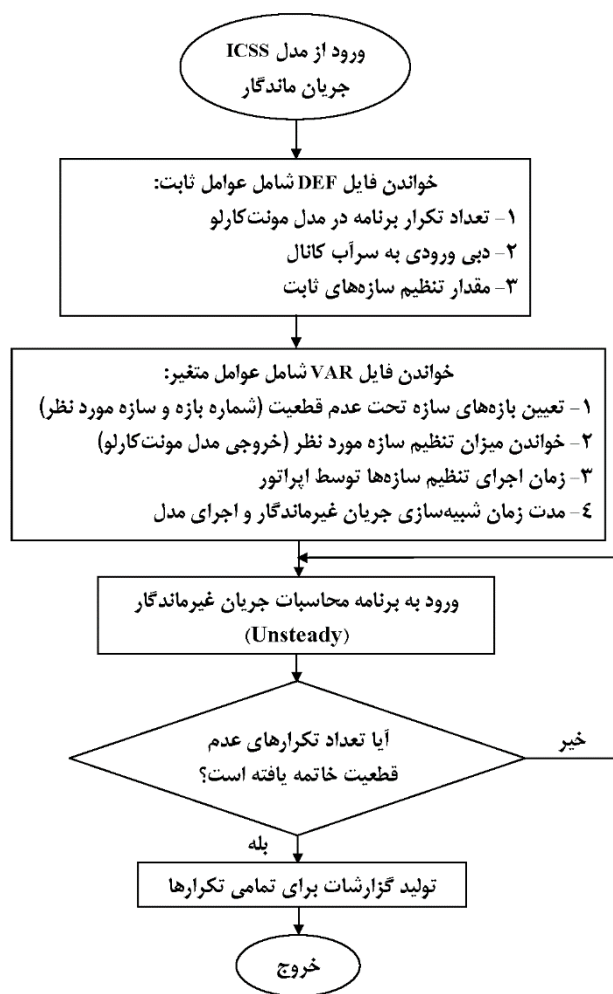
$$X = \mu_x + Z \delta_x \quad (6)$$

$$Z = N(0, 1) \quad (7)$$

در توزیع نرمال تابع  $f(x)$  بصورت تابعی از پارامترهای  $\mu$  و  $\sigma$  طبق رابطه ۸ بیان می‌شود. هر تابع نرمال به صورت تابع توزیع احتمال (Probability Density Function) PDF یا تابع تجمعی احتمال (Cumulative Density function) CDF نشان داده می‌شود.

$$f(x) = \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2} \quad (8)$$

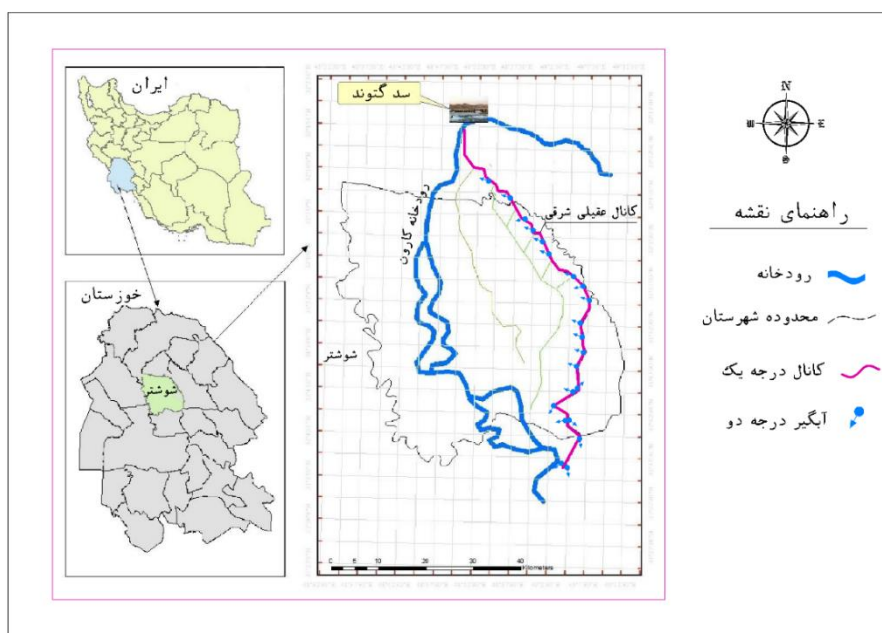
مراحل تلفیق مدل مونت کارلو و مدل ICSS در شکل ۱ نشان داده شده است.



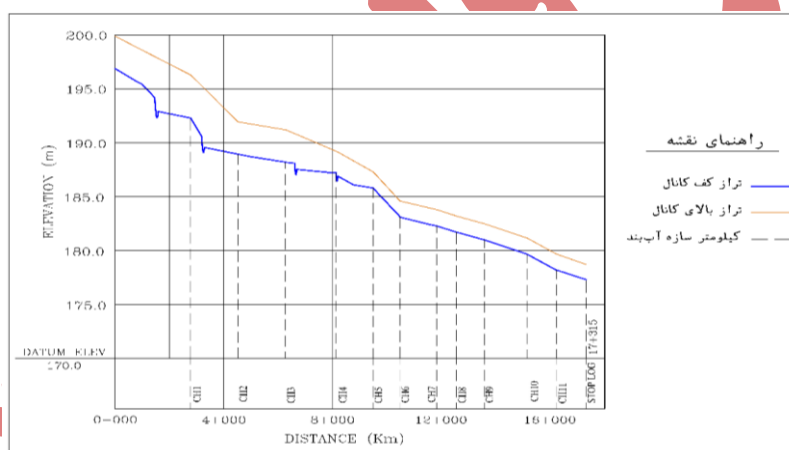
شکل ۱. روند مراحل شبیه‌سازی مدل مونت کارلو در تلفیق با مدل ICSS

### معرفی کانال مطالعه شده

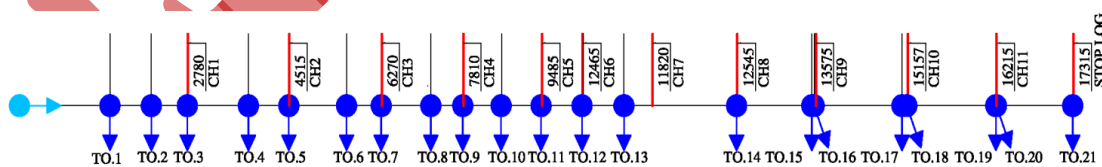
برای ارزیابی عدم قطعیت در روش‌های بهره‌برداری توافقی، کانال عقیلی شرقی واقع در شبکه آبیاری عقیلی انتخاب شده است. شبکه عقیلی متشکل از کانال اصلی عقیلی و دو کانال درجه یک به نام‌های کانال عقیلی شرقی و کانال عقیلی غربی می‌باشد. حداکثر ظرفیت کانال عقیلی شرقی ۵ متر مکعب در ثانیه می‌باشد. سازه‌های آب‌بند و آبگیر در کانال بصورت دریاچه‌های کشویی مستطیلی و بهره‌برداری از آنها به صورت دستی می‌باشد. کانال عقیلی شرقی بصورت بتنی با مقطع دوزنقه‌ای با شیب جانبی ۱:۱ ساخته شده است. طول این کانال ۱۷/۳۱۵ کیلومتر و از کیلومتر ۰+۰۰۰ تا کیلومتر ۹+۱۲۵ دارای عرض کف ۱/۵ متر و از کیلومتر ۹+۱۲۵ تا انتهای کانال دارای عرض کف ۱ متر می‌باشد. شیب طولی کانال بین ۰/۰۰۰۴ تا ۰/۰۰۱ در طول کانال متغیر می‌باشد. این کانال دارای ۲۱ آبگیر، و ۱۱ آب‌بند است که ۴ مورد آن به صورت چک-دراپ می‌باشد. ابعاد آبگیرها ۰/۶×۰/۳ متر در متر (عرض×ارتفاع) است. ابعاد ۵ آب‌بند ابتدایی، ۱/۵×۱/۵ متر در متر و ۶ آب‌بند انتهایی و ۱/۰×۱/۰ متر در متر است. شکل ۲ موقعیت کانال مورد مطالعه، شکل ۳ پروفیل طولی کانال و شکل ۴ شمایی از جانمایی سازه‌های آب‌بند و آبگیر را نشان می‌دهد.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی استان خوزستان، شهرستان شوشتر و نمای کلی از کانال عقیلی شرقی.



شکل ۳. پروفیل طولی کانال عقیلی شرقی



شکل ۴. شمایی از جانمایی آبگیرها و سازه‌های آب‌بند کانال عقیلی شرقی

### نیاز آبی و بهره‌برداری توافقی در کانال عقیلی

در روش توافقی، می‌توان عوامل تحویل (دبی، دور و مدت) را برحسب درخواست با توجه به حجم آب مورد نیاز تنظیم نمود. در این حالت مصرف کننده مجاز است با حداکثر ظرفیت درپچه در یک نوبت آبیاری، درخواست آب داشته باشد به شرطی که عوامل دیگر با قوانین توافقی شده تحویل همخوانی داشته باشد. حجم آب مورد نیاز برای هر آبگیر بر اساس مساحت تحت پوشش آن و نیاز آبیاری برای ماه حداکثر مصرف الگوی زارعی منطقه که در حال حاضر کشت غالب آن گندم می‌باشد، در نظر گرفته شده و حجم آب مورد نیاز برابر ۱۰۸۰ مترمکعب در هکتار برآورد شده است (هادی سراجی و همکاران، ۱۴۰۱). اولویت عوامل موثر بر انعطاف‌پذیری در روش‌های توافقی به ترتیب عبارتند از دبی، مدت و دور آبیاری (نقایی ۱۳۹۸). لذا از میان گزینه‌های روش‌های

توافقی، روش دبی و زمان متغیر آبیاری با دور ثابت برای این پژوهش در نظر گرفته شد. با مشخص بودن مساحت تحت پوشش و حجم آب مورد نیاز هر آبگیر در دوره مورد نظر و انتخاب مدت زمان تحویل، دبی تحویلی برای یک نوبت محاسبه شد. در صورت تحویل حجم مورد نظر در ۲۴ ساعت حداقل دبی مورد نیاز آبگیر تعیین می‌شود. با توجه به ظرفیت حداکثر آبگیرها حداقل زمان برای تحویل حجم مورد نظر ۹ ساعت به دست آمد و حداکثر دبی مورد نیاز محاسبه شد که در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. بهره‌برداری کانال عقیلی با روش توافقی با دور ثابت، دبی و مدت زمان متغیر

شماره آبگیر	مساحت (هکتار)	حداکثر نیاز آبی در ماه (m3)	دبی ۲۴ ساعته (l/s)	دبی ۹ ساعته (l/s)	شماره آبگیر	مساحت (هکتار)	حداکثر نیاز آبی در ماه (m3)	دبی ۲۴ ساعته (l/s)	دبی ۹ ساعته (l/s)
TO1	۴۰	۴۳۲۰۰	۵۰	۱۳۳	TO12	۴۵	۴۸۶۰۰	۶۰	۱۱۳
TO2	۵۰	۵۴۰۰۰	۶۵	۱۶۷	TO13	۶۰	۶۴۸۰۰	۷۵	۲۰۰
TO3	۷۰	۷۵۶۰۰	۹۰	۲۳۳	TO14	۷۰	۷۵۶۰۰	۹۰	۲۳۳
TO4	۷۰	۷۵۶۰۰	۹۰	۱۷۵	TO15	۷۰	۷۵۶۰۰	۹۰	۲۳۳
TO5	۶۰	۶۴۸۰۰	۷۵	۲۰۰	TO16	۸۰	۸۴۶۰۰	۱۰۰	۲۶۷
TO6	۴۵	۴۸۶۰۰	۶۰	۱۵۰	TO17	۳۰	۳۲۴۰۰	۳۸	۱۰۰
TO7	۱۰۰	۱۰۸۰۰۰	۱۲۵	۲۳۳	TO18	۹۰	۹۷۲۰۰	۱۱۰	۳۰۰
TO8	۶۰	۶۴۸۰۰	۷۵	۲۰۰	TO19	۲۰	۲۱۶۰۰	۲۵	۶۷
TO9	۵۵	۵۹۴۰۰	۷۰	۱۸۳	TO20	۱۰۰	۱۰۸۰۰۰	۱۲۵	۲۳۳
TO10	۸۰	۸۴۶۰۰	۱۰۰	۲۶۷	TO21	۷۰	۷۵۶۰۰	۹۰	۲۳۳
TO11	۶۰	۶۴۸۰۰	۷۵	۲۰۰					

### معرفی گزینه‌های افزایشی و کاهش

در کانال‌های آبیاری در اثر مانور دریچه‌ها و تغییر جریان، امواجی با دامنه نوسانات کم و طول موج بلند تولید می‌شود که سرعت آنها به عمق ثانویه جریان بستگی دارد. در گزینه افزایشی به دلیل آنکه عمق ثانویه جریان نسبت به عمق اولیه افزایش می‌یابد، امواج مثبت دارای جبهه تند (قائم) و سرعت بالا هستند. بنابراین امواج مثبت بدون تغییر شکل چندان و سریع به آبگیرهای پایین دست می‌رسند. در گزینه کاهش عمق جریان ثانویه نسبت به عمق اولیه کاهش می‌یابد و موج منفی ایجاد می‌شود. شکل موج منفی ایجاد شده در طول کانال بصورت تدریجی تغییر شکل یافته و با سرعت کمتری به سمت پایین دست حرکت می‌کند. در این گزینه دبی آبگیرها بصورت تدریجی تحت تاثیر قرار می‌گیرد.

برای بررسی عدم قطعیت در روش‌های توافقی، در ابتدا دو گزینه افزایشی و کاهش درخواست آبگیرها با توجه به نمونه‌هایی از الگوی تغییرات جریان در کانال در نظر گرفته شد. در گزینه افزایشی در شرایط اولیه ۱۶ آبگیر با دبی حداقل آبگیری می‌کنند و ۵ آبگیر بسته‌اند. دبی ورودی به کانال در این شرایط ۱۲۱۸ لیتر بر ثانیه بوده است. با افزایش درخواست ۱۶ آبگیر و اضافه شدن یک آبگیر دیگر با دبی‌های حداکثر، دبی ورودی به کانال به ۳۳۳۷ لیتر بر ثانیه افزایش یافته است. در گزینه کاهش در شرایط اولیه ۱۷ آبگیر با دبی حداکثر آبگیری می‌کنند و ۴ آبگیر بسته‌اند. دبی ورودی کانال در این شرایط برابر با ۳۳۳۷ لیتر بر ثانیه است. با بسته شدن ۱۷ آبگیر و باز شدن ۴ آبگیر دیگر با دبی حداقل، دبی ورودی به کانال به ۵۳۸ لیتر بر ثانیه کاهش یافته است. قابل ذکر است که همواره ۱۰۰ لیتر بر ثانیه به عنوان حبابه پایین دست نیز در نظر گرفته شده است. دبی مورد نیاز اولیه و ثانویه آبگیرهای مورد نظر و جریان ورودی در سراب کانال برای هر دو گزینه در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. تغییر درخواست اولیه و ثانویه آبگیرها در دوگزینه افزایشی و کاهش



ردیف	آبگیر	گزینه افزایشی		گزینه کاهش	
		دبی اولیه (l/s)	دبی ثانویه (l/s)	دبی اولیه (l/s)	دبی ثانویه (l/s)
۱	TO1	۵۰	۱۳۳	۱۳۳	۰
۲	TO2	۶۵	۱۶۷	۱۶۷	۰
۳	TO3	۹۰	۲۳۳	۲۳۳	۰
۴	TO4	۹۰	۲۳۳	۲۳۳	۰
۵	TO5	۷۵	۲۰۰	۲۰۰	۰
۶	TO6	۶۰	۱۵۰	۱۵۰	۰
۷	TO7	۰	۰	۰	۱۲۵
۸	TO8	۷۵	۲۰۰	۲۰۰	۰
۹	TO9	۷۰	۱۸۵	۱۸۵	۰
۱۰	TO10	۰	۰	۰	۱۰۰
۱۱	TO11	۷۵	۲۰۰	۲۰۰	۰
۱۲	TO12	۶۰	۱۵۰	۱۵۰	۰
۱۳	TO13	۷۵	۲۰۰	۲۰۰	۰
۱۴	TO14	۹۰	۲۳۳	۲۳۳	۰
۱۵	TO15	۹۰	۲۳۳	۲۳۳	۰
۱۶	TO16	۰	۰	۰	۱۰۰
۱۷	TO17	۳۸	۱۰۰	۱۰۰	۰
۱۸	TO18	۰	۰	۰	۱۱۳
۱۹	TO19	۰	۶۷	۶۷	۰
۲۰	TO20	۱۲۵	۳۲۰	۳۲۰	۰
۲۱	TO21	۹۰	۲۳۳	۲۳۳	۰
۲۲	پایین دست	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۲۳	سرآب کانال	۱۲۱۸	۳۳۳۷	۳۳۳۷	۵۳۸

با مشخص بودن دبی مورد نظر و عمق هدف در محل سازه‌ها، میزان تنظیم مورد نیاز درپچه‌های آب‌بند برای رسیدن به عمق هدف (عمق بالادست سازه آب‌بند) و آبگیرها (برای تحویل دبی مورد نظر) برای گزینه افزایشی و کاهش بطور جداگانه محاسبه شد که در جدول ۳ ارائه شده است.

### تعریف سناریوها برای بررسی عدم قطعیت

تاثیر سازه‌های آب‌بند و آبگیرهای انشعابی بر عملکرد کانال‌های آبیاری متفاوت است. سازه‌های آب‌بند در امتداد کانال و با ظرفیت‌های بیشتر، و سازه‌های آبگیر در انشعابات از کانال با ظرفیت‌های کمتر نصب می‌شوند. تغییر تنظیم آب‌بندها موجب تغییر بیشتر دبی در کانال‌ها می‌شود، و اثر نیم‌رخ برگشتی آن در طول بیشتری در بالادست آب‌بند توسعه یافته و آبگیرهای بیشتری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین تنظیمات یکسان هر دو سازه، در سازه‌های آب‌بند تاثیر بیشتری بر عملکرد کانال دارد تا آبگیرها، و بالتبع خطای تنظیم سازه‌های آب‌بند و آبگیر اثرات متفاوتی بر عدم قطعیت عملکرد کانال خواهد داشت. برای بررسی اثر این تفاوت‌ها بر عدم قطعیت عملکرد کانال، چهار سناریو برای خطای تنظیم سازه‌ها در نظر گرفته شد. با توجه به نقش عمده سازه‌های آب‌بند در تنظیم جریان، در سناریو اول، خطا صرفاً بر روی یک آب‌بند اعمال شد. با توجه به تنظیم هم‌زمان آب‌بند و آبگیر برای تحویل آب به آبگیر، در سناریوی دوم خطا بر روی یک آب‌بند و یک آبگیر اعمال شد. به منظور بررسی اثر خطا در تنظیم تعدادی بیشتری از سازه‌ها، در سناریوی سوم خطا بر روی دو آب‌بند، و در سناریوی چهارم بر روی دو آب‌بند و یک آبگیر اعمال شد. سناریوهای تعریف شده برای بررسی عدم قطعیت در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۳. میزان بازشدگی اولیه مورد نیاز درپچه‌های آبگیر و آب‌بند برای دو گزینه افزایشی و کاهش

ردیف	نام آبگیر و آببند	بازشدگی اولیه (cm)		ردیف	نام آبگیر و آببند	بازشدگی اولیه (cm)	
		گزینه افزایشی	گزینه کاهش			گزینه افزایشی	گزینه کاهش
۱	TO1	۱۸/۰	۰	۱۷	TO12	۱۸/۱	۰
۲	TO2	۱۹/۵	۰	۱۸	Check6	۹۴/۰	۱۳/۴
۳	TO3	۲۶/۰	۰	۱۹	TO13	۲۶/۰	۰
۴	Check1	۸۴/۶	۱۲/۱	۲۰	Check7	۸۵/۶	۱۳/۵
۵	TO4	۲۹/۵	۰	۲۱	TO14	۳۲/۱	۰
۶	TO5	۲۲/۸	۰	۲۲	Check8	۷۶/۰	۱۴/۳
۷	Check2	۱۰۶/۱	۱۳/۸	۲۳	TO15	۳۲/۶	۰
۸	TO6	۱۸/۵	۰	۲۴	TO16	۰/۰	۱۳/۱
۹	TO7	۰/۰	۱۴/۹	۲۵	Check9	۴۵/۳	۸/۴
۱۰	Check3	۱۰۸/۴	۱۳/۷	۲۶	TO17	۱۴/۴	۰
۱۱	TO8	۲۴/۵	۰	۲۷	TO18	۰/۰	۱۵/۹
۱۲	TO9	۲۲/۶	۰	۲۸	Check10	۴۱/۲	۲/۹
۱۳	Check4	۶۸/۲	۱۰/۳	۲۹	TO19	۹/۹	۰
۱۴	TO10	۰/۰	۱۳/۸	۳۰	TO20	۵۸/۳	۰
۱۵	TO11	۲۴/۳	۰	۳۱	Check11	۱۸/۰	۴/۳
۱۶	Check5	۷۲/۹	۷/۹	۳۲	TO21	۵۰/۰	۰

جدول ۴. سناریوهای تعریف شده برای بررسی عدم قطعیت

ردیف	نوع درخواست	سناریو	سازه‌های دارای خطای تنظیم
۱	افزایشی	۱-۱	Check7
۲		۲-۱	TO13 و Check7
۳	کاهش	۱-۲	Check4 و Check3
۴		۲-۲	Check9 و TO16, Check8

### شبیه‌سازی سناریوها

در عمل اپراتور پس از دریافت برنامه بهره‌برداری در طول کانال از بالادست حرکت کرده و سازه‌های مورد نظر را به ترتیب تنظیم می‌کند، با توجه به الگوی زمانی حرکت اپراتور زمان تنظیم سازه‌ها تعیین شد. برای شبیه‌سازی جریان در سناریوهای تعریف شده، تنظیم سازه‌ها که به صورت قطعی محاسبه گردیده (جدول ۳) بعنوان میانگین داده‌های تصادفی انتخاب شده‌اند. مقدار انحراف معیار نیز با توجه به مقادیر حداکثر و حداقل بازشدگی دریچه‌ها تعیین شد. مقادیر تصادفی تنظیم سازه‌ها با توزیع نرمال در مدل مونت کارلو تولید شد که نمونه آن برای سناریوی ۱-۱ شرح داده می‌شود. در این سناریو خطا در تنظیم سازه تنها برای سازه آببند Check7 اتفاق می‌افتد. با توجه به جدول ۳ میزان تنظیم مورد نیاز برای آببند Check7 در گزینه افزایشی معادل ۸۵/۶ سانتی متر بدست آمده است. این مقدار به عنوان متوسط تنظیم سازه و با انحراف معیار ۱۰ درصد، مجموعه‌ای از اعداد تصادفی برای تنظیم سازه تولید شد. مشابه با این مراحل مقادیر تصادفی برای سایر سازه‌ها که دارای خطای تنظیم هستند تولید شد. هریک از مقادیر تولید شده در مدل مونت کارلو در تلفیق خودکار با مدل ICSS شبیه‌سازی شده و خروجی‌های مورد نیاز تولید شده است. مناسبترین توزیع آماری دی‌های تحویلی به آبگیر و شاخص‌های عملکرد با استفاده از نرم‌افزار EasyFit و آزمون نیکویی برازش تعیین و بر اساس آن احتمال تغییرات پارامترهای خروجی تعیین گردید.

### شاخص‌های ارزیابی

برای ارزیابی عملکرد توزیع و تحویل آب، تغییرات دبی تحویلی به آبیگرها، شاخص‌های کفایت (MPA)، راندمان (MPF)، و پایداری تحویل (MPD) ارائه شده توسط Molden and Gates (1990) طبق روابط ۹ تا ۱۱، و برای ارزیابی کنترل سطح آب از شاخص حداکثر خطای مطلق (MAE) و متوسط آن (MAE) روابط ۱۲ و ۱۳ استفاده شده است.

$$MPA = \frac{1}{T} \sum_T \left( \frac{1}{N} \sum_N P_A \right), \quad P_A = \frac{Q_D}{Q_R} \quad \text{IF } Q_D \leq Q_R, \quad \text{Otherwise } P_A = 1 \quad (9)$$

$$MPF = \frac{1}{T} \sum_T \left( \frac{1}{N} \sum_N P_F \right), \quad P_F = \frac{Q_R}{Q_D} \quad \text{IF } Q_R \leq Q_D, \quad P_F = 1 \quad \text{Otherwise} \quad (10)$$

$$MPD = \frac{1}{N} \sum_N CV_T \left( \frac{Q_D}{Q_R} \right) \quad (11)$$

که در آن  $P_A$  شاخص کفایت تحویل آبیگر،  $Q_D$  دبی تحویلی به آبیگر،  $Q_R$  دبی مورد نیاز آبیگر،  $N$  تعداد آبیگرها،  $T$  تعداد گام‌های زمانی محاسبات در دوره تحویل،  $P_F$  شاخص راندمان تحویل آبیگر، و  $CV_T(Q_D/Q_R)$  ضریب تغییرات زمانی  $Q_D/Q_R$  برای گام‌های زمانی در دوره تحویل برای هر آبیگر است.

$$MAE = \frac{\max(|y_{target} - y|)}{y_{target}} \quad (12)$$

$$IAE = \frac{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (|y_{target} - y|)_i}{y_{target}} \quad (13)$$

در این روابط  $y$  عمق آب محاسبه شده در هر گام زمانی،  $y_{target}$  عمق هدف، و  $T$  تعداد گام زمانی محاسبات می‌باشد.

## یافته‌های پژوهش و بحث

مناسبتین توزیع آماری دبی‌های تحویلی به آبیگر و شاخص‌های عملکرد با استفاده از نرم‌افزار EasyFit و آزمون نیکویی برازش تعیین شد و مشخص گردید که شاخص‌های خروجی عموماً با توزیع نرمال و بتا انطباق بهتری داشته‌اند. عدم قطعیت داده‌های خروجی برای سطوح احتمال ۳۸ درصد، ۶۸ درصد، ۸۶ درصد و ۹۵ درصد که در شرایط استاندارد شده توزیع نرمال بترتیب معادل  $Z=0.5$ ،  $Z=1.0$ ،  $Z=1.5$  و  $Z=2.0$  می‌باشند، انجام شده است.

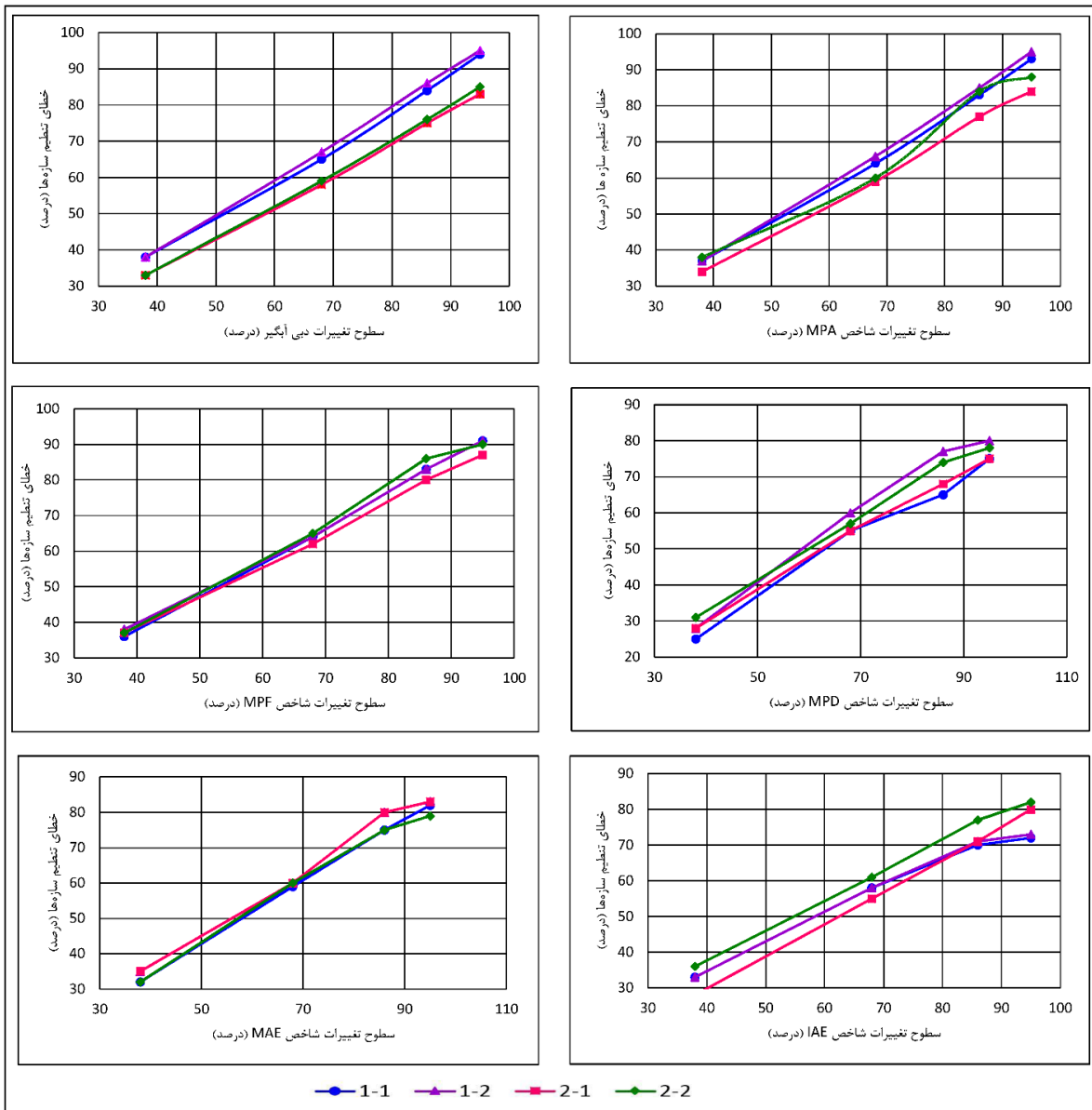
برای محاسبه دامنه عدم قطعیت دبی و شاخص‌ها به ازای مقادیر مشخص خطای تنظیم سازه‌ها، ابتدا برای بازشدگی سازه‌ها در سطوح مختلف، دبی‌ها و شاخص‌های عملکرد استخراج و به صورت نزولی مرتب شده و احتمال تجمعی آنها محاسبه گردید. سپس با توجه به مقدار تنظیم سازه مورد نظر در بازه احتمالاتی مربوط، احتمال مربوط به دبی و یا شاخص عملکرد برای تنظیم سازه در آن دامنه محاسبه شده است. سطوح احتمالاتی پارامترهای خروجی متناظر با سطوح احتمال مختلف خطای تنظیم سازه‌ها در سناریوی‌های مختلف در جدول ۵ و شکل ۶ ارائه شده است. نتایج این جدول و شکل را بعنوان نمونه به این صورت می‌توان بیان داشت که در سناریوی ۱-۱ برای احتمال خطای ۳۸، ۶۸، ۸۶ و ۹۵ درصد تنظیم آب‌بند، درصد احتمال تغییرات دبی به ترتیب ۳۸، ۶۵، ۸۴، و ۹۴ است. با توجه به جدول ۵ و شکل ۶ نتایج زیر به دست می‌آید.

در سناریوی ۱-۱ به ازای سطوح مختلف احتمالاتی خطای تنظیم دریچه آب‌بند، دبی‌های تحویلی به آبیگر بیشترین درصد احتمال تغییرات را دارد. پس از آن شاخص‌های کفایت و راندمان (MPA و MPF) بیشترین سطوح احتمالاتی را دارا هستند و پس از آنها، شاخص‌های کنترل سطح آب (MAE و IAE) در رتبه بعدی قرار داشته‌اند و شاخص پایداری تحویل آب (MPD) آخرین رتبه

را دارد. این نتیجه نشان می‌دهد اگرچه عدم قطعیت بر روی آب‌بند اعمال شده، اما اثر آن بر دبی تحویلی به آبیگر بالادست بیشتر بوده تا بر شاخص‌های تنظیم عمق. بنابراین افزایش دقت در تنظیم دبی تحویلی اهمیت بیشتری دارد.

جدول ۵. درصد احتمال تغییرات دبی و شاخص‌های عملکرد نسبت به احتمال خطای تنظیم سازه‌ها

سطوح احتمالاتی خطای تنظیم سازه‌ها (درصد)				پارامتر	سناریو	سطوح احتمالاتی خطای تنظیم سازه‌ها (درصد)				پارامتر	سناریو
۹۵	۸۶	۶۸	۳۸			۹۵	۸۶	۶۸	۳۸		
۸۳	۷۵	۵۸	۳۳	Q TO7	۲-۱	۹۴	۸۴	۶۵	۳۸	Q TO13	۱-۱
۸۴	۷۷	۵۹	۳۴	MPA		۹۳	۸۳	۶۴	۳۷	MPA	
۸۷	۸۰	۶۲	۳۷	MPF		۹۱	۸۳	۶۴	۳۶	MPF	
۷۵	۶۸	۵۵	۲۸	MPD		۷۵	۶۵	۵۵	۲۵	MPD	
۸۳	۸۰	۶۰	۳۵	MAE		۸۲	۷۵	۵۹	۳۲	MAE	
۸۰	۷۱	۵۵	۲۸	IAE		۷۲	۷۰	۵۸	۳۳	IAE	
۸۵	۷۶	۵۹	۳۳	Q TO16		۹۵	۸۶	۶۷	۳۸	Q TO13	
۸۸	۸۴	۶۰	۳۸	MPA	۹۵	۸۵	۶۶	۳۷	MPA		
۹۰	۸۶	۶۵	۳۷	MPF	۹۱	۸۳	۶۴	۳۸	MPF		
۷۸	۷۴	۵۷	۳۱	MPD	۸۰	۷۷	۶۰	۲۸	MPD		
۷۹	۷۵	۶۰	۳۲	MAE	۸۲	۷۵	۶۰	۳۳	MAE		
۸۲	۷۷	۶۱	۳۶	IAE	۷۳	۷۱	۵۸	۳۳	IAE		



شکل ۶. نمودار سطوح احتمال تغییرات شاخص‌ها در برابر سطوح احتمال خطای تنظیم سازه‌ها در سناریوهای تعریف شده

در سناریوی ۲-۱ به ازای سطوح مختلف احتمالاتی خطای تنظیم دریچه‌های آب‌بند و آبگیر، دبی‌های عبوری از آبگیر بیشترین میزان درصد احتمال تغییرات را دارد و پس از آن شاخص‌های کیفیت و راندمان تحویل (MPA و MPF) بیشترین سطوح احتمالاتی را دارا بوده و پس از آنها، شاخص‌های کنترل سطح آب (MAE و IAE) در رتبه بعدی قرار گرفته‌اند. شاخص پایداری تحویل (MPD) آخرین رتبه را دارد. در مقایسه دو سناریوی افزایشی، درصد احتمال تغییرات مربوط به دبی و شاخص‌های عملکرد تحویل آب در سناریوی ۲-۱ بیشتر از سناریوی ۱-۱ بوده است. زیرا در سناریوی ۲-۱ علاوه بر آب‌بند Check7 آبگیر بالادست آن یعنی TO13 نیز دارای خطا می‌باشد. مقایسه نتایج دو سناریوی افزایشی برای شاخص‌های کنترل سطح آب در محل سازه آب‌بند نشان می‌دهد که تغییرات مربوط به سطوح احتمالاتی این دو سناریو تقریباً برابر بوده است. این امر نشان می‌دهد که اضافه شدن خطای تنظیم سازه آبگیر بالادست، تاثیر چندانی روی درصد احتمال تغییرات شاخص‌های عمق نداشته است. در مجموع در سناریوهای افزایشی

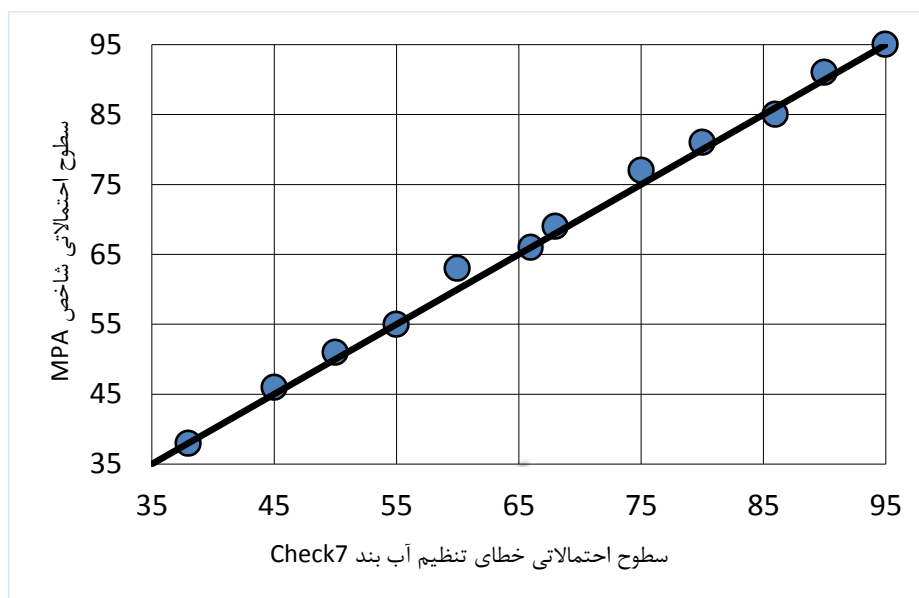
صرفنظر از تعداد و نوع سازه‌های دارای خطا، مقدار دبی تحویلی نسبت به خطای تنظیم سازه‌ها حساس‌تر است تا عمق جریان. بنابراین اگرچه عملیات بهره‌برداری عموماً با تأکید بر کنترل عمق جریان صورت می‌گیرد، اما تغییرات دبی تحویلی ناشی از خطای تنظیم سازه‌ها بیشتر بوده و تنظیم دبی باید با دقت بیشتر صورت گیرد. در این دو سناریو ترتیب شاخص‌ها از نظر درصد احتمال تغییرات، یکسان باقی مانده است. به عبارت دیگر خطای تنظیم سازه آبیگر علاوه بر سازه آب‌بند، تأثیر چندانی روی تغییر رفتار و عکس‌العمل جریان نداشته است.

در سناریو ۱-۲ به ازای سطوح مختلف احتمالاتی خطای تنظیم آب‌بندها، شاخص راندمان تحویل (MPF) دارای بالاترین درصد احتمال تغییرات بوده و پس از آن شاخص کفایت (MPA) قرار دارد. سپس خطای حداکثر مطلق (MAE) و دبی عبوری از آبیگر TO7 در جایگاه بعدی قرار داشته و شاخص‌های IAE و MPD به ترتیب در مرتبه‌های آخر قرار گرفته و کمترین درصد احتمال تغییرات را دارند.

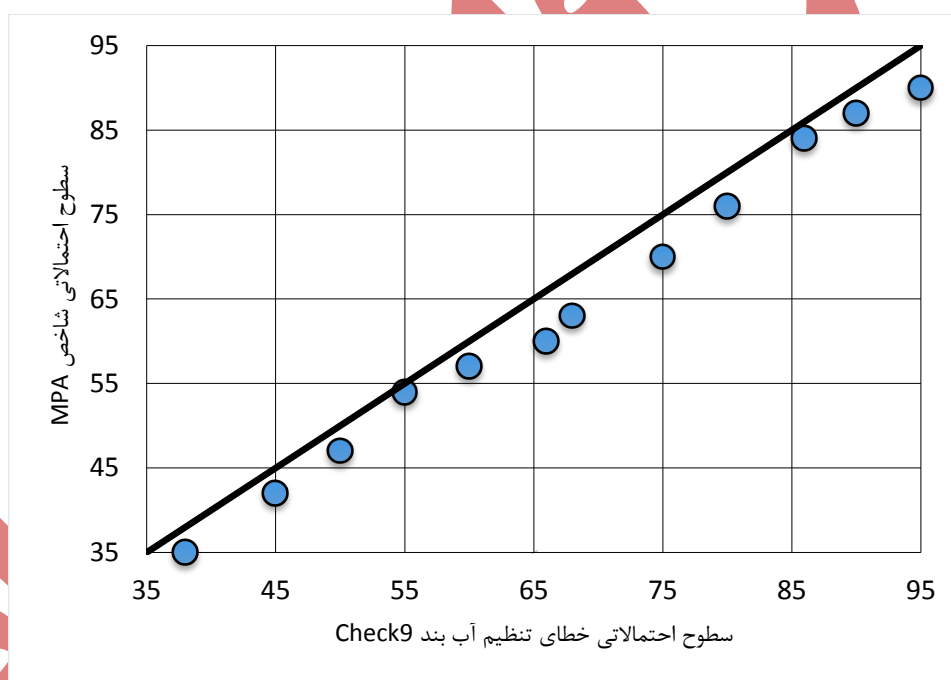
در سناریو ۲-۲ به ازای سطوح مختلف احتمالاتی خطای تنظیم آب‌بندها و آبیگر، شاخص راندمان (MPF) دارای بالاترین درصد احتمال تغییرات بوده و پس از آن شاخص کفایت (MPA) قرار دارد. شاخص IAE بعد از دو شاخص مذکور در جایگاه بعدی قرار داشته و پس از آن دبی عبوری از آبیگر TO7 و شاخص‌های MAE و MPD در مرتبه آخر قرار گرفته و کمترین درصد احتمال تغییرات را دارند.

در مقایسه دو سناریوی کاهش سطوح درصد احتمال تغییرات مربوط به دبی و عموم شاخص‌ها در سناریوی ۲-۲ بیشتر از سناریوی ۱-۲ بوده است که ناشی از افزایش تعداد سازه‌هایی است که در معرض خطا قرار گرفته‌اند. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سازه‌هایی که دچار خطا هستند میزان عدم قطعیت شاخص‌های خروجی افزایش یافته است. بنابراین در صورت افزایش تعداد سازه‌های کنترل و تنظیم باید دقت بیشتری در تنظیم سازه‌ها صورت گیرد. در هر دو سناریو کاهش، راندمان و کفایت تحویل بالاترین و پایداری تحویل کمترین درصد احتمال تغییرات را نسبت به خطای تنظیم سازه‌ها داشته‌اند. به عبارت دیگر راندمان و کفایت تحویل حساس‌ترین شاخص در برابر خطای تنظیم سازه‌ها بوده و پایداری تحویل کمترین حساسیت را نشان داده است. افزایش تعداد سازه‌های دارای خطا در سناریوی کاهش، تأثیر چندانی بر تغییر رفتار و عکس‌العمل جریان، و ترتیب عدم قطعیت شاخص‌ها نداشته است.

در مقایسه سناریوهای مربوط به گزینه افزایش و کاهش ملاحظه می‌شود که ترتیب حساسیت شاخص‌های خروجی نسبت به خطای تنظیم سازه‌ها متفاوت است. این امر نشانگر رفتار و عکس‌العمل متفاوت جریان افزایشی و کاهشی نسبت به خطای تنظیم سازه‌ها است. دبی‌های تحویلی به آبیگر مربوط به سناریوی ۱-۲ در گزینه افزایشی بالاترین درصد احتمال تغییرات را دارد. سایر شاخص‌های عملکرد تحویل آب شامل شاخص کفایت، راندمان و پایداری نیز در سناریو ۱-۲ عموماً نسبت به سایر سناریوها بالاتر هستند. بنابراین در گزینه افزایشی تأثیر خطاهای بهره‌برداری سازه‌ها بر دبی تحویلی و شاخص‌های عملکرد تحویل آب بیشتر از گزینه‌های کاهش بوده و عدم قطعیت در این حالت بیشتر می‌باشد. از طرفی بالاترین شاخص حداکثر خطای مطلق (MAE) مربوط به سناریوی ۱-۲ و بالاترین شاخص متوسط خطای مطلق (IAE) در سناریوی ۲-۲ بدست آمده است که نشان می‌دهد در گزینه کاهش در مقایسه با گزینه افزایشی، شاخص‌های کنترل عمق نسبت به خطای تنظیم سازه‌ها حساس‌تر هستند. بنابراین در گزینه‌های افزایشی دقت نظر در دبی تحویلی، و در گزینه‌های کاهش دقت نظر در تنظیم عمق اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در شکل‌های ۷ و ۸ نمونه‌ای از نمودار تغییرات سطوح احتمالاتی برای شاخص MPA در دو گزینه افزایشی و کاهش و برای دو سناریوی ۱-۱ و ۲-۲ در مقابل تغییرات سطوح احتمالاتی خطای تنظیم آب‌بند نشان داده شده است.



شکل ۷: تغییرات سطوح احتمالاتی شاخص کفایت با خطای تنظیم آب بند Check7 در سناریوی ۱-۱



شکل ۸: تغییرات سطوح احتمالاتی شاخص کفایت با خطای تنظیم آب بند Check9 در سناریوی ۲-۲

با بررسی نمودارها ملاحظه می‌شود به ازای سطوح مشخصی از احتمال خطا در تنظیم دریچه آب‌بند در گزینه افزایشی (سناریوی ۱-۱) درصد احتمال تغییرات شاخص کفایت نزدیک به مقادیر مربوط به سطوح متناظر تنظیم سازه‌ها می‌باشد. اما در گزینه کاهش (سناریوی ۲-۲) درصد احتمال تغییرات شاخص کفایت تحویل کمتر از درصد احتمال تغییرات مربوط به تنظیم سازه‌ها بوده و دارای عدم قطعیت کمتری می‌باشند. به عنوان مثال برای احتمال خطای ۶۵ درصد تنظیم آب‌بند، احتمال خطای شاخص کفایت در گزینه افزایشی برابر ۶۵ درصد است، ولی در گزینه کاهش کاهشی کمتر از ۶۵ درصد خواهد بود. مشابه این روند برای دبی تحویلی و سایر شاخص‌های تحویل آب نیز مشاهده شد. این امر نشان می‌دهد که شاخص‌های تحویل آب در سناریوهای افزایشی در مقایسه با

سناریوهای کاهشی در برابر خطای تنظیم سازه‌ها حساس‌تر هستند. بنابراین افزایش دقت تنظیم سازه‌ها در گزینه‌های افزایشی اهمیت بیشتری دارد.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای تغییرات درخواست آب و دبی ورودی به کانال گزینه‌های افزایشی و کاهشی در نظر گرفته شد و عدم قطعیت تنظیم سازه‌ها بر روی تعداد سازه‌های متفاوت اعمال گردید و در مجموع چهار سناریو در نظر گرفته شد. درصد احتمال تغییرات شاخص‌ها، برای درصد معین احتمال خطای ورودی‌ها به عنوان معیارهای عدم قطعیت، محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل شد و نتایج کلی به شرح زیر به دست آمد.

با افزایش تعداد سازه‌هایی که در معرض عدم قطعیت هستند عدم قطعیت شاخص‌های خروجی افزایش می‌یابد. بنابراین برای کانال‌هایی که سازه‌های کنترل و تنظیم بیشتری دارند باید دقت بیشتری در تنظیم سازه‌ها اعمال شود.

ترتیب حساسیت شاخص‌های خروجی در گزینه‌های افزایشی مشابه بوده و از بیشترین به کمترین حساسیت عبارتند از شاخص‌های دبی تحویلی، کفایت و راندمان تحویل، شاخص‌های کنترل عمق و پایداری تحویل. بنابراین افزایش تعداد سازه‌های دچار خطا، تاثیری چندانی روی تغییر عکس‌العمل جریان و ترتیب حساسیت شاخص‌ها نداشته. همچنین مشخص می‌شود که در گزینه‌های افزایشی دقت نظر در تنظیم دبی تحویلی تاثیر بیشتری نسبت به تنظیم عمق دارد.

ترتیب حساسیت شاخص‌های خروجی در گزینه‌های کاهشی متفاوت از گزینه افزایشی است که نشان دهنده تاثیر تفاوت رفتار دو جریان در مقابل خطای تنظیم سازه‌ها است. ترتیب حساسیت شاخص‌ها از بیشترین به کمترین حساسیت عبارتند از شاخص‌های راندمان و کفایت تحویل، شاخص‌های عمق، دبی تحویلی و پایداری تحویل. این ترتیب، نشان می‌دهد که در گزینه‌های کاهشی دقت نظر در تنظیم عمق تاثیر بیشتری نسبت به تنظیم دبی تحویلی دارد.

در مجموع شاخص‌های خروجی در گزینه‌های افزایشی حساسیت بیشتری در مقایسه با گزینه‌های کاهشی نسبت به خطای تنظیم سازه‌ها داشته‌اند. این موضوع صرفنظر از روش تحویل نیز صادق است، اما برای روش توافقی که تغییرات بیشتری دارد اهمیت بالاتری پیدا می‌کند. بنابراین دقت نظر در تنظیم سازه‌ها در گزینه‌های افزایشی، تاثیر بیشتری نسبت به گزینه‌های کاهشی دارد.

## منابع

- آقایی، زینب (۱۳۹۸). تحلیل عدم قطعیت در بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری ثقلی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، به راهنمایی حسام قدوسی. زنجان: دانشگاه زنجان، دانشکده کشاورزی.
- خورشیدی، علی (۱۴۰۱). ارزیابی روش توزیع بر حسب درخواست در شبکه‌های آبیاری با در نظر گرفتن عدم قطعیت بهره‌برداری با استفاده از مدل هیدرودینامیک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، به راهنمایی محمد جواد منعم. تهران: دانشگاه تربیت مدرس، گروه مهندسی و مدیریت آب.
- خورشیدی، علی؛ منعم، محمد جواد و مظاهری، مهدی (۱۸ و ۱۹ بهمن ۱۴۰۱). ارزیابی روش توزیع بر حسب درخواست در شبکه‌های آبیاری با در نظر گرفتن عدم قطعیت بهره‌برداری با استفاده از مدل هیدرودینامیک (مطالعه موردی: کانال عقیلی شرقی)، بیست و یکمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.
- ساوری، هاجر و منعم، محمد جواد (۱۴۰۰). تحلیل و دسته‌بندی روش‌های تحویل و توزیع آب بر حسب درخواست در شبکه‌های آبیاری، مجله مدیریت آب و آبیاری، ۱۱ (۲)، ۱۴۵-۱۵۸.



شاهوردی، کاظم؛ منعم، محمد جواد و نیلی، مجید (۱۳۹۴). کاربرد روش یادگیری تقویتی برای تعیین دستورالعمل بهره‌برداری برحسب درخواست برای توزیع و تحویل بهینه آب، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران* ۴۶ (۲)، ۲۹۱-۲۸۳.

محسنی موحد، سید اسدالله و منعم، محمد جواد (۱۳۸۶). معرفی یک مدل ریاضی جدید برای ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد کانال‌های آبیاری، *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۱ (۲)، ۱۳-۲۶.

نقایی، ریحانه و منعم، محمد جواد (۲۲-۲۳ آبان ۱۳۹۸). *دسته‌بندی انعطاف‌پذیری‌های روش تحویل آب برحسب درخواست بر اساس عوامل اصلی تحویل و سیاست‌های مدیران شبکه‌های آبیاری*، اولین کنگره بین‌المللی و چهارمین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

هادی‌سراجی، گلبرگ؛ ساوری، هاجر و منعم، محمد جواد (۵ و ۶ آبان ۱۴۰۰). *ارزیابی انعطاف‌پذیری تحویل و توزیع برحسب درخواست از نظر هیدرولیکی در شبکه‌های آبیاری با مدل هیدروینامیک ICSS*. بیستمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

هادی‌سراجی، گلبرگ؛ منعم، محمد جواد و ساوری، هاجر (۱۴۰۱). *ارزیابی هیدرولیکی انعطاف‌پذیری در بهره‌برداری با روش تحویل برحسب درخواست در شبکه‌های آبیاری، نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۴ (۱۶)، ۶۸۵-۶۹۶.

Agaei, Z. (2019). *Uncertainty Analysis of Operation of Gravity Irrigation Networks*, Master of Science Theses, Zanjan University, Zanjan Iran. (In Persian).

Amein, M. (1968). An Implicit Method for Numerical Flood Routing, *Water Resources Research*. 4(4), 719-726.

Anwar, A. A., D. Clarke, and T. T. de Vries. (2006). Channel capacity under arranged demand irrigation. *Journal of Agricultural Water Management*. 82(1-2), 148-160. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.05.007>.

Gates, T. K., Alsheikh, A. A., Ahmad, S. I., & Molden, D. G. (1992). Optimal Irrigation Delivery System Design Under Uncertainty, *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*. 118(3), 433-449.

Gates, T. K., & Alsheikh, A. A. (1993). Stochastic Design of Hydraulic Structures in Irrigation Canal Networks, *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*. 119(2), 346-363.

Hadiseraji, G., Monem, M. J., & Savari, H. (2022). Hydraulic Evaluation of the Operational Flexibility of On-Request Delivery Method in Irrigation Networks. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 4(16)685-696. (In Persian)

Hadiseraji, G., Savari, H., & Monem, M. J. (2021 October 27-28). *Evaluation of the Flexibility of On-Request Delivery Method from Hydraulic Point of View in Irrigation Canals Using ICSS Hydrodynamic Model*, 20<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference, Gorgan Agricultural and Natural Resources University, Gorgan, Iran. (In Persian)

Henderson, F.M. (1966). *Open Channel flow*, Macmillan Publishing Company, New York.

Korshidi, A. (2022). *Evaluation of On-Request Delivery Method in Irrigation Canals Considering Operational Uncertainty Using Hydrodynamic Model*, Master of Science Theses, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian)

Korshidi, A. Monem, M. J., & Mazaheri, M. (2022 February 7-8). *Evaluation of On-Request Delivery Method in Irrigation Networks Considering Operational Uncertainty Using Hydrodynamic Model (Case study: Eastern Aghili Canal)*, 21<sup>st</sup> Iranian Hydraulic Conference, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (In Persian)

Li, J., Song, J., Li, M., Shang, S., Mao, X., Yang, J., & Adeloje, A. J. (2018). Optimization of irrigation scheduling for spring wheat based on simulation-optimization model under uncertainty. *Journal of Agricultural Water Management*. 208, 245-260.

- Manz, D., & Schaalje, M. (1992 October 26-30). *Development and application of the irrigation conveyance system simulation model*. CEMAGREF-IIMI International Workshop on the Application of mathematical modeling for Improvement of Irrigation Canal Operation. Montpellier, France.
- Mohseni movahed, S. A., Monem, M. J. (2007). Introducing a New Mathematical Model for Performance Evaluation and Optimization of Irrigation Canals. *Journal of Science & Technology of Agriculture & Natural Resources*. 11 (2), 13-26. (in Persian)
- Molden, D. J., Gates, T. K., & Sunada, D. K. (1989). *Designing hydraulic structures for water control in irrigation water delivery systems*. Proceedings. 2<sup>nd</sup> International. Symposium. On Design of Hydraulic Structures, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.
- Molden, D. J., & Gates, T. K. (1990). Performance measures for evaluation of irrigation water delivery systems. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*. 116(6), 804-823.
- Monserrat, J., Poch, R., Colomer, M. A., & Mora, F. (2004). Analysis of Clement's First Formula Irrigation Distribution Networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 130(2), 1-17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2004\)130:2\(99\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:2(99)).
- Monserrat, J. Naghaee, R. Cots, & Monem, M. J. (2021). Application of Clément's First Formula to an Arranged-Schedule Secondary Canal. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 147(2), 06020016-1-7. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001531](http://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001531).
- Naghaee, R., & Monem, M. J. (2019 September 1-7). *Sensitivity Analysis of Irrigation Canal Capacity*. 3<sup>rd</sup> World Irrigation Forum (WIF3), Bali, Indonesia.
- Naghaee, R., & Monem, M. J. (2019 November 22-23). *Classification of the Flexibility of On-Request Delivery Methods Considering the Main Delivery Parameters and Irrigation Network Managerial Policies*, 1<sup>st</sup> International and 4<sup>th</sup> National Iranian Irrigation and Drainage Congress, Uremia University, Uremia, Iran. (In Persian)
- Ostovari, S., & Monem, M. J. (2022). Management and Performance Improvement of Irrigation Canals in Water Scarce Conditions Considering Hydraulic Drawbacks (Case study: Eastern Aghili secondary canal), *Journal of Irrigation and Drainage*. 71(5), 1294-1303. <https://doi.org/10.1002/ird.2744>.
- Savari, H., Monem, M. J., & Shahverdi, K. (2016). Comparing the Performance of FSL and Traditional Operation Methods for On-Request Water Delivery in Aghili Network, Iran. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*. 142(11), 1-8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001089](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001089).
- Savari, H., and Monem, M. J. (2021). Analysis and Classification of On-Request Water Delivery Methods in Irrigation Canals. *Journal of Water and Irrigation Management*. 11(2), 145-158. (In Persian)
- Savari, H., & Monem, M. J. (2022). Optimal Operational Instructions for On-request Delivery Using Hybrid Genetic Algorithm and Artificial Neural Network, Considering Unsteady Flow. *Journal of Irrigation and Drainage*, 71(1) 1-14. <https://doi.org/10.1002/ird.2670>.
- Shahverdi, K. & Monem, M. J. (2022). Irrigation Canal Control using Enhanced Fuzzy SARSA Learning. *Journal of Irrigation and Drainage*. 71(1), 1-10. <https://doi.org/10.1002/ird.2684>.
- Shahverdi, K., Monem, M. J., & Nili, M. (2015). Application of Reinforcement Learning Method for extracting Operational Instruction of On-Request method for Optimal Water Distribution and Delivery. *Journal of Iranian Water and Soil Research*. 46(2), 238-291. (In Persian)

## **Investigation of the Effect of Operational Errors on the Performance Uncertainty of Irrigation Networks in Arranged Delivery**

### **EXTENDED ABSTRACT**

#### **Introduction:**

To improve the water productivity in irrigation canals application of more flexible water delivery is suggested by many researchers. To this end substitution of arranged delivery methods for rotational delivery is recommended. In the arranged delivery system the spatial and temporal variations of numerous requests increase the operation complexity. Such complexity increases the probability of structural adjustment errors and operational uncertainty. This might adversely affect the performance improvement of irrigation canals. Therefore in arranged delivery, the impact of operational errors on the performance uncertainty of irrigation canals should be investigated.

#### **Objective:**

The objective of this research is to consider the operational errors of control structures including check structures and turnouts and analyze their impact on the performance uncertainty of the canal.

### **Materials and methods:**

In this research, the Monte Carlo simulation method is used to assess the uncertainty. The steps followed in this research are, determining the variables, creating random numbers for structures' adjustment, defining and simulating the scenarios, and evaluating the results. For this purpose, in one canal of the Aghili irrigation network in the province of Khoozestan in Iran, two increasing and decreasing request scenarios are defined. In each scenario, operational errors of different selected structures are defined. The options include the application of errors on one check structure, a combination of one check structure and one outlet, and multiple structures. Using the Monte Carlo simulation method for different scenarios, random numbers for adjustment of the selected structures were generated for each option and simulated using the ICSS hydrodynamic model. The analyzed outputs are delivery flow rate, delivery adequacy, efficiency, stability, and parameters of water depth control errors. The probability density functions of the outputs are determined and their uncertainty level associated with different levels of structure adjustment errors are calculated. The uncertainty of outputs is calculated for the operational errors of 38 to 95 %.

### **Results and discussion:**

A summary of the most important results could be stated as follows. Output indicators mostly fit with Beta and Normal probability distribution functions. The obtained uncertainty band of flow delivery for the increasing scenario is 38 to 95%, and for the decreasing scenario is 33 to 85%. The uncertainty range of the outputs for increasing scenarios is more than that for decreasing scenarios. By increasing the number of structures that encounter operational error, the uncertainty of almost all outputs has increased. The highest increment of 12% was seen in the stability index for the increasing scenario and an 8% uncertainty band increase in the depth index for the decreasing scenario. For increasing scenarios, delivery discharge with an uncertainty band of 38 to 95% is the most sensitive parameter. For decreasing scenarios, the depth control parameter with an uncertainty band of 36 to 82% is more sensitive compared to delivery flow.

### **Conclusion:**

The results indicated that by increasing the number of structures that operate with error, the uncertainty of all output indicators will be increased. Therefore, for irrigation canals with a higher number of control structures, a more accurate operation should be applied. The uncertainty of the output indicators for increasing scenarios is higher than that of decreasing scenarios, which reflects different hydraulic behaviors and responses to operational errors. So accurate operation for increasing scenarios is more important than the decreasing ones. For increasing scenarios, delivered discharge and delivery adequacy and efficiency are the most sensitive parameters to operational errors. For decreasing scenarios, depth control parameters, are more sensitive compared to delivery discharge. Therefore, for increasing scenarios the delivery discharge, and for decreasing scenarios, the water depth are more important parameters to be controlled.

*Keywords: Arranged Delivery, Irrigation Networks, Monte Carlo Method, Operational errors, Structural Operation, Uncertainty.*