DOI: 10.22059/ijswr.2021.314854.668823 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۲، شماره ۳، خرداد ۱۴۰۰ (ص ۶۹۳-۷۰۶)

Development of Hybrid Bayesian Network Model for Multi-Hazards Risk Assessment of Irrigation Network

ATIYEH BOZORGI[1], ABBAS ROOZBAHANI[1*], MEHDY HASHEMY SHAHDANY[1]
1. Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
(Received: Dec. 12, 2020- Revised: Jan. 8, 2021- Accepted: Feb. 13, 2021)

ABSTRACT

Since the majority of water resources is used for agricultural purposes, irrigation and drainage networks become important. Moreover, these networks are threatened by various natural and unnatural hazards that each one can affect the performance of the network. This research seeks to develop a risk analysis model of agricultural water distribution systems with the help of hybrid Bayesian networks. The proposed hybrid Bayesian model evaluates the risk of agricultural water distribution system and its components with the following inputs: inflow of water distribution system and its fluctuation, and the demand of water. The hazards which threat the system are identified and the model nodes are determined according to these risks and the system components. This model was investigated on the distribution of Roodasht irrigation network located in Isfahan, which is under the threat of improper performance of the ditch-riders and operational losses. The average risk value of the distribution system was 14.8% and the risk of components was calculated in the range of 0.01-49.2%. The hybrid Bayesian network model shows a good accuracy and performance in training and test sets with root mean square error of 0.07% and 0.08%, and coefficient of determination of 0.65 and 0.63, respectively. The proposed model helps operators and decision-makers to be aware of the causes and potential failures of the system's components. This can lead to better planning for the allocation of irrigation water based on the anticipated risks in the occurrence of various hazards.

Keywords: Risk Assessment, Agricultural Water System, Improper Performance of the Ditch-Riders, Operational Losses, Roodasht Irrigation Network.

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

توسعه مدل شبکه بیزین هیبرید برای ارزیابی ریسک چند خطری شبکه‌های آبیاری

عطیه بزرگی[۱]، عباس روزبهانی[۱*]، سید مهدی هاشمی شاهدانی[۱]

۱. گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۲- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۱۹- تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵)

چکیده

از آن‌جاییکه سهم عمده‌ای از منابع آب برای مصارف کشاورزی استفاده می‌شود لذا شبکه‌های آبیاری و زهکشی اهمیت پیدا می‌کند. همچنین این شبکه‌ها تحت تهدید خطرات مختلف طبیعی و غیر طبیعی هستند که هرکدام از آن‌ها می‌توانند عملکرد شبکه را تحت تاثیر قرار دهد. این تحقیق به دنبال توسعه مدل تحلیل ریسک سامانه توزیع آب کشاورزی با کمک شبکه‌های بیزین هیبرید است. ساختار مدل بیزین هیبرید مقدار ریسک سامانه توزیع آب کشاورزی را با استفاده از اطلاعات آب ورودی به سامانه توزیع آب سطحی، تقاضای شبکه آبیاری و الگوی نوسان بخش بالادست شبکه به تفکیک جزءهای سامانه توزیع ارزیابی می‌کند. خطرات تهدید کننده سامانه مشخص شده و گره‌های مدل باتوجه به این خطرات و اجزای سامانه تعیین می‌شود. این مدل بر روی توزیع شبکه آبیاری رودشت واقع در اصفهان مورد بررسی قرار گرفت که تحت تهدید خطرات عملکرد نادرست اپراتور و تلفات بهره‌برداری است. مقادیر ریسک قسمت توزیع سامانه به طور میانگین به ترتیب برابر با ۱۴/۸ درصد و ریسک جزءها در بازه ۰/۰۱ تا ۴۹/۲ درصد محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل شبکه بیزین هیبرید ارزیابی ریسک سامانه توزیع آب کشاورزی، در دو بخش آموزش و آزمایش به ترتیب با مقدار جذر میانگین مربعات خطا ۰/۰۷ و ۰/۰۸ درصد و ضریب تبیین ۰/۶۵ و ۰/۶۳ دارای دقت و عملکرد مناسبی است. نتایج این تحقیق و مدل ارایه شده به بهره‌برداران و تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا عوامل و میزان احتمالی شکست اجزای سامانه،اطلاع پیدا کنند و برنامه‌ریزی بهتری برای تخصیص آب آبیاری بر اساس ریسک‌های پیش‌بینی شده در شرایط وقوع خطرات مختلف تدوین نمایند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل ریسک، سامانه آب کشاورزی، عملکرد نامناسب اپراتور، تلفات بهره‌برداری، شبکه آبیاری رودشت.

مقدمه

بخش کشاورزی بزرگترین مصرف کننده آب و یکی از تأثیرگذارترین فعالیت‌ها در اقتصاد است. بنابراین تصمیم‌گیران و بهره‌برداران شبکه لازم است بیش از پیش از شرایط حاکم بر شبکه آبیاری اطلاع پیدا کنند. خطرات تهدید کننده سامانه توزیع آب کشاورزی می‌توانند عواقب سوئی بر سامانه داشته باشند. لذا با استفاده از روش‌های تحلیل ریسک این عواقب را می‌توان شناسایی کرد. برآورد ریسک به‌وسیله شناسایی رویدادهای نامطلوب، احتمال وقوع رویدادهای ناخواسته و اثر این رویدادها است. محققان زیادی از جمله Lee *et al.*, 2009; Roozbahani *et al.*, 2013; Orojloo *et al.*, 2018 انواع مدل‌های ارزیابی ریسک در سامانه‌های منابع آبی را بررسی کردند.

Babaei *et al.*, (2018) یک چارچوب جهت ارزیابی کفایت، عدالت و راندمان در سیستم توزیع و تحویل آب کشاورزی با استفاده از روش تحلیل درخت خطای فازی[۱] (FFTA) ارائه کردند. نتایج مطالعه نشان داد که احتمال شکست در رویکرد فازی بیشتر از روش غیرفازی است. همچنین، رتبه¬بندی رویدادهای پایه براساس سهم آنها در وقوع رویداد راس انجام شد. Orojloo *et al.*, (2018) یک روش سلسله مراتبی فازی بمنظور چارچوب مدیریت ریسک جامع برای سامانه انتقال و توزیع آب کشاورزی را توسعه دادند بر اساس نتایج ارزیابی ریسک و مهم¬ترین خطرات، شش گزینه مدیریت ریسک پیش¬بینی شد. این سناریوها با استفاده از دو روش تصمیم¬گیری چند معیاره اولویت¬بندی شدند. Zhang *et al.*, (2019) بر اساس فرآیند سلسله مراتبی تحلیلی و منطق فازی، سیستم شاخص سنجش ریسک زیست محیطی حوضه رودخانه‌ای در چین را ارائه کردند. نتایج نشان داد که سطح ریسک جامع حوضه این رودخانه در سطح متوسط است و فشار انتشار آلاینده‌ها نسبتاً زیاد است. Wang *et al.*, (2020) یک مدل برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب مبنی بر ریسک برای بهینه‌سازی مصرف آب در حوضه رودخانه

* نویسنده مسئول: roozbahany@ut.ac.ir

1 Fuzzy Fault Tree Analysis Method

Heihe چین ارائه کردند. نتایج نشان داد سطح ریسک با افزایش کمبود آب بالاتر رفته. همچنین سود اقتصادی تحت تاثیر ترکیبی از پارامترهای ریسک است. Imran *et al*., (2020) روشی برای ارزیابی ریسک انسانی مرتبط با نمونه گیری سیستم توزیع آب در حیدرآباد، پاکستان برای تعیین مناطقی که نیاز به توانبخشی زیرساخت‌ها دارند، انجام دادند. نتایج نشان داد ریسک درمعرض فلزات و متالوئید موجود در آب آشامیدنی غیر قابل قبول است. Liu *et al*. (2020) یک مدل ارزیابی ریسک سلسله مراتبی بر اساس منطق فازی و تئوری بازی برای ارزیابی کمیت، سیستم‌های توزیع و ذخیره سازی در مناطق دور افتاده را توسعه دادند. نتایج نشان داد ترکیب سیستم آب باران و آب سطحی در خشک ترین سال دارای ریسک متوسط و سامانه توزیع حساس¬ترین مورد به شکست است. Abedzadeh *et al*., (2020) برای اولین بار از روش FFTA به‌منظور ارزیابی ریسک برنامه‌های توسعه منابع آب در چارچوب توسعه پایدار استفاده کرده است. نتایج ارزیابی ریسک با استفاده از دو روش عددی و فازی انجام شد و رویدادهای پایه بر اساس سهم آنها در وقوع رویداد رأس رتبه‌بندی شدند. همانطور که اشاره شد روش‌های متنوعی جهت ارزیابی ریسک وجود دارد ازآنجایی که این پژوهش بدنبال توسعه استفاده از روش بیزین در ارزیابی ریسک می‌باشد لذا در ادامه به پیشینه استفاده از این روش پرداخته می‌شود.

از آن‌جاییکه شبکه‌های بیزین یک مدل گرافی-احتمالی است که برای مدلسازی پدیده‌ها و سیستم‌های مختلف کاربرد دارند. در این راستا مطالعاتی در راستای استفاده از این ابزار به منظور پیش‌بینی و تحلیل ریسک در سامانه‌های مختلف استفاده شده است (Noorbeh *et al*., 2020; Yeo *et al*., 2016; Abbassi *et al*., 2016). Anbari *et al*., (2017) مدل شبکه بیزین برای محاسبه احتمال رویداد شکست شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهر تهران ارائه کردند. Baksh *et al*., (2018) از شبکه بیزین به عنوان مدل ریسک برای بررسی احتمال بروز حوادث دریایی استفاده کردند. Wijesiri *et al*., (2018) با استفاده از شبکه های بیزی مدلسازی کیفیت آب شهری را به منظور بررسی بهتر عوامل مؤثر بر سلامت انسان انجام دادند. Malekmohammadi and Moghadam (2018) مدل جدیدی از ارزیابی ریسک محیطی با استفاده از BN برای سد گابریک در ایران بررسی کردند. نتایج نشان داد این مدل ریسک قایل قبولی در ارائه راه حل‌های مناسب برای کاهش ریسک زیست محیطی ارائه می‌دهد و به عنوان یک سامانه پشتیبانی قابل استفاده است. Liu *et al*. (2019) در مطالعه‌ای از یک مدل شبیه‌سازی پویا مبنی بر شبکه بیزین برای ارزیابی ریسک آلودگی نهایی آب حوضه آبریز استفاده کردند. Orak, (2020) به منظور ارزیابی ریسک شبکه در معرض آلودگی آرسنیک شبکه بیزین هیبرید[1] (HBN) را توسعه دادند. همچنین Bozorogi *et al*.(2020), برای نخستین بار مدل HBN را برای تحلیل ریسک خشکسالی در سامانه‌های تامین آب کشاورزی ارائه دادند.

بکارگیری روش‌ها و مدل‌های تحلیل ریسک بیشتر با تمرکز بر سامانه های توزیع آب شهری، تصفیه‌خانه‌ها، سامانه‌های جمع-آوری فاضلاب شهری بوده است. اما با این حال به تحلیل ریسک سامانه‌های کشاورزی کمتر پرداخته شده است (Zamani *et al*., 2017; Babaei *et al*., 2018; Orojloo *et al*., 2018). همچنین از مدل‌های هیبرید بیزین برای محاسبه ریسک سامانه توزیع آب کشاورزی استفاده نشده است. این پژوهش برای اولین بار اقدام به توسعه مدل تحلیل ریسک چندخطری سامانه‌های توزیع آب کشاورزی با استفاده از مدل شبکه بیزین هیبرید نموده است که نقش انکارناپذیری در توسعه پایدار بخش کشاورزی ایفا می‌نماید.

بخش کشاورزی بزرگترین مصرف کننده آب و یکی از تأثیرگذارترین فعالیت‌ها در اقتصاد است. بنابراین تصمیم‌گیران و بهره‌برداران شبکه لازم است بیش از پیش از شرایط حاکم بر شبکه آبیاری اطلاع پیداکنند. هدف از این تحقیق شفاف‌سازی ریسک سامانه‌های توزیع آب کشاورزی در شرایطی است که چندین خطر به صورت همزمان اجزای مختلف سامانه را تهدید کنند. برای این منظور اجزای سامانه و چگونگی ارتباط آنها بایکدیگر مشخص شده سپس ریسک سامانه باتوجه به خطرات تهدید کننده آن تعیین می‌شود. در این تحقیق برای نخستین بار از مدلسازی با روش شبکه بیزین هیبرید در ارزیابی ریسک شبکه-های آبیاری استفاده شده است. توانایی مدل توسعه داده شده بر روی سامانه توزیع آب شبکه آبیاری رودشت شمالی، واقع در استان اصفهان، انجام شده است. چگونگی ارزیابی ریسک سامانه باتوجه به خطرات تهدید کننده آن و مدلسازی شبکه بیزین هیبرید وتحلیل نتایج در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

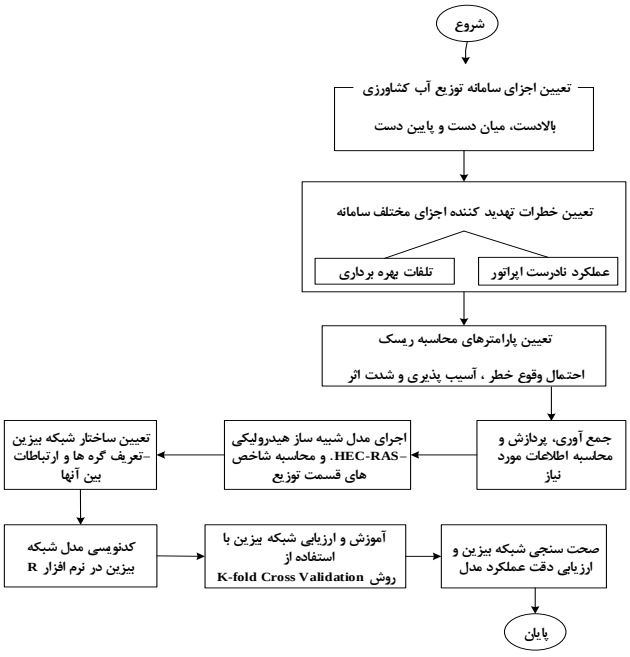
مدل تحلیل ریسک چند خطری[2]

در تحقیق حاضر، به‌منظور ارائه ساختار تحلیل ریسک شبکه‌های آبیاری از روش شبکه بیزین هیبرید استفاده شده است. روند توسعه ساختار تحلیل ریسک مذکور در روندنمای شکل (۱) نشان

1 Hybrid Bayesian Network

2 Multi Hazards Risk Assessment Model

داده شده است. مرحله اول شناسایی اجزای سامانه توزیع با توجه به منطقه مطالعاتی است. سامانه توزیع آب شامل شبکه‌ای از کانال‌های روزباز، مجاری کم فشار و گاها تحت فشار است که آب را تا محل مزرعه می‌رسانند. با توجه به پراکندگی و مسیر طولانی سامانه توزیع آب سطحی لازم است این سامانه به زیر جزهای بالادست، میان دست و پایین دست تقسیم شود تا ارزیابی واقع-بینانه و موثرتری از عملکرد هر جزء و نهایتا کل سامانه به عمل آید میزان تقاضای آب کشاورزی نیز تابعی از الگوی کشت و وسعت اراضی فاریاب در منطقه است. بعد از شناسایی سامانه در گام بعد ریسک سامانه باتوجه به پارامترهای آن محاسبه می‌شود که در بخش‌های بعدی روند محاسبه به تفصیل ارایه شده است. در گام بعدی خطراتی که سامانه را تهدید می‌کنند مشخص می-شود و مقدار ریسک به کمک سه عامل احتمال وقوع خطر[۱]، آسیب‌پذیری[۲] سامانه و پیامد[۳] محاسبه می‌شود. هر کدام از این عوامل با استفاده از شاخص‌هایی باتوجه به مفهوم آن تعیین می-شود. بعد از تعیین پارامترهای مختلف محاسبه ریسک و آماده-سازی بانک اطلاعات، مدل‌سازی به‌کمک HBN انجام می‌شود.



شکل ۱- روندنمای مدل‌سازی ریسک چند خطری سامانه توزیع شبکه آب کشاورزی

اگر گره گسسته باشد هر سلول در CPT[۷] آن شامل احتمال شرطی گره در یک وضعیت خاص مربوط به یک حالت خاص از وضعیت‌های والدین است. همچنین تعداد سلول‌های این CPT برابر حاصل‌ضرب تعداد حالت‌های ممکن آن گره و والدین است. اگر گره پیوسته باشد، CPT شامل میانگین و واریانس برای هر وضعیت آن و یک ضریب رگرسیون برای هر یک از والدین پیوسته لازم به توضیح است که توسعه این مدل در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار R انجام شده است. این مدل به کمک بانک اطلاعاتی آموزش دیده و مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است.

شبکه بیزین هیبرید[۴]

شبکه بیزین یک ساختار گرافیکی است که یک نمایش نموداری از اثرات متقابل متغیرهایی است که باید الگوبندی شوند. هر متغیری بصورت یک گره در BN نمایش داده شده و برای هر متغیر ارتباط بین والدین و فرزندان با استفاده از کمان‌هایی ترسیم می‌شوند. همچنین توزیع احتمال هرگره برای والدین بلافصل آن توسط جدول احتمالات شرطی[۵] (CPT) ارائه می‌شود. مبنای این روش، احتمالات وابسته (قانون بیز[۶]) است که اولین بار توسط Pearl در سال ۱۹۸۸ معرفی شد. در شبکه بیزین برای محاسبه توزیع احتمال توام مجموعه‌ای از متغیرها استفاده می‌شود (Nielsen and Jensen, 2009):

(رابطه ۱)

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^{n} P(X_i \,|Parents(X_i))$$

که در آن، X_i = متغیر iام موجود در شبکه است.

۱ Probability of Hazard Occurrence
۲ Vulnerability
۳ Consequence
۴ Hybrid Bayesian Network
۵ Conditional Probability Table
۶ Bayes
7 Conditional Probability Table

خواهد بود.

بطور کلی گره‌ها می‌توانند از جنس گسسته به صورت داده-های دسته‌بندی شده و یا کیفی باشند (مثلا در دسته بندی کم، متوسط و زیاد) و یا پیوسته به صورت داده های صریح و عددی باشند. در شبکه بیزین هیبرید گره‌ها ترکیبی از متغیرهای پیوسته و گسسته هستند (Lerner *et al*., 2002). به عبارت دیگر، بعد از تعیین گره‌های مدل بیزین باتوجه به ذات گسسته و یا پیوسته بودن گره‌ها می‌توان درمورد استفاده از نوع شبکه بیزین تصمیم-گیری کرد. اگر گره‌ها از هر دو دسته بودند آنگاه می‌بایست شبکه بیزین هیبرید را بکار برد. به وجود آوردن شبکه بیزین هیبرید نیازمند تابع چگالی شرطی هیبرید است تا بتوان ارتباط بین متغیرهای پیوسته و گسسته را بدست آورد. این تابع به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود (Schrempf and Hanebeck, 2005).

(رابطه ۲)

$$f(x|u_1,\dots,u_m)=\sum_{k_{n+1}=1}^{|u_n+1|}\dots\sum_{k_m=1}^{|u_m|}\left(\prod_{i=n+1}^{m}\delta(u_i-k_i)\right)f^*(x|u_1,\dots,u_n)$$

این رابطه شامل چگالی شرطی پیوسته $f^*(x|u_1,\dots,u_n)$ برای هر حالت گسسته $(u_{n+1},\dots,u_m)$ از پیشینیان[1] گسسته x است. ستاره بیانگر وابستگی به$(k_{n+1},\dots,k_m)$. تعداد حالت‌های متغیرهای گسسته ui به وسیله |ui| نشان داده شده است. $\delta()$ تابع دلتا دیراک است که به منظور انتخاب $f^*()$ مناسب برای هر حالت گسسته توام استفاده می‌شود.

چگالی شرطی $f^*(x|u_1,\dots,u_n)$ به وسیله تابع گوسی ترکیبی در شرایط پیوسته و به عنوان مجموع پلاس‌های گوسی و دیراک در شرایطی که x گسسته است مدل می شود. رابطه (۳) و (۴) به ترتیب این تابع را برای موارد پیوسته و گسسته نشان می‌دهد. در مورد پیوسته، این تابع به عنوان چگالی گوسی چند متغیره با ابعاد n + 1 که با محورهای سیستم مختصات هماهنگ شده است، تفسیر کرد.

(رابطه ۳)

$$f_c^*(\mathrm{x}|\mathrm{u}_1,\dots,\mathrm{u}_n)=\sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{M}^*}\alpha_\mathrm{j}^*\mathrm{N}\left(\mathrm{x},\mu_{\mathrm{x,j}}^*,\sigma_\mathrm{j}^*\right).\mathrm{N}\left(\mathrm{u}_1,\mu_{\mathrm{u}_1,\mathrm{j}}^*,\sigma_{\mathrm{u}_1,\mathrm{j}}^*\right)\dots\mathrm{N}\left(\mathrm{u}_n,\mu_{\mathrm{u}_n,\mathrm{j}}^*,\sigma_{\mathrm{u}_n,\mathrm{j}}^*\right)$$

(رابطه ۴)

$$f_d^*(\mathrm{x}|\mathrm{u}_1,\dots,\mathrm{u}_n)=\sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{M}^*}\alpha_\mathrm{j}^*\left(\sum_{\mathrm{l_j}=1}^{|\mathrm{x}|}\mathrm{p}_{\mathrm{l_j}}^*\,\delta(\mathrm{x}-\mathrm{l_j})\right).\mathrm{N}\left(\mathrm{u}_1,\mu_{\mathrm{u}_1,\mathrm{j}}^*,\sigma_{\mathrm{u}_1,\mathrm{j}}^*\right)\dots\mathrm{N}\left(\mathrm{u}_n,\mu_{\mathrm{u}_n,\mathrm{j}}^*,\sigma_{\mathrm{u}_n,\mathrm{j}}^*\right)$$

روش اعتبار سنجی متقاطع[2]

روش‌های متفاوتی برای اعتبارسنجی و واسنجی وجود دارد که یکی از این روش‌ها روش اعتبارسنجی متقاطع K-fold است Bergmeir and Benitez *et al*., 2012; Bergmeir *et al*., 2018;) Chelle *et al*., 2020). در این روش بانک اطلاعات موجود به K دسته تقسیم می‌شود و در هربار تکرار یک دسته به‌عنوان مجموعه آزمایش و سایر دسته‌ها به‌عنوان آموزش انتخاب می‌شود. برای انتخاب دسته‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد در این تحقیق از روش نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌ای استفاده شده است که در آن جمعیت به زیر گروه‌های کوچک‌تر بر اساس خصوصیات مشترک اعضا تقسیم می‌شود و دسته‌بندی نهایی براساس تقسیم‌بندی نسبی محاسبه می‌شود. تقسیم‌بندی بر اساس میزان ریسک سامانه از ریسک زیاد به کم به ۵ دسته تقسیم شده که K دسته آخر به‌صورت تقسیم‌بندی نسبی انتخاب شده است.

منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق شبکه آبیاری رودشت شمالی واقع در استان اصفهان و آخرین شبکه موجود بر رودخانه حوضه آبخیز زاینده‌رود است که مختصات جغرافیایی ابتدای این شبکه ۵۲ درجه و ۳ دقیقه شرقی و ۳۲ درجه و ۲۲ دقیقه شمالی می‌باشد. به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شده است. طبق آمار و اطلاعات موجود سطح اراضی بهره‌برداری شده در سال ۹۲-۹۱ برابر با ۱۰۰۰۰ هکتار و حجم آب ورودی به شبکه ۷۳/۵۶ میلیون مترمکعب است که راندمان انتقال آن برابر با ۷۵ درصد است (Kamrani *et al*., 2020). شمایی از این شبکه در شکل (۲) نشان داده شده است.

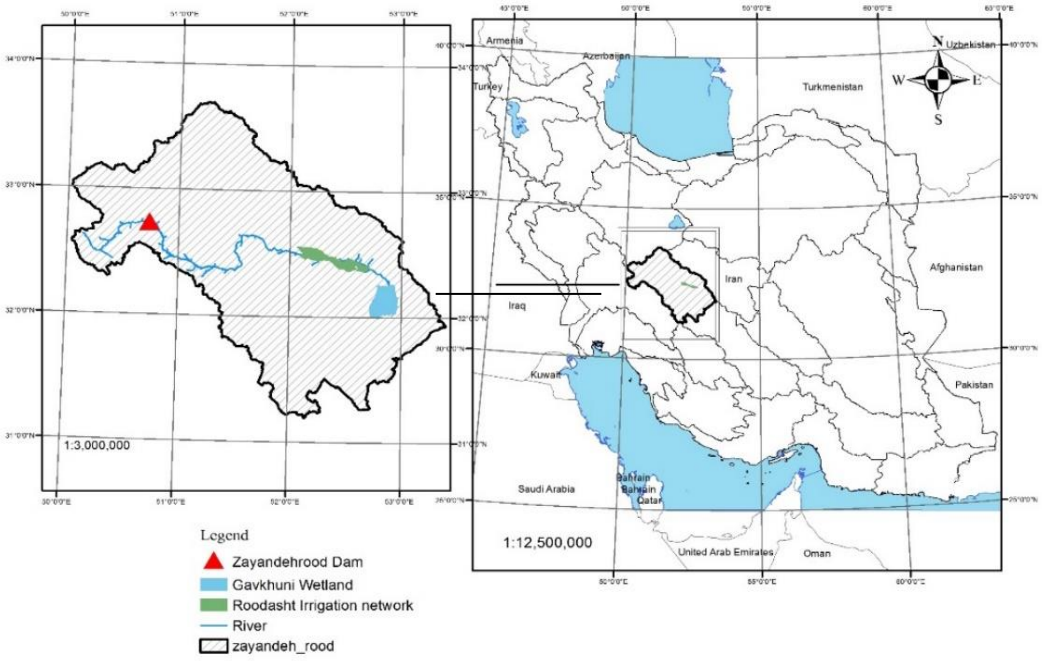
رودشت به عنوان آخرین شبکه آبیاری حوضه زاینده رود تحت تاثیر نوسانات بالادست است. نواحی آبیاری بالادست و پارکهای صنعتی این نوسانات را ایجاد میکنند. این عملکرد نامطلوب به صورت ناپایداری متناوب در تامین آب کلیه سازه‌های آبگیر واقع در کانال اصلی سیستم توزیع آب و مخصوصا آبگیرهای واقع در بخش میانی و پایین دست ظهور می‌کند. این ناپایداری عموما سبب می‌شود آبگیرها دبی کمتری از دبی مورد نیاز خود دریافت کنند و البته گاهی هم آبگیرهای مذکور با آب مازاد بر سهمیه خود روبه‌رو می‌شوند که به سبب شیوه سنتی بهره‌برداری سازه‌های تنظیم سطح آب استفاده مفیدی نشده و به صورت تلفات به سیستم زهکش تخلیه می‌شود. کمبود آب در فصول خشک تأثیر نوسانات ورودی را بر روی مصرف کنندگان آب بویژه در پایین‌دست تشدید می‌کند. علاوه بر این ، هرگونه آب اضافی بی فایده است زیرا سیستم کنترل بالادستی موجود، قادر به ذخیره آب در محل ذخیره‌سازی منشوری کانال‌ها نیست. به همین دلیل، کنترل بالادست سنتی کانال اصلی رودشت ناکارآمد است و سبب شده تا مسئولان آب انگیزه‌ای برای به روزرسانی

1 Predecessors

2 Cross Validation Method

عملکرد کانال اصلی با استفاده از کنترل خودکار داشته باشند.

به منظور محاسبه تقاضای آب کشاورزی در محدوده شبکه، به اطلاعات مقادیر سطح زیر کشت شبکه رودشت شمالی و نیاز خالص آبی گیاهان الگوی کشت است که این اطلاعات از نتایج تحقیق Karimi *et al.*, (2020) استفاده شده است. این اطلاعات به‌صورت فصلی در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۲- شمایی از شبکه آبیاری رودشت و موقعیت آن در پایین‌دست حوضه آبریز زاینده‌رود

جدول ۱- اطلاعات سطح زیرکشت و نیاز خالص آبیاری در منطقه رودشت شمالی

		گندم	جو	یونجه	گلرنگ	چغندرقند
سطح زیر کشت (هکتار)		۱۰۳۴۳	۱۹۴۱	۸۶۲	۵۴۱	۲۲
نیاز خالص آبیاری (m^3/ha)	پاییز	۱۰۷۹/۷	۱۱۴۰/۸	۴۳۹/۸	۱۷۷/۰	۱۷۷/۰
	زمستان	۲۰۹۴/۸	۲۳۶۸/۴	۸۶۸/۵	۰	۰
	بهار	۵۷۴۷/۷	۴۴۱۲/۰	۸۴۸۲/۹	۷۱۶۰	۸۴۸۲/۹
	تابستان	۰	۰	۹۵۹۵/۸	۴۶۰۹	۹۵۹۵/۸

مدل تحلیل ریسک سامانه توزیع آب شبکه آبیاری رودشت

باتوجه به مطالب ذکر شده، در ادامه به ارائه مدل تحلیل ریسک سامانه تامین و توزیع آب مطالعه موردی این تحقیق پرداخته می‌شود. خطرات گوناگونی سامانه توزیع آب کشاورزی شبکه آبیاری رودشت را تهدید می‌کند که پس از بررسی پژوهش‌های صورت گرفته، بازدید میدانی و مصاحبه با مدیران شبکه مشخص شد، مهم‌ترین خطر پیش روی سامانه تأمین آب این شبکه، خطر "عملکرد نادرست اپراتور[1]" (IPDRs) و "تلفات بهره‌برداری[2]" (OL) هستند. این خطرات تهدید کننده اصلی عملکرد توزیع آب در شبکه آبیاری رودشت هستند. به‌منظور محاسبه احتمال خطر عملکرد نادرست اپراتور نیاز است تا رفتار اپراتورهای سیستم توزیع آب مدل‌سازی شود. در این ارتباط لازم به توضیح است که وضعیت هیدرولیک در شبکه کانال‌های سیستم توزیع، متاثر از میزان و زمان‌بندی تغییرات بازشدگی/بسته شدگی سازه‌های آبگیر، تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری (تغییرات هیدروگراف ورودی جریان به کانال اصلی) با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS شبیه‌سازی شد. برای این منظور از مدل کالیبره‌شده و صحت-سنجی شده توسعه داده شده کانال اصلی سیستم توزیع آب شبکه رودشت، توسط (Kaghazchi *et al.*, 2019) استفاده شد. شبکه آبیاری رودشت مدل شده دارای ۱۴ سازه تنظیم و ۲۶ سازه آبگیر می‌باشد. اطلاعات هندسی این مدل شامل شیب کف ۰/۰۰۰۳ m/m ، ضریب مانینگ ۰/۰۱۷، شیب جانبی ۱/۵ m/m و عمق کانال ۴/۵-۲/۵ m است. پارامترهای آماری برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی به ترتیب برای پارامترهای MAE برابر با ۰/۳۴۹ و

1 Improper Performance of the Ditch-Riders

2 Operational Losses

۰/۵۷۶ و RMSE برابر با ۰/۹۸۶ و ۱/۰۲ و CRM برابر با ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱۱ است. پارامتر الگوی جریان بالادست (چگونگی تغییرات دبی ورودی در سراب سامانه توزیع آب) به‌عنوان یکی از گرههای ریشه، خروجی این مدل هیدرولیکی است. باتوجه به نوسانات جریان ورودی این پارامتر وضعیت‌های مختلف شامل نوسانات محدود، متوسط و مناسب است را می‌تواند به خود بگیرد. این گره به عنوان یک گره گسسته در هرگام زمانی از محاسبات در یکی از حالت‌های اشاره شده است.

همانطور که قبلا اشاره شد، سیستم توزیع آب شامل سه زیر جزء بالادست، میان دست و پایین دست است، که خطرات تهدید کننده و چگونگی محاسبه پارامترهای ریسک در آن‌ها یکسان است. چگونگی این محاسبات در ادامه توضیح داده شده است. محاسبه احتمال خطر عملکرد نادرست اپراتور با در نظر گرفتن جدول زمانی روزانه تنظیمات سازه‌های آبگیر (بر اساس مصاحبه صورت گرفته در این پژوهش) و بر اساس شاخص نرمال-سازی زمان تاخیر[1] (محاسبه شده بر اساس نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان) محاسبه می شود. زمان تاخیر مدت زمانی است که طول می‌کشد تا تغییرات دبی از بالادست هر بازه از کانال اصلی (حد فاصل بین دو سازه تنظیم سطح آب) تا انتها آن بازه که آبگیرها قراردارد، احساس شود (Shahdany*et al.*, 2016).

برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری سامانه توزیع تحت تهدید خطر عملکرد نادرست اپراتور از شاخص حساسیت دبی به تغییرات عمق آب طبق رابطه (۵) استفاده شده است. مطابق این شاخص حساسیت عملکرد سازه آبگیر تحت تاثیر نسبت تغییرات دبی تحویلی (ΔQ/Q) و تغییرات سطح آب بالادست آن سازه (ΔH) می‌باشد. پارامترهای مذکور شدیداً تحت تاثیر زمان‌بندی مناسب تنظیمات سازه آبگیر توسط اپراتور می‌باشد (FAO, 2008).

$$S = \frac{\Delta Q/Q}{\Delta H} \qquad \text{(رابطه ۵)}$$

به‌منظور ارزیابی شدت اثر خطر تهدید کننده برای سامانه توزیع از شاخص کفایت سازه‌ای استفاده شده است. شاخص کفایت سازه ای به معنی توانایی هرسازه برای عبور دادن دبی اسمی تنظیم شده سازه (همان میزان تقاضای آب کشاورزی) است. برای محاسبه این شاخص طبق رابطه (۶) از میانگین دبی-های عبوری سازه استفاده می‌شود تا عواقب ناشی از حساسیت سازه‌های آبگیر (آسیب‌پذیری سازه‌های نیرپیک) را بخوبی نشان دهد. باتوجه به مطالب ذکر شده پارامتر شدت اثر درواقع بیانگر اثر عملکرد نادرست اپراتور بر میزان عدم کفایت سامانه توزیع است (Molden and Gates 1990).

$$AQ_s = \frac{1}{T}\sum_T\left(\frac{1}{R}\sum_R Aq_s\right) \quad ;$$
$$\begin{cases} Aq_s = \frac{Q_d}{Q_S}, & when\ Q_d \le Q_S \\ Aq_s = 1, & otherwise \end{cases} \qquad \text{(رابطه ۶)}$$
$$C_o = 1 - AQ_s \qquad \text{(رابطه ۷)}$$

که در آن، AQ_s = کفایت سازه‌ای که مقداری کمتر از ۱ است زیرا مقادیر دبی برنامه‌ریزی شده به دلیل محدودیت‌های ساختاری قابل تحویل نیست، Q_d = مقدار آب موجود در سیستم که می تواند به صورت کامل مطابق با برنامه زمان بندی شده عمل کند، Q_s = دبی برنامه ریزی شده، C_o = شدت اثر خطر عملکرد نادرست اپراتور و $\sum_T^1$ متوسط زمانی و $\sum_R^1$ متوسط مکانی را نشان می دهند.

در مرحله بعد، احتمال وقوع خطر تلفات بهره‌برداری که سامانه توزیع را تهدید میکند با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود. در این مرحله نیاز به شاخصی هست که بتوان احتمال وقوع میزان دبی ورودی به کانال را برآورد کرد. برای این منظور ابتدا با استفاده از رابطه (۸) انحراف مقدار دبی ورودی به کانال با مقدار نرمال آن محاسبه شده و نرمال شده این اعداد به‌عنوان شاخص اختمال وقوع خطر درنظر گرفته می‌شود.

$$Dv = |Re - Re_n| \qquad \text{(رابطه ۸)}$$

که در آن، Dv = انحراف مقدار دبی ورودی به کانال از مقدار نرمال آن، Re = مقدار آب تخصیص یافته به نیازها از سامانه انحراف آب بالادست به شبکه، Re_n = مقدار دبی نرمال ورودی برابر با ۴/۵ cms است.

در گام بعد از شاخص پایداری به منظور برآورد آسیب-پذیری استفاده شده است. شاخص پایداری به معنای میزان قابل اعتماد بودن عملکرد توزیع آب کشاورزی در طول زمان در هر زیر جز تحت کنترل سیستم توزیع آب کشاورزی (محدوده تحت کشت بالادست، میان دست و پایین دست) است. این شاخص طبق رابطه (۹) محاسبه می‌شود (Molden and Gates 1990).

$$P_D = \frac{1}{R}\sum_R CV_T\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right) \qquad \text{(رابطه ۹)}$$

که درآن، $CV_T\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right)$= ضریب زمانی تغییر (نسبت انحراف معیار به میانگین) نسبت Q_D/Q_R در مدت زمان T، Q_R = دبی تقاضا، Q_D = مقدار تحویل شده توسط سیستم است. همچنین مقادیر نرمال این شاخص به عنوان شاخص آسیب‌پذیری سامانه تحت تهدید خطر تلفات بهره‌برداری (Vl) در نظر گرفته شده است.

---

۱ Delay Time

برای ارزیابی اثر خطر تلفات بهره‌برداری از دو شاخص کفایت سیستمی و راندمان توزیع آب کشاورزی استفاده شده است. مفهوم کفایت سیستمی (AQ) توانایی سیستم توزیع آب کشاورزی در تامین مقدار تقاضای آب کشاورزی در هر محدوده زراعی است (معادله (۱۰)). همچنین شاخص راندمان، بهره‌وری فیزیکی آب در سیستم‌های توزیع آب کشاورزی را نشان می‌دهد (معادله (۱۱)) که میزان آب مازاد تحویلی داده شده نسبت به آب درخواستی در محل آبگیر است. باتوجه به مقدار دبی ورودی به کانال پارامتر کفایت/راندمان (Qf) در شرایط دبی کم از شاخص کفایت و در شرایط دبی زیاد از شاخص راندمان استفاده می‌شود که در رابطه (۱۲) نشان داده شده است. همچنین شاخص شدت اثر بر اساس توضیحات اشاره شده از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$AQ = \frac{1}{T}\sum_T\left(\frac{1}{R}\sum_R Aq\right) \quad ;$$
$$\begin{cases} Aq = \frac{Q_D}{Q_R}, & when\ Q_D \le Q_R \\ Aq = 1, & otherwise \end{cases} \qquad \text{(رابطه ۱۰)}$$

$$P_f = \frac{1}{T}\sum_T\left(\frac{1}{R}\sum_R Pp_f\right) \quad ;$$
$$\begin{cases} p_f = \frac{Q_R}{Q_D}, & when\ Q_R \le Q_D \\ p_f = 1, & otherwise \end{cases} \qquad \text{(رابطه ۱۱)}$$

$$Qf = \begin{cases} AQ, & Re < Re_n \\ P_f, & otherwise \end{cases} \qquad \text{(رابطه ۱۲)}$$

$$Cl = 1 - Qf_n \qquad \text{(رابطه ۱۳)}$$

که در آن، Qf_n = مقادیر نرمال‌شده پارامتر کفایت/راندمان، Cl = شدت اثر خطر تلفات بهره برداری است.

در نهایت ریسک بعد از تعیین احتمال خطر، آسیب‌پذیری و پیامد آن همانطور که در رابطه (۱۴) نشان داده شده است، محاسبه می‌شود (Baker *et al*., 2002; Torres *et al*., 2009):

$$\text{Risk} = P \times C \times V \qquad \text{(رابطه ۱۴)}$$

که در آن، P = احتمال وقوع خطر؛ V= آسیب‌پذیری و C = پیامد.

باتوجه به مطالب ذکر شده، گره‌های شبکه بیزین معرفی و روابط بین آن‌ها توضیح داده شد. به‌منظور شفافیت بیشتر شماتیک مدل ارزیابی ریسک سامانه تأمین آب کشاورزی در شکل (۳) نشان داده شده است. بعد از تعیین ساختار مدل HBN و توسعه آن در محیط برنامه‌نویسی R نیاز است که عملکرد مدل مورد ارزیابی قرار گیرد. دقت و صحت خروجی‌های مدل با شاخص‌های ازجمله ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا[۱] (RMSE)، میانگین خطای مطلق[۲] (MAE) و شاخص کل عملکرد مدل[۳] (OI) استفاده شده است. چگونگی محاسبه هر شاخص در روابط (۱۵) – (۱۸) اشاره شده.

باتوجه به فرمولاسیون این شاخص‌ها، هرچقدر مقادیر شاخص‌های RMSE و MAE به صفر و شاخص OI به یک نزدیک باشند، مدل از دقت بالاتری برخوردار است (Bayram, S., and Al-Jibouri *et al*., 2016; Sarzaeim *et al*., 2017).

(رابطه ۱۵)
$$R^2 = \left(\frac{n\sum Rs_{obs,t}Rs_{m,t} - (\sum Rs_{obs,t})(\sum Rs_{m,t})}{\sqrt{[n\sum Rs_{obs,t}{}^2 - (\sum Rs_{obs,t})^2][n\sum Rs_{m,t}{}^2 - (\sum Rs_{m,t})^2]}}\right)^2$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{T}(Rs_{obs,t} - Rs_{m,t})^2}{T}} \qquad \text{(رابطه ۱۶)}$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{T}\left|Rs_{obs,t} - Rs_{m,t}\right| \qquad \text{(رابطه ۱۷)}$$

(رابطه۱۸)
$$OI = \frac{1}{2}\left[2 - \frac{RMSE}{Rs_{obs,max} - Rs_{obs,min}} - \frac{\sum_{t=1}^{T}(Rs_{obs,t} - Rs_{m,t})^2}{\sum_{t=1}^{T}(Rs_{obs,t} - \overline{Rs}_{obs})^2}\right]$$

که در آن، $Rs_{obs,t}$ = مقادیر مشاهداتی، $Rs_{m,t}$ = خروجی مدل، $Rs_{obs,max}$ و $Rs_{obs,min}$ = بیشینه و کمینه مقادیر مشاهداتی، $\overline{Rs}_{obs}$ = میانگین مقادیر مشاهداتی، n = تعداد داده‌ها.

نتایج و بحث

نتایج محاسبات ریسک اجزای سامانه

بعد از انجام محاسبات لازم، مقادیر ریسک اجزا مختلف سامانه محاسبه و در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، کم‌ترین مقدار ریسک توزیع سامانه ۰/۲ درصد است و بیش‌ترین مقدار ریسک برابر با ۴۸ درصد می‌باشد. مقدار ریسک سامانه توزیع متاثر از سامانه توزیع بالادست، میان دست و پایین دست است. مقادیر ریسک این سه زیر سامانه در شکل (۴) (ب) تا (ت) نشان داده شده است. ریسک سامانه توزیع بالادست در بازه ۰/۰۱ – ۴۶/۶ درصد است. همچنین ریسک میان دست برابر با ۰/۲۳- ۴۸/۵ درصد با میانگین ۱۵/۱۱ درصد است. همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده هرچه از بالادست سامانه توزیع به سمت پایین دست حرکت میکنیم مقدار ریسک زیرجزء-های سامانه توزیع بیشتر شده و سامانه توزیع با چالش‌های بیشتری روبرو است. پایین دست سامانه توزیع دارای ریسکی دربازه ۰/۳ – ۴۹/۱۳ درصد با میانگین ۱۶/۶ درصد دارد. از آنجاییکه دو خطر تلفات بهره‌برداری و عملکرد نامناسب اپراتور زیرجزءهای سامانه را تهدید می‌کنند، مقادیر مختلف ریسک این دوخطر در شکل (۵) نشان داده شده است.

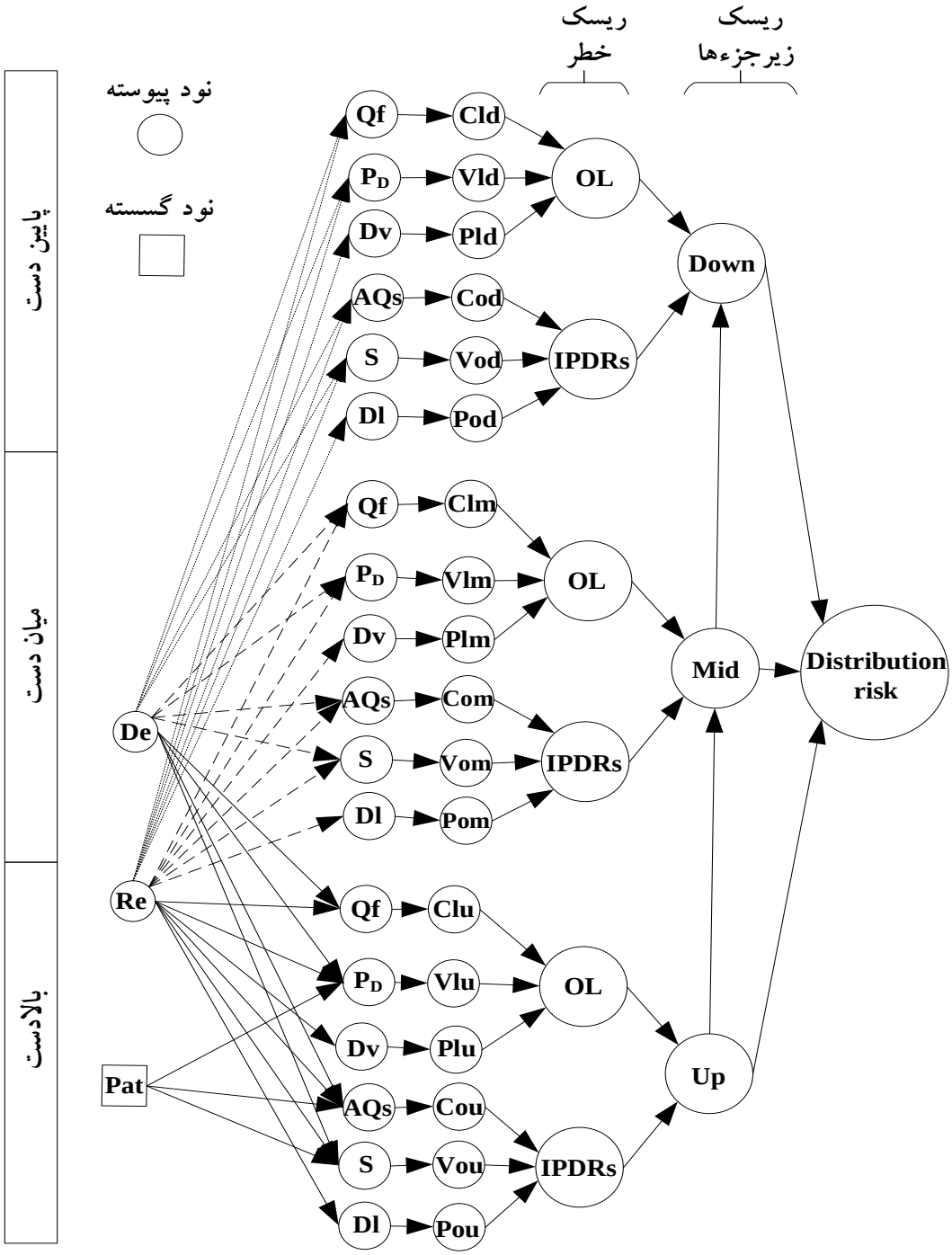
---

۱ Root Mean Squares Error

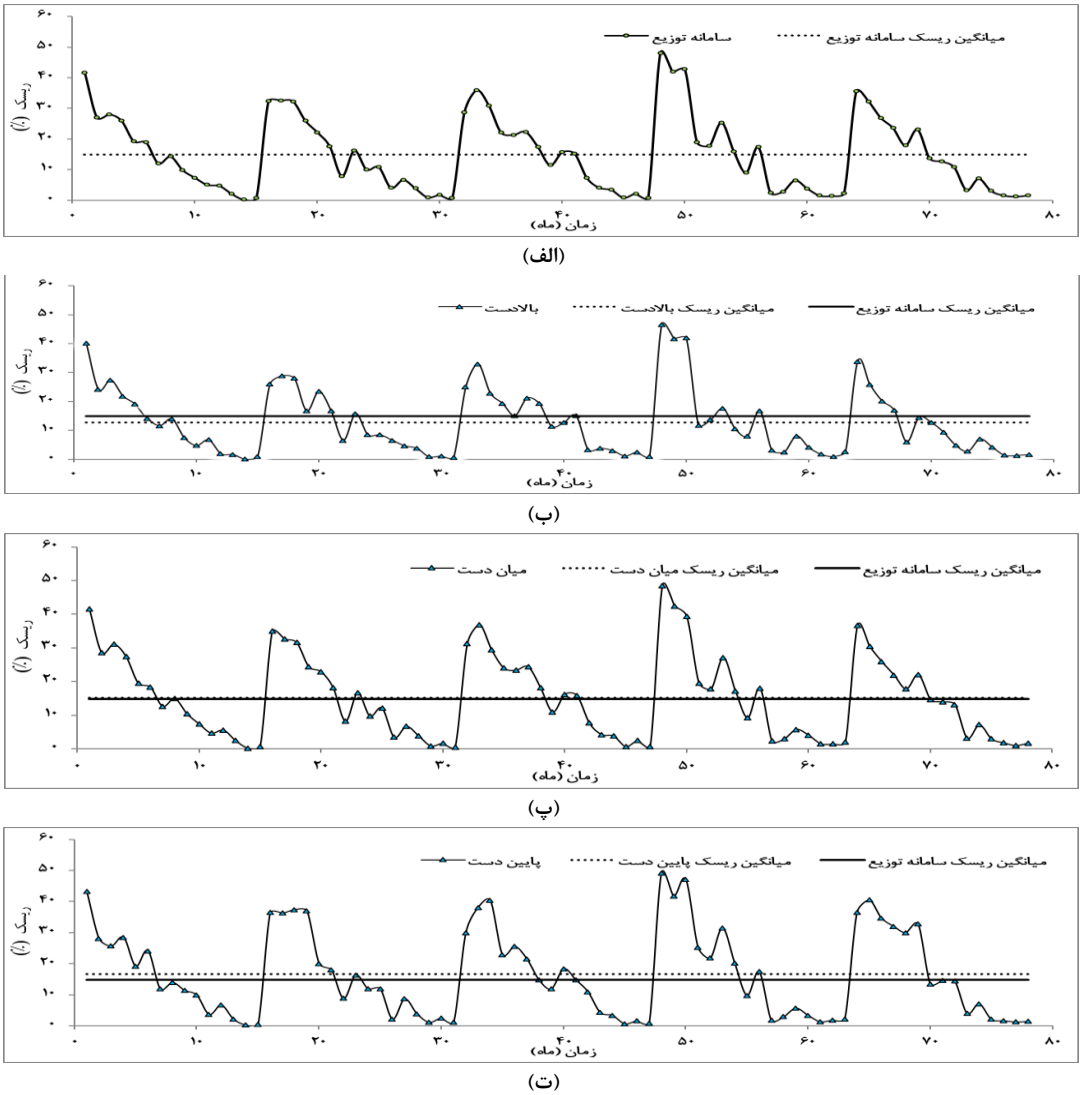
۲ Mean Absolute Error

۳ Overall Index of Model Performance

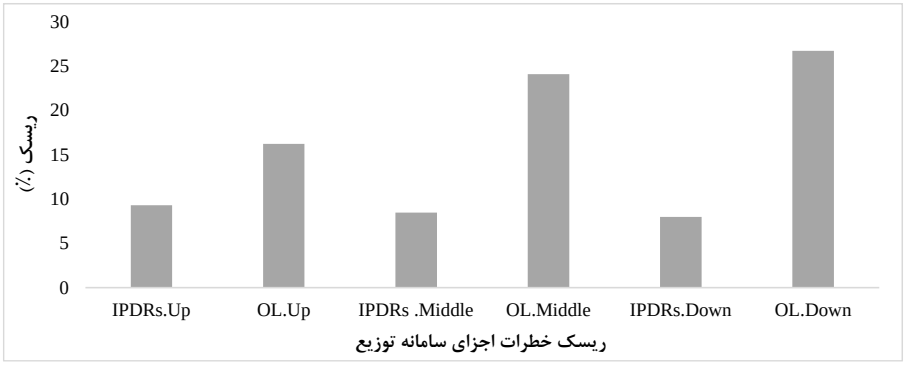
مقدار تاثیرگذاری خطرات تهدید کننده سامانه توزیع در هر زیرجزء بالادست، میان‌دست و پایین دست متفاوت است. همچنین طبق شکل (۵) بطور کلی خطر تلفات بهره‌برداری ریسک بیشتری برای سامانه توزیع نسبت به خطر تلفات بهره-برداری دارد. میانگین ریسک خطر تلفات بهره‌برداری برابر با ۲۲/۳۵ درصد و میانگین ریسک خطر عملکرد نادرست اپراتور برابر با ۸/۵۸ درصد است.



شکل ۳- شماتیک مدل ارزیابی ریسک سامانه توزیع آب کشاورزی



شکل ۴- مقادیر ریسک (الف) سامانه توزیع، (ب) زیر جزء بالادست، (پ) زیر جزء میان دست و (ت) زیر جزء پایین دست سامانه توزیع



شکل ۵- ریسک خطر تلفات بهره‌برداری (OL) و عملکرد نامناسب اپراتور (IPDRs) برای زیر جزءهای بالادست (UP)، میان‌دست (Middle) و پایین دست (Down) سامانه توزیع

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که به‌دلیل وجود آب ناکافی نسبت به تقاضای کشاورزی و دیگر خطرات تهدید کننده این قسمت (خطر عملکرد نادرست اپراتور و تلفات بهره‌برداری) در مجموع به سمت پایین دست اثر خطرات بیشتر شده و میزان تقاضا کمتر تأمین می‌شود. نتایج بدست آمده همخوانی مناسبی با سیستم کنترل موجود در کانال مورد مطالعه تحقیق دارد. با توجه به اینکه کانال مورد مطالعه این تحقیق بر اساس سیستم کنترل بالادست عمل می‌کند، ریسک توزیع آب در مناطق کشاورزی واقع در بالادست همواره پایین‌تر از مناطق واقع در میان دست و پایین دست می‌باشد. نحوه عملکرد روش کنترل بالادست

به این صورت است که بهره برداری سازه های هیدرولیکی (سازه های تنظیم سطح آب و سازه های آبگیر) به صورت روزانه و در یک نوبت از بالادست شبکه آغاز گردیده و به تدریج تا پایین دست ادامه می یابد. بنابراین تاثیر هر گونه خطای انسانی (نحوه عملکرد تیم بهره برداری) و پدیده های هیدرولیکی (مانند پدیده رزونانس که سبب تشدید امواج در شبکه کانالها می شود [۲۷] به صورت تجمعی به پایین دست منتقل شده و فرآیند آبگیری مطمئن را در پایین دست مختل می نماید. شایان ذکر است که با توجه به اینکه در کانال مورد مطالعه این تحقیق از سازه های تنظیم سطح آب ثابت بهره برده است، لذا نحوه عملکرد تیم بهره برداری فقط در تنظیم سازه های آبگیر قابل بررسی است.

همچنین مقایسه نتایج تحلیل ریسک مرتبط با دو خطر سامانه توزیع، ریسک خطر تلفات بهره‌برداری و عملکرد نادرست اپراتور، نشان می‌دهد که خطر تلفات بهره‌برداری ارتباط بیش‌تری با نحوه تامین آب سطحی در سراب کانال اصلی دارد به نحوی‌که میانگین ریسک این خطر از بالادست به سمت پایین دست تابع روند صعودی ریسک سیستم توزیع آب بدست آمده است. این در حالی است که میانگین ریسک خطر عملکرد نادرست اپراتور روندی معکوس داشته و از مقدار ۹/۳۰ درصد در بالادست به ۷/۹۸ درصد در پایین دست کاهش یافته است. دلیل این امر به روش بهره‌برداری سنتی سیستم توزیع آب کانال شبکه آبیاری رودشت برمی‌گردد. در روش های سنتی بهره برداری، زمان بندی بازشدگی/بسته شدگی سازه های هیدرولیکی (صرفا سازه های آبگیر در کانال مورد مطالعه این تحقیق) توسط مدیر شبکه و صرفاً بر اساس قضاوت مهندسی و تجربه بهره‌برداری صورت می‌گیرد. بنابراین هرگونه تغییرات زمانی در دبی ورودی و عدم در نظر گرفتن شرایط هیدرولیکی کانال سبب خواهد شد خطای محاسباتی در محاسبه تاخیر زمانی و نهایتاً زمان‌بندی اعمال تغییرات در گشودگی سازه‌های هیدرولیکی اتفاق بیفتد. مشکل مذکور با افزایش میزان دبی در کانال انتقال آب بیش‌تر رخ می دهد و در مواقع کم آبی، به سبب سرعت کمتر و شرایط هیدرولیکی کمتر تجربه می‌شود. بنابراین نتایج تحلیل ریسک خطر عملکرد نادرست اپراتور بدست آمده به دو شیوه قابل تفسیر است: i) تیم بهره‌برداری واقع در پایین‌دست و میان‌دست شبکه آبیاری رودشت از تجربه و دقت بالاتری برخوردار است و ii) تاثیرات منفی ناشی از زمان بندی بازشدگی/بسته شدگی نادرست سازه‌های آبگیر واقع در بالادست شبکه، در مجموع به نحوی عمل کرده که سبب کاهش خطای تیم‌های بهره‌برداری میان دست و پایین دست شده است.

نتایج مدل شبکه بیزین هیبرید

در ادامه مدل تحلیل ریسک سامانه توزیع آب کشاورزی رودشت، با به‌کارگیری مدل HBN توسعه داده شد. سپس ساختار شبکه بیزین از جمله گره‌ها و ارتباطات بین آنها طبق شکل (۳) طراحی گردید. در ادامه، با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع K-fold بر اساس تقسیم‌بندی نسبی، مجموعه ۷۸ سری اطلاعات از سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۶ در این تحقیق به دو گروه آموزش و آزمایش تقسیم‌بندی شدند. در این تحقیق، مقدار k برابر ۵ در نظر گرفته شد. این انتخاب به این معنی است که داده‌ها به ۵ دسته تقسیم شده و مدل ۵ مرتبه آموزش می‌بینند که در هر تکرار یکی از دسته‌ها به‌عنوان مجموعه آزمایش درنظر گرفته می‌شود. اطلاعات ورودی مدل HBN تقاضای آب کشاورزی، آب رهاسازی شده از بند بالادست و نوسانات جریان است. این پارامترهای ورودی می‌توانند پیوسته و یا گسسته باشند که مدل HBN قادر به مدل‌سازی آنها است. با استفاده از این اطلاعات مقادیر ریسک سامانه در هر زیرجز محاسبه می‌شود. نتایج ارزیابی عملکرد مدل بیزین در جدول (۲) برای دو قسمت آموزش و آزمایش به‌ازای هرتکرار برای ریسک بالادست سامانه و میانگین تکرارها برای ریسک اجزا و سامانه توزیع نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج آموزش و آزمایش مدل HBN ارزیابی ریسک سامانه توزیع آب کشاورزی رودشت

		آموزش				آزمایش			
		R^2	RMSE	MAE	OI	R^2	RMSE	MAE	OI
بسته‌بندی	تکرار ۱	۰/۶۴۱	۰/۰۷۶	۰/۰۵۹	۰/۶۸۷	۰/۶۴۱	۰/۰۶۹	۰/۰۵۵	۰/۷۶۱
	تکرار ۲	۰/۷۰۷	۰/۰۸۱	۰/۰۶۳	۰/۶۶۶	۰/۷۵۵	۰/۰۴۵	۰/۰۳۸	۰/۸۷۰
	تکرار ۳	۰/۶۹۴	۰/۰۷۴	۰/۰۵۷	۰/۷۱۵	۰/۶۲۸	۰/۰۷۳	۰/۰۵۸	۰/۵۹۶
	تکرار ۴	۰/۷۰۱	۰/۰۶۴	۰/۰۵۰	۰/۶۷۸	۰/۶۵۹	۰/۰۸۳	۰/۰۵۳	۰/۶۹۵
	تکرار ۵	۰/۶۷۸	۰/۰۸۷	۰/۰۶۹	۰/۶۷۵	۰/۶۳۶	۰/۰۶۴	۰/۰۵۵	۰/۶۷۷
	میانگین بالادست	۰/۶۸۴	۰/۰۷۶	۰/۰۶۰	۰/۶۸۴	۰/۶۶۴	۰/۰۶۷	۰/۰۵۲	۰/۷۱۳
	میانگین میان دست	۰/۶۴۳	۰/۰۷۵	۰/۰۴۷	۰/۷۰۳	۰/۶۱۰	۰/۰۸۰	۰/۰۶۶	۰/۵۷۰
	میانگین پایین دست	۰/۶۴۷	۰/۰۸۳	۰/۰۶۵	۰/۷۳۲	۰/۶۳۹	۰/۰۸۷	۰/۰۷۲	۰/۶۹۳
	میانگین سامانه توزیع	۰/۶۵۲	۰/۰۷۳	۰/۰۶۰	۰/۷۲۸	۰/۶۲۵	۰/۰۷۵	۰/۰۶۲	۰/۷۱۱
	کل	۰/۶۵۶	۰/۰۷۶	۰/۰۵۸	۰/۷۱۱	۰/۶۳۴	۰/۰۷۷	۰/۰۶۳	۰/۶۷۱

نتایج برای داده‌های آموزش ریسک سامانه توزیع در شاخص‌های RMSE و MAE برابر ۰/۰۷۳ و ۰/۰۶۰ و برای داده-های آزمایش به‌ترتیب برابر ۰/۰۷۵ و ۰/۰۶۲ است. مقادیر این دو شاخص چه در تکرارهای مختلف و چه در میانگین، اعداد کوچکی هستند. همچنین شاخص‌های R^2 و OI برای مجموعه آموزشی برابر ۰/۶۵۲ و ۰/۷۲۸ است و برای مجموعه آزمایش به‌ترتیب برابر با ۰/۶۲۵ و ۰/۷۱۱ است. همانطور که اشاره شد این شاخص‌ها هرچقدر به یک نزدیک باشند به‌معنی دقت بالاتر مدل است که شاخص‌های محاسبه شده اعداد قابل قبولی را نشان می‌دهند. همچنین متوسط شاخص‌های عملکردی زیرجزء بالادست سامانه توزیع برای ۵ بار تکرار داده‌های آموزش در شاخص‌های R^2 و RMSE به ترتیب برای برابر با ۰/۶۸۴ و ۰/۰۷۶ و برای داده‌های آزمایش برابر با ۰/۶۶۴ و ۰/۰۶۷ است. برای این زیر جزء شاخص-های محاسبه شده به ازای هرتکرار به‌عنوان نمونه ذکر شده است.

عملکرد مدل برای ریسک زیرجزء میان‌دست سامانه توزیع نیز در تکرارهای مختلف ارزیابی شد که متوسط شاخص‌های R^2 و RMSE برای داده های آموزشی برابر با ۰/۶۴۳ و ۰/۰۷۵ و برای داده های آزمایش برابر با ۰/۶۱۰ و ۰/۰۸۰ است. همچنین مقادیر R^2 و RMSE برای زیرجزء پایین‌دست سامانه در داده های آموزشی برابر با ۰/۶۴۷ و ۰/۰۸۳ است. نتایج عملکرد مدل سامانه عملکرد قابل قبولی را نشان می دهد. نهایتاً متوسط شاخص‌های عملکردی گره‌های ریسک برای مدل HBN که در ردیف آخر جدول (۲) نشان داده شده است برای داده های آموزش در شاخص R^2 و OI برابر با ۰/۶۵۶ و ۰/۷۲۸ و برای داده‌های آزمایش برابر با ۰/۶۳۴ و ۰/۶۷۱ است. عملکرد دقیق مدل نسبت به داده-های آموزش و آزمایش، نشان می‌دهد که این مدل توسعه یافته، توانایی تحلیل ریسک شبکه تامین و توزیع آب کشاورزی را دارد.

استفاده از HBN برای ارزیابی ریسک سامانه کشاورزی این امکان را می‌دهد که پارامترهای ورودی به صورت پیوسته یا گسسته بر اساس ذات پارامتر باشد. همچنین با اطلاعات ناقص نیز می‌تواند مقادیر ریسک را در سامانه و اجزای آن برآورد کند. این مدل توانایی درنظر گرفتن ارتباطات علت و معلولی بین اجزای سامانه و خطرات را دارد. HBN یک مدل احتمالاتی است که با استفاده از تابع توزیع احتمالاتی برازش داده شده به گره‌ها محاسبات را انجام میدهد. این مدل را می‌توان جایگزین محاسبات طولانی و دستی کرد. همچنین به کمک پتانسیلی که شبکه بیزین دارد می‌تواند این فرآیند را بصورت محاسبات رو به عقب نیز انجام داد. به عبارت دیگر، می‌توان مقدار ریسک خروجی سیستم را به مدل داد و به ازای آن مقادیر ورودی آن را ارزیابی کرد و برنامه‌ریزی را برآن اساس انجام داد. باتوجه به کاربر دوست بودن این مدل، می‌توان از آن را به عنوان یک سیستم پشتیبانی در تصمیم‌گیری در راستای مدیریت ریسک و تدوین راهکارها در هر بخش از سامانه کشاورزی استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق، مدلی برای تحلیل ریسک سامانه‌های توزیع آب کشاورزی به‌وسیله HBN توسعه داده است. بعد از طراحی مدل HBN و تعیین پارامترها و ارتباط بین آن‌ها برای آن‌که توانایی این مدل نشان داده شود، در یک شبکه آبیاری واقعی پیاده‌سازی شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. . نتایج، ریسک سامانه توزیع کشاورزی رودشت را در بازه ۰/۱۸ – ۴۸/۱ درصد با میانگین ۱۴/۸ درصد نشان می‌دهد. نتایج ریسک زیرجزءها نشان داد که هرچه از بالادست سامانه به سمت پایین دست آن پیش برویم بر میزان ریسک افزوده می‌شود. مجموعه عوامل تاثیرگذاری چون عوامل هیدرولیکی، انسانی و فنی در عملکرد ضعیف‌تر سامانه توزیع آب کشاورزی دخیل هستند. نتیجه اجرای این مدل بعد ازآموزش پارامتری و آزمایش نشان می‌دهد که مقدار شاخص R^2 و RMSE برای داده های آزمایش ریسک سامانه توزیع برابر با ۰/۶۲۵ و ۰/۰۷۵ و متوسط عملکرد مدل برای داده‌های آموزشی در شاخص‌های RMSE و OI برابر ۰/۰۷۳ و ۰/۷۲۸ است. تمامی شاخص‌ها نشان می‌دهند که مدل بادقت بالایی اجرا شده و نتایج آن قابل قبول می‌باشد. لذا با توجه به این نتایج، تصمیم‌گیران و بهره‌برداران شبکه می‌توانند از این مدل برای شفاف‌سازی شرایط شبکه آبیاری درهنگام مواجه با خطرات مختلف که اجزای سامانه توزیع را تهدید می‌کنند، استفاده کنند. در واقع این ابزار قادر است به عنوان پیش‌بینی کننده ریسک سامانه با در نظر گرفتن اطلاعات آب ورودی به سامانه توزیع، تقاضای شبکه آبیاری و الگوی نوسان بخش بالادست شبکه، مورد استفاده بهره‌برداران قرار گیرد. از آنجایی که برای ارزیابی ریسک، از مدل بیزین هیبرید استفاده شده‌است بنابراین اطلاعات ورودی را می‌توان بر اساس ذات آن پارامتر به‌صورت پیوسته و یا گسسته به مدل داد. همچنین با اطلاعات بسیار کم و دردسترس می‌توان مقادیر ریسک خطرات مختلف، اجزا و زیر جزهای سامانه و همچنین مقدار ریسک کلی سامانه را محاسبه کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده این مدل HBN تحلیل ریسک را برای سایر سامانه‌های پیچیده طبیعی و انسان‌ساز در مقیاس‌های بزرگتر و با درنظر گرفتن تأثیر خطرات مختلف موجود، از نقطه نظر اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی نیز بررسی کرد. همچنین برای گام‌های

بعدی پیشنهاد می‌شود مقادیر ریسک را در طول بازه زمانی به‌صورت پویا ارزیابی کرد و سناریوهایی جهت کاهش ریسک سامانه و اجزای آن با توجه به گام‌های زمانی طراحی کرد و با استفاده از این شبکه‌های بیزین نتیجه بکارگیری سناریوهای مدیریت ریسک را ارزیابی کرد.

سپاس‌گزاری

بدین وسیله از پشتیبانی شرکت مدیریت منابع آب ایران از این تحقیق در قالب طرح تحقیقاتی به شماره قرارداد ۰۰۷/س/۹۹ تشکر و قدردانی می شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Abbassi, R., Bhandari, J., Khan, F., Garaniya, V., and Chai, S. (2016). Developing a quantitative risk-based methodology for maintenance scheduling using Bayesian network. *Chemical Engineering Transactions*, 48, 235-240.

Abedzadeh, S., Roozbahani, A., & Heidari, A. (2020). Risk Assessment of Water Resources Development Plans Using the Fault Tree Analysis Method (case study: District 4 of Mokran and Bandar Abbas). *Iranian journal of Ecohydrology*, 7(1), 29-45.

Anbari, M. J., Tabesh, M., and Roozbahani, A. (2017). "Risk assessment model to prioritize sewer pipes inspection in wastewater collection networks." Journal of Environmental Management, 190, 91-101.

Babaei, M., Roozbahani, A., and Shahdany, S. M. H. (2018). Risk Assessment of Agricultural Water Conveyance and Delivery Systems by Fuzzy Fault Tree Analysis Method. *Water Resources Management*, 32(12), 4079-4101.

Baker, A. B., Eagan, R. J., Falcone, P. K., Harris, J. M., Herrera, G. V., Hines, W. C., ... and Woodall, T. D. (2002). A scalable systems approach for critical infrastructure security. Sandia National Laboratories.

Baksh, A. A., Abbassi, R., Garaniya, V., and Khan, F. (2018). "Marine transportation risk assessment using Bayesian Network: Application to Arctic waters." *Ocean Engineering*, 159, 422-436.

Bayram, S., and Al-Jibouri, S. (2016). Efficacy of estimation methods in forecasting building projects' costs. *Journal of construction engineering and management*, 142(11).

Bergmeir, C., Benitez, J.M., (2012). On the use of cross-validation for time series predictor evaluation. *Information Sciences*, 191,192–213.

Bergmeir, C., Hyndman, R.J., Koo, B., (2018). A note on the validity of cross-validation for evaluating autoregressive time series prediction. *Computational Statistics and Data Analysis*. 120, 70–83.

Bozorgi, A., Roozbahani, A. and Shahdany, S. H. (2020) "Development of drought risk analysis model for agricultural water supply systems using Bayesian network (Case Study: Northern Roodasht Irrigation Network)" *Water Research in Agriculture (Formerly Soil And Water Sciences)*, 34(2), 187-202. (In Farsi)

Chelle, P., Yeung, C. H., Croteau, S. E., Lissick, J., Balasa, V., Ashburner, C., ... and Wynn, T. (2020). Development and Validation of a Population-Pharmacokinetic Model for Rurioctacog Alfa Pegol (Adynovate®): A Report on Behalf of the WAPPS-Hemo Investigators Ad Hoc Subgroup. *Clinical pharmacokinetics*, 59(2), 245-256.

FAO (Food and Agriculture Organization), (2008). Sensitivity analysis of irrigation structures, from http://www.fao.org/3/a-bc045e.pdf

Imran, U., Khan, M., Jamal, R., Sahulka, S. Q., Goel, R., Mahar, R., & Weidhaas, J. (2020). Probabilistic risk assessment of water distribution system in Hyderabad, Pakistan reveals unacceptable health hazards and areas for rehabilitation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 191, 110233.

Kaghazchi, A., Shahdany, S. M. H., Roozbahani, A., Banihabib, M. E., and Taghvaeian, S., (2019). Development of a Hybrid Bayesian Network Model for Hydraulic Simulation of Agricultural Water Distribution and Delivery. 5th Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation (KBEI) (pp. 359-365). IEEE.

Kamrani, K., Roozbahani, A., and Shahdany, S. M. H. (2020). Using Bayesian networks to evaluate how agricultural water distribution systems handle the water-food-energy nexus. *Agricultural Water Management*, 239, 106265.

Karimi Avargani, H., Shahdany, S. H., Garmdareh, S.E.H and Liaghat, A. (2020). Determination of Water Losses through the Agricultural Water Conveyance, Distribution, and Delivery System, Case Study of Roodasht Irrigation District, Isfahan. *Journal of water and irrigation management*, 10(1), 143-156. (In Farsi).

Lee, M., McBean, E. A., Ghazali, M., Schuster, C. J., and Huang, J. J. (2009). Fuzzy-logic modeling of risk assessment for a small drinking-water supply system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(6), 547-552.

Lerner, U. N. (2002). Hybrid Bayesian networks for reasoning about complex systems (Doctoral dissertation, stanford university).

Liu, B., Huang, J. J., McBean, E., & Li, Y. (2020). Risk assessment of hybrid rain harvesting system and other small drinking water supply systems by game theory and fuzzy logic modeling. *Science of The Total Environment*, 708, 134436.

Liu, J., Liu, R., Zhang, Z., Cai, Y., & Zhang, L. (2019). A Bayesian Network-based risk dynamic simulation model for accidental water pollution discharge of mine tailings ponds at watershed-scale. *Journal of environmental management*, 246, 821-831.

Malekmohammadi, B., and Moghadam, N. T. (2018).

Application of Bayesian networks in a hierarchical structure for environmental risk assessment: a case study of the Gabric Dam, Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 190(5), 279.

Molden, D. J., & Gates, T. K. (1990). Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 116(6), 804-823.

Nielsen, T. D., and Jensen, F. V. (2009). *Bayesian networks and decision graphs*. Springer Science and Business Media.

Noorbeh, P., Roozbahani, A. and Kardan Moghaddam, H. (2020). Annual and Monthly Dam Inflow Prediction Using Bayesian Networks. *Water Resources Management*.

Orak, N. H. (2020). A Hybrid Bayesian Network Framework for Risk Assessment of Arsenic Exposure and Adverse Reproductive Outcomes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 192, 110270.

Orojloo, M., Shahdany, S. M. H., and 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.

Roozbahani, A., Zahraie, B., and Tabesh, M. (2013). Integrated risk assessment of urban water supply systems from source to tap. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 27(4), 923-944.

Sarzaeim, P., Bozorg-Haddad, O., Bozorgi, A., and Loáiciga, H. A. (2017). Runoff projection under climate change conditions with data-mining methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(8), 04017026.

Schrempf, O. C., and Hanebeck, U. D. (2005). Evaluation of Hybrid Bayesian Networks using Analytical Density Representations. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), 170-175.

Shahdany, S. H., Majd, E. A., Firoozfar, A., and Maestre, J. M. (2016). Improving operation of a main irrigation canal suffering from inflow fluctuation within a centralized model predictive control system: case study of Roodasht Canal, Iran. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(11), 05016007.

Torres, J. M., Brumbelow, K., and Guikema, S. D. (2009). Risk classification and uncertainty propagation for virtual water distribution systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 94(8), 1259-1273.

Wang, Y., Li, Z., Guo, S., Zhang, F., & Guo, P. (2020). A risk-based fuzzy boundary interval two-stage stochastic water resources management programming approach under uncertainty. *Journal of Hydrology*, 582, 124553.

Wijesiri, B., Deilami, K., McGree, J., & Goonetilleke, A. (2018). Use of surrogate indicators for the evaluation of potential health risks due to poor urban water quality: A Bayesian Network approach. *Environmental pollution*, 233, 655-661.

Yeo, C., Bhandari, J., Abbassi, R., Garaniya, V., Chai, S., and Shomali, B. (2016). Dynamic risk analysis of offloading process in floating liquefied natural gas (FLNG) platform using Bayesian Network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 41, 259-269.

Zamani, R., Akhond-Ali, A. M., Roozbahani, A., & Fattahi, R. (2017). Risk assessment of agricultural water requirement based on a multi-model ensemble framework, southwest of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3-4), 1109-1121.

Zhang, Q., Yao, Y., Wang, Y., Wang, S., Wang, J., Yang, J., ... and Li, W. (2019). Characteristics of drought in Southern China under climatic warming, the risk, and countermeasures for prevention and control. *Theoretical and Applied Climatology*, 136(3-4), 1157-1173.