

## توسعه مدل تحلیل ریسک خشکسالی در سامانه‌های تأمین آب کشاورزی شبکه آبیاری رودشت شمالی با استفاده از شبکه بیزین

عطیه بزرگی، عباس روزبهانی<sup>۱\*</sup> و سید مهدی هاشمی شاهدانی

دانشجوی دکترای مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

[bozorgi.atiyeh@ut.ac.ir](mailto:bozorgi.atiyeh@ut.ac.ir)

دانشیار گروه مهندسی آبیاری، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

[roozbahany@ut.ac.ir](mailto:roozbahany@ut.ac.ir)

دانشیار گروه مهندسی آبیاری، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

[mehdi.hashemy@ut.ac.ir](mailto:mehdi.hashemy@ut.ac.ir)

### چکیده

کشاورزی از مهمترین بخش‌های اقتصادی ایران و بزرگترین مصرف کننده منابع آب سطحی و زیرزمینی به حساب می‌آید. از آنجایی که خطرات مختلفی سامانه‌های تأمین آب کشاورزی را تهدید می‌کند، لذا توسعه چارچوب تحلیل ریسک به منظور شناسایی و بررسی میزان تأثیر خطرات پیش‌روی سامانه‌های مذکور در پیش‌برد توسعه پایدار کشاورزی اجتناب‌ناپذیر است. از این رو، تحقیق حاضر برای نخستین بار اقدام به توسعه مدل تحلیل ریسک خطر خشکسالی در سامانه تأمین آب کشاورزی با کمک شبکه بیزین نموده است. ساختار این مدل، که متشکل از گره‌ها و ارتباط بین آنها است، به گونه‌ای طراحی شده که با استفاده از اطلاعات دبی رودخانه، آب رهاسازی شده از سامانه انحراف آب بالادست شبکه، حجم آب زیرزمینی برداشت شده و تقاضای شبکه آبیاری، مقدار ریسک سامانه تأمین را ارزیابی کند. به منظور بررسی توانایی مدل توسعه داده شده، تحلیل ریسک سامانه تأمین آب کشاورزی شبکه آبیاری مدرن رودشت اصفهان مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر ریسک سامانه تأمین آب شبکه رودشت در بازه صفر تا ۵۸/۱۱٪ و به طور متوسط برابر ۳۹/۸۲٪ (برای ۷۸ رویداد مختلف) برآورد شد. نتایج نشان داد که این مدل در دو بخش آموزش و آزمایش به ترتیب با مقدار جذر میانگین مربعات خطا ۰/۰۹ و ۰/۱، ضریب تبیین ۰/۸۵ و ۰/۷۵ و شاخص کل عملکرد ۰/۷۴ و ۰/۸۲ دارای دقت و عملکرد مناسبی در برآورد ریسک است. نتایج این تحقیق و مدل ارائه شده به بهره‌برداران و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا برنامه‌ریزی بهتری برای تخصیص آب آبیاری بر اساس ریسک‌های پیش‌بینی شده در شرایط خشکسالی هیدرولوژیکی ارائه نمایند.

واژه‌های کلیدی: منابع آب سطحی و زیرزمینی، خشکسالی هیدرولوژیکی، تخصیص آب آبیاری

۱- آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آبیاری پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران.

\*- دریافت: فروردین ۱۳۹۹ و پذیرش: خرداد ۱۳۹۹

مقدمه

و همکاران (۲۰۰۴) با ترکیب مفهوم ریسک فازی و روش تحلیل سلسله مراتبی، روشی برای تحلیل ریسک تجمعی آلودگی شبکه‌های توزیع آب ارائه نمودند. روش آنها با استفاده از تئوری فازی، عدم قطعیت‌های موجود در فرآیند تحلیل ریسک را به خوبی بیان می‌کند. نتایج نشان داد که روش تحلیل سلسله مراتبی ابزار مناسبی برای تجمیع ریسک‌های موجود به‌شمار می‌آید. لی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۹) کاربرد رویکرد تحلیل ریسک فازی سلسله مراتبی را در ارزیابی تهدیدات کیفیت آب یکی از سامانه‌های تأمین و توزیع آب شهری در کشور آمریکا مورد بررسی قرار دادند و به تحلیل حساسیت نتایج نسبت به تغییر احتمال و اثر خطرات پرداختند. فارس و زید<sup>۲</sup> (۲۰۱۰) مدلی را بر مبنای دو روش تحلیل سلسله مراتبی و استنتاج فازی ارائه کردند. در این مدل، قوانین فازی با استفاده از توابع عضویت فازی، پارامترهای تأثیرگذار بر شکست لوله‌ها ساخته می‌شوند و نهایتاً بر اساس این قوانین، وضعیت لوله‌ها از نظر ریسک شکست تعیین می‌شوند.

کارآموز و همکاران (۲۰۱۰) آسیب‌پذیری سامانه تأمین آب را در برابر خطرات و تهدیدات طبیعی بررسی و راهبردهای کاهش آن را مورد بحث قرار دادند. سپس داریی‌های خاص به عنوان مثال زیرساخت‌ها، کارمندان، اطلاعات و یا منابع مالی که ممکن است تحت تأثیر تهدیدها قرار گیرند را شناسایی کردند. در نهایت، اقدامات متقابل بر اساس تحلیل کاهش ریسک را توصیه کردند. فنگ و لو<sup>۳</sup> (۲۰۱۱) برای اولین بار از مدل بیرونی-درونی<sup>۴</sup> در محاسبات ریسک فازی منابع آب شهر یوو واقع در کشور چین استفاده کردند. ریسک فازی می‌تواند ریسک چندگانه از جمله ریسک محافظه‌کارانه، ریسک مخاطره‌آمیز<sup>۵</sup> و بیشینه مقدار ریسک باشد. ژانگ<sup>۶</sup> (۲۰۱۲) استفاده از منابع آب در حوضه سونگلیائو<sup>۷</sup> واقع در شمال شرقی چین را بر اساس مقدار آب، کیفیت آب و داده‌های اجتماعی و

آب به‌عنوان عامل و محرک اصلی فعالیت‌های کشاورزی به‌شمار می‌رود. بر همین اساس، در حدود ۷۰ درصد آب مصرفی جهان به آبیاری زمین‌های کشاورزی اختصاص دارد. بسیاری از کشورهای جهان، به‌خصوص کشورهایی که در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارند، برای تولید محصولات کشاورزی به‌شدت به کشت آبی متکی هستند. در ایران، بارندگی کمتر از یک سوم متوسط بارندگی جهان و پتانسیل تبخیر سه برابر پتانسیل تبخیر جهان است. همچنین، تنها ۱۰ درصد کشور بارندگی کافی برای کشاورزی را دریافت می‌کند که این مناطق بیشتر در شمال و غرب ایران واقع هستند. در عین حال، ۸/۴۶ میلیون هکتار اراضی تحت آبیاری و ۹/۶۶ میلیون هکتار اراضی دیم در ایران وجود دارد (گزارش سالانه کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی ICID، ۲۰۱۹-۲۰۱۸). کشاورزی فاریاب کشور از دو منبع اصلی آب زیرزمینی (برداشت غیرمتمرکز آب در محل هر مزرعه) و آب سطحی (اغلب به‌شیوه انحراف آب از رودخانه و منبع ذخیره آب به سامانه‌های انتقال و توزیع آب در سطح شبکه‌های آبیاری مدرن، نیمه مدرن و سنتی) تأمین آب می‌شود.

هرگونه اختلال ناشی از بروز خطرات مختلف در فرآیند تأمین آب کشاورزی، آثار سوئی را به‌همراه دارد. با به‌کارگیری روش‌های تحلیل ریسک، می‌توان عواقب ناشی از هر خطر را شناسایی نمود. هدف اولیه از تحلیل ریسک، برآورد ریسک به‌وسیله شناسایی رویدادهای نامطلوب<sup>۸</sup>، احتمال وقوع رویدادهای ناخواسته<sup>۹</sup> و اثر این رویدادها است. به‌طور کلی، منظور از ریسک، پتانسیل تحقق عواقب سوء و ناخواسته یک واقعه است (نیتو موروته و ژو ویلا<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۱؛ کاپلان و گاریک<sup>۱۱</sup>، ۱۹۸۱).

تاکنون محققان به‌منظور ارزیابی ریسک در سامانه‌های آبی از مدل‌های مختلفی استفاده کرده‌اند. صدیق<sup>۱۲</sup>

7Fares and Zayed  
8Feng and Luo  
9Interior\_Outer Set Model  
10Venture  
11Zhang  
12Songliao

1 Undesired  
2 Unwanted  
3 Morote and Vila  
4 Kaplan and Garrick  
5 Sadiq  
6 Lee

بایچنگ<sup>۶</sup> ارائه کردند. نتایج نشان داد که در دامنه تقاضای آب زراعی، به دلیل افزایش نرخ عرضه آبیاری، تلفات ناشی از خشکسالی کاهش می‌یابد؛ اما با این حال تغییرات آنها متناسب نیست. لی<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۶) چارچوبی را برای تخصیص منابع آب زمین کشاورزی و ارزیابی ریسک در شرایط عدم قطعیت توسعه دادند. چارچوب توسعه یافته امکان تحلیل ریسک کمبود آب آبیاری کشاورزی را با احتمال تجاوز مختلف فراهم می‌کند. زمانی و همکاران (۲۰۱۷) ریسک اثرات تغییر اقلیم بر آب مورد نیاز کشاورزی در دشت رامهرمز تحت دو سناریوی انتشار (A2, B1) برای سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۵۴ را ارزیابی کردند. تغییر اقلیم، آب مورد نیاز خالص سالانه برای تمامی محصولات را به میزان ۱۰-۴ درصد افزایش می‌دهد؛ بنابراین، سناریوی سازگاری با تغییرات اقلیمی وابسته به الگوی کشت و نیاز آبی باید مورد توجه قرار گیرد.

بابایی و همکاران (۲۰۱۸) برای اولین بار یک چارچوب برای ارزیابی کفایت، عدالت و راندمان توزیع و تحویل آب و ارزیابی ریسک تحویل در سامانه انتقال و تحویل آب کشاورزی ارائه کردند. روش تحلیل درخت خطای فازی<sup>۷</sup> (FFTA) برای ارزیابی ریسک «عدم امکان تأمین و تحویل» استفاده شد. عروجلو و همکاران (۲۰۱۸) برای اولین بار، چارچوب مدیریت ریسک جامع برای سامانه انتقال و توزیع آب کشاورزی را از طریق یک روش سلسله مراتبی فازی توسعه دادند. مونتاگودو<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۹) یک وب سایت آنلاین (D-Risk) را برای کمک به بنگاه‌های<sup>۹</sup> کشاورزی طراحی کردند که ریسک خشکسالی موجود را درک کرده و از تصمیم‌گیری مستحکم‌تر در مورد تغییرات آینده در برنامه‌ریزی محصولات و سرمایه‌گذاری در زیرساخت منابع آب پشتیبانی می‌کند. بررسی سابقه تحقیق نشان می‌دهد که به-کارگیری روش‌ها و مدل‌های تحلیل ریسک بیشتر معطوف

اقتصادی در سال‌های ۱۹۹۹-۲۰۰۶ تحلیل کردند. بر این اساس، سه عامل مشترک (به عنوان مثال، تقاضای بالای آب، منابع آب زیاد و آب با کیفیت نامناسب) توسط تحلیل فاکتورها به منظور توزیع ریسک منابع آب در منطقه مورد مطالعه تعیین شد.

روزبهرانی و همکاران (۲۰۱۳) مدلی با رویکرد تحلیل ریسک سلسله مراتبی فازی جهت تحلیل ریسک سامانه‌های آب شهری شامل بخش تأمین، تصفیه و توزیع به صورت یکپارچه ارائه کردند. در این مقاله، کمیت و کیفیت آب به‌طور همزمان در نظر گرفته شد. اجزای مختلف و زیر مجموعه‌های این سامانه بر اساس مقادیر ریسک برآورد شده، رتبه‌بندی شدند. گین و جیوپونی<sup>۱</sup> (۲۰۱۵) ارزیابی پویایی از ریسک ناشی از کمبود آب در حوضه رودخانه برهماپاترا واقع در هند، منطقه‌ای که تحت تأثیر تغییر اقلیم و جمعیت زیاد است را ارائه کردند. رویکرد ارائه شده برای ارزیابی کمبود آب تلفیقی از رویکرد سیستم پیچیده اجتماعی-اکولوژیک و رویکرد مشارکتی بود. در انتها، گزینه‌های مناسب سازگاری به صورت سازه‌ای و غیرسازه‌ای شناسایی شدند. لیو<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۷) روش تحلیل ریسک سلسله مراتبی سامانه‌های آب شهری را به-صورت یکپارچه با استفاده از دو رویکرد فازی و درخت خطا به‌کار گرفته و از مدل شی‌گرا برای شبیه‌سازی سامانه استفاده نموده‌اند. عنبری و همکاران (۲۰۱۷) مدلی برای محاسبه احتمال رویداد شکست بخشی از شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهر تهران با استفاده از شبکه بیزین<sup>۳</sup> (BN) ارائه کردند. عدم قطعیت خطر لوله فاضلاب را از ادغام احتمال و پیامدهای مقادیر خرابی با استفاده از سیستم استنتاج فازی به‌دست آوردند. سرانجام، فاضلاب روها را در دسته‌بندی-های مختلف از لحاظ ریسک تقسیم‌بندی کردند. سان<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۵) یک روش برای تحلیل ریسک و ترکیبی از وقایع خشکسالی را در سطوح مختلف آبیاری در شهر

6Li

7Fuzzy Fault Tree Analysis Method

8Monteagudo

9 Enterprises

1Gain and Giupponi

2Liu

3Bayesian Network

4Sun

5Baicheng

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

مدل توسعه داده شده در یک سامانه تأمین آب کشاورزی پیاده‌سازی شد. سامانه مذکور در حوضه آبریز زاینده‌رود واقع است. منبع تأمین کننده آب در این حوضه، نزولات آسمانی و رواناب ناشی از ذوب برف و چشمه‌ها و تونل‌های انتقال آب کوهرنگ می‌باشند که در مجموع، رودخانه زاینده‌رود را به وجود آورده‌اند. این رودخانه حوضه آبخیز زاینده‌رود را زهکش نموده و به تالاب گاوخونی ختم می‌شود. شبکه‌های آبیاری متعددی در این منطقه وجود دارند که شبکه مدرن رودشت شمالی و جنوبی به‌عنوان آخرین شبکه می‌باشد.

بخش شمالی شبکه آبیاری رودشت به‌عنوان سامانه انتقال و توزیع آب کشاورزی مورد مطالعه این تحقیق انتخاب شده است. رودشت آخرین دشتی است که از زاینده رود آبیاری می‌کند. لذا، تحت نوسانات دبی این رودخانه قرار می‌گیرد که نوسانات مداوم و شدید دبی در سراب کانال و در نتیجه عملکرد نامطلوب شبکه را به همراه دارد. در اثر این عملکرد نامطلوب، آبیگرهای انتهایی شبکه دبی کمتری از دبی مورد نیاز خود دریافت می‌کنند و گاهی هم آبیگرهای انتهایی با آب مازاد بر سهمیه خود روبه‌رو می‌شوند که در اثر عدم بهره‌برداری باعث اتلاف آب می‌شوند. منبع تأمین آب شبکه رودشت از سد انحرافی رودشت به ظرفیت ۵۰۰۰۰ مترمکعب می‌باشد. پلان شبکه آبیاری رودشت در شکل ۱ نشان داده شده است. در شبکه آبیاری رودشت عمدتاً گندم و جو و در کنار آن محصولات ذرت علوفه‌ای، یونجه و گلرنگ کاشت می‌شوند. طبق آخرین آمار و اطلاعات موجود، سطح خالص قابل آبیاری شبکه آبیاری و زهکشی رودشت مجموعاً ۴۲'۰۰۰ هکتار و حجم آب ورودی به شبکه ۸۲/۲۳ میلیون مترمکعب در سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ است که راندمان انتقال آن برابر با ۷۵ درصد است (گزارش سازگاری با کم‌آبی استان اصفهان، ۱۳۹۸).

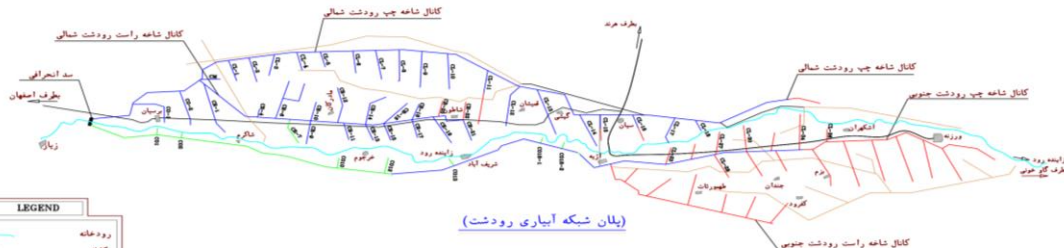
به سامانه‌های توزیع آب شهری، تصفیه‌خانه‌ها، سامانه‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری و سامانه‌های توزیع آب کشاورزی بوده است. این پژوهش برای اولین بار اقدام به توسعه مدل تحلیل ریسک خشکسالی سامانه‌های تأمین آب کشاورزی با استفاده از مدل شبکه بیزین نموده است که نقش انکارناپذیری در توسعه پایدار بخش کشاورزی کشور ایفا می‌نماید. با توجه به اهمیت بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگترین مصرف‌کننده آب و یکی از تأثیرگذارترین فعالیت‌ها در اقتصاد ایران، نیاز است تصمیم‌گیران و بهره‌برداران شبکه بیش از پیش از شرایط حاکم بر شبکه آبیاری اطلاع پیداکنند. از طرفی، شبکه‌های آبیاری در ایران به دلیل اقلیم منطقه اکثراً با خطر خشکسالی مواجه هستند؛ بنابراین، به‌منظور تصمیم‌گیری در این شرایط، به مدل‌های تحلیل ریسک خشکسالی نیاز است که بتوانند وضعیت شبکه را به‌درستی نشان دهند. در این تحقیق، ریسک سامانه تأمین آب کشاورزی با استفاده از شبکه بیزین ارائه شده است.

شبکه بیزین دارای نقاط قوت بسیاری است. این روش، توانایی در نظر گرفتن عدم قطعیت را دارد. همچنین، از آنجایی که اصولاً مقدار داده‌ها یک عامل محدود کننده در مدل‌سازی به حساب می‌آید، شبکه‌های بیزین می‌توانند با هر مقدار اطلاعات مدل‌سازی را انجام دهند. همچنین، معمولاً در مدل‌سازی سامانه‌های پیچیده طبیعی با فقدان اطلاعات در یک یا چند پارامتر روبرو هستیم. پس از توسعه و به‌منظور بررسی توانایی مدل توسعه داده شده، تحلیل ریسک سامانه تأمین آب شبکه آبیاری مدرن رودشت، واقع در بخش جنوب شرقی استان اصفهان، مورد بررسی قرار گرفت و چگونگی کاربرد این مدل بیزین ارزیابی ریسک، بررسی و دقت عملکرد آن ارائه شد.

نوع	شبکه آبیاری رودست شمالی			شبکه آبیاری رودست جنوبی		
	اصلی	فرعی	جمع	اصلی	فرعی	جمع
کانالهای آماده بهره‌برداری	۸۱٫۳۰۰ km	۶۱٫۰۵۰ km	۱۴۲٫۳۵۰ km	۳۳ km	-	۳۳ km
کانالهای در دست اجرا	-	۸٫۷۹۰ km	۸٫۷۹۰ km	۲۸ km	۲٫۹۰۰ km	۳۰٫۹۰۰ km
کانالهای اجرا نشده	-	-	-	۲۳ km	۷۹٫۸۳۰ km	۱۰۲٫۸۳۰ km



(پلان موقعیت منطقه رودست)



(پلان شبکه آبیاری رودست)

LEGEND	
	رودخانه
	کانال
	جاده
	زمنگی
	کانالهای آماده بهره‌برداری
	کانالهای در دست اجرا
	کانالهای اجرا نشده

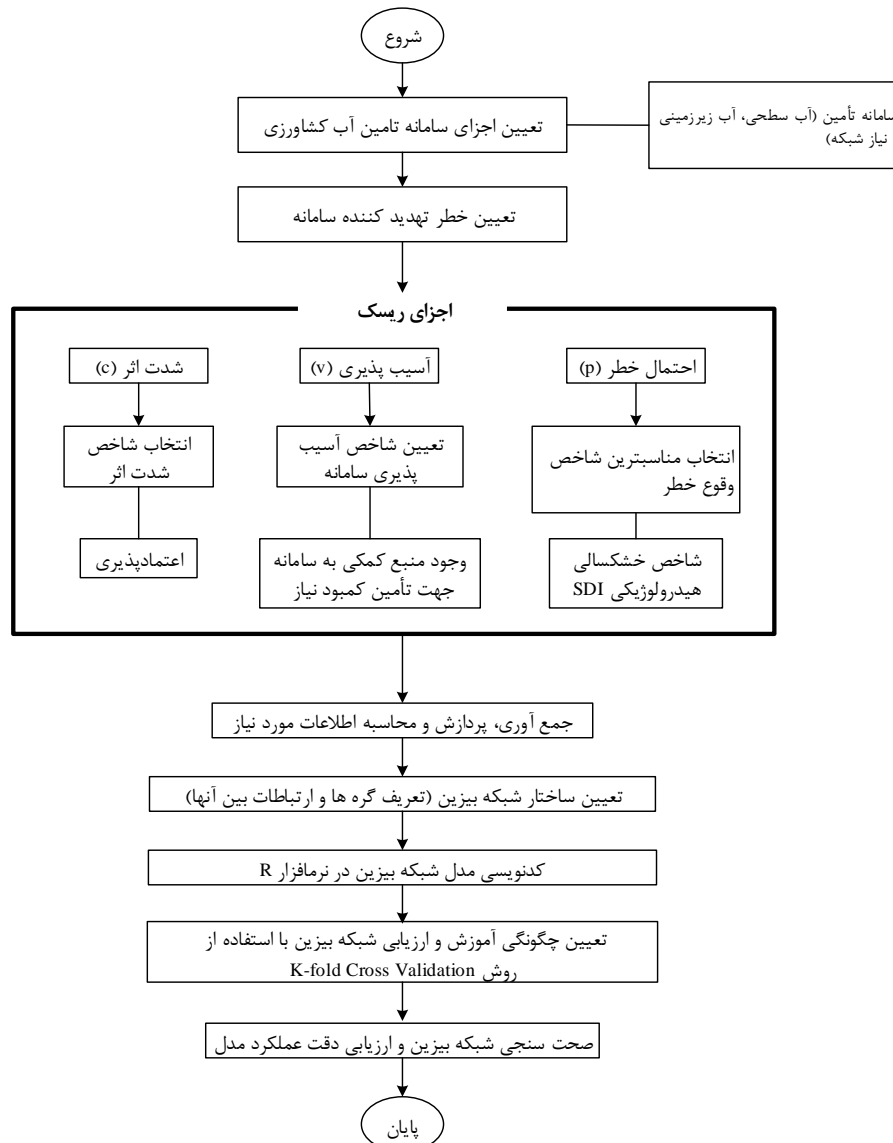
شکل ۱- پلان شبکه آبیاری رودست (مهندسیین مشاور زاینده‌آب، ۱۳۸۳)

### محاسبه ریسک

به منظور محاسبه ریسک، ابتدا باید خطر یا خطراتی که سامانه را تهدید می‌کنند مشخص شود. به طور کلی، خطرات را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی کرد: دسته اول، خطرات طبیعی مانند زلزله، سیل، خشکسالی و طوفان هستند که به صورت غیرمنتظره رخ می‌دهند و انسان روی آنها کنترلی ندارد. دسته بعدی، خطرات غیرطبیعی یا انسان-ساز، مانند بمب‌گذاری، تخریب کانال‌ها و حمله نظامی هستند که با هدف تخریب و برهم‌زدن نظم سامانه رخ می‌دهند. دسته آخر، خطرات عملکردی، مانند قطع برق، نشت و آلودگی منابع آب هستند که بر اساس ساختار نامناسب زیرساخت سامانه، طراحی غیراصولی و یا عملیات بهره‌برداری و نگهداری ناصحیح رخ می‌دهد.

### مدل تحلیل ریسک خشکسالی

در تحقیق حاضر، به منظور ارائه ساختار تحلیل ریسک سامانه تأمین آب کشاورزی از روش BN استفاده شده است. این پژوهش شامل قسمت‌های مختلفی است که در شکل ۲ روند نمای کلی آن نشان داده شده است. در ابتدا اجزای سامانه با توجه به منطقه مطالعاتی شناسایی می‌شود. هر سامانه از اجرای گوناگونی تشکیل شده از جمله: رودخانه بالادست شبکه، سامانه انحراف آب بالادست شبکه آبیاری، تقاضای آب شبکه با توجه به الگوی کشت و وسعت اراضی فاریاب، وجود منابع آب زیرزمینی مانند چاه‌ها که کشاورزان از آنها برداشت می‌کنند. بعد از شناسایی سامانه در گام بعد ریسک سامانه با توجه به اجزای آن محاسبه می‌شود.



شکل ۲- روند نمای مراحل محاسبه ریسک سامانه تأمین آب کشاورزی

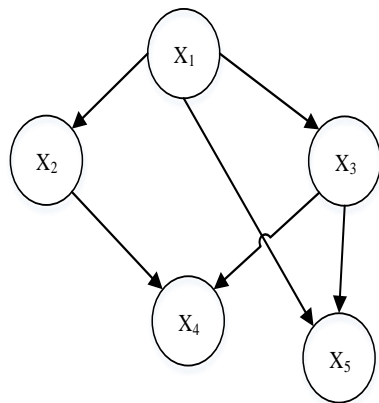
شاخص‌های اجتماعی، اقتصادی و فنی را تعریف کرد و میزان شدت اثر هر خطر را محاسبه کرد. در این تحقیق، شدت اثر به کمک شاخص‌های فنی در نظر گرفته می‌شود. چگونگی محاسبه هر جزء ریسک، با استفاده از شاخص‌های موجود و یا با توجه به مفهوم آن مشخص می‌شود. سپس، با توجه به منطقه مطالعاتی، اطلاعات هر پارامتر جمع‌آوری و محاسبه می‌شود. بعد از تعریف کلی اجزای مدل و آماده‌سازی بانک اطلاعات، مدل‌سازی به کمک شبکه بیزین انجام می‌شود. لازم به توضیح است که توسعه این مدل در محیط نرم‌افزار R انجام شده است. این مدل با اطلاعات

در مرحله بعدی، سه جزء اصلی ریسک شامل احتمال وقوع خطر<sup>۱</sup>، آسیب‌پذیری<sup>۲</sup> سامانه و اثرات<sup>۳</sup> باید تعیین شوند. به منظور برآورد احتمال وقوع خطر، با توجه به ماهیت آن، احتمال رخداد با استفاده از شاخص‌هایی اندازه‌گیری می‌شود. به عنوان مثال، احتمال رخداد خطر خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی جریان، هیدرولوژیک، هواشناسی و... قابل برآورد است. منظور از پارامتر آسیب‌پذیری، آسیب‌پذیری ذاتی هر جزء می‌باشد. به این معنا که سامانه تا چه میزان نسبت به خطر رخ داده مقاومت دارد. در تعیین پارامتر شدت اثر به‌طور کلی می‌توان

3 Consequent

1 Probability of Hazard Occurrence  
 2 Vulnerability

می‌شود.



$$P(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = P(X_5 | X_3, X_4) P(X_4 | X_3, X_2) P(X_3 | X_1) P(X_2 | X_1) P(X_1)$$

شکل ۳- شبکه بیزین

هر شبکه بیزین از سه جزء اصلی: مجموعه‌ای از گره‌ها (متغیرهای سامانه مورد بررسی)، مجموعه‌ای از کمان‌ها (روابط سببی بین متغیرها) و مجموعه‌ای از احتمالات تشکیل شده است. به‌طور کلی، گره‌ها والد یا فرزند هستند. هر گره فرزند می‌تواند توسط چندین والد تولید شده باشد. گره‌هایی که قبل از آنها گره دیگری در گراف وجود دارد با توزیع احتمال شرطی تعریف می‌شوند. در غیر این صورت، با احتمال آغازین<sup>۴</sup> بیان می‌شود. پایین-ترین بخش در شبکه بیزین از طریق قانون احتمال کل<sup>۵</sup> دست می‌آید. احتمالات مرتبط با بخش‌های بالایی شبکه براساس قانون بیزین می‌باشند. بعد از آماده‌سازی ساختار شبکه بیزین نوبت به آموزش پارامتری است که از الگوریتم-های متفاوتی از جمله بیشینه احتمال<sup>۶</sup> (EM) می‌توان استفاده کرد (کاردان مقدم و روزبهانی (۱۳۹۴)).

### روش اعتبارسنجی متقاطع

بعد از آماده‌سازی ساختار و آموزش پارامتری مدل بیزین، می‌بایست این مدل واسنجی شود و مورد اعتبارسنجی قرار گیرد. در این راستا، روش‌های متفاوتی وجود دارد که یکی از این روش‌ها روش اعتبارسنجی

پردازش شده از مراحل قبل آموزش دیده و مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار می‌گیرد. چگونگی دقت مدل در محاسبه میزان ریسک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

### شبکه بیزین

شبکه بیزین یک الگوی نموداری احتمالاتی است که مجموعه‌ای از متغیرها و احتمالات مربوط به هر یک را نشان می‌دهد. این شبکه یک گراف مستقیم و غیرچرخه‌ای است که در آن گره‌ها در حکم متغیرهای مسئله هستند. ساختار یک شبکه بیزین در واقع یک نمایش نموداری از اثرات متقابل متغیرهایی است که باید الگوبندی شوند. این ساختار علاوه بر اینکه کیفیت رابطه بین متغیرهای مسئله را نشان می‌دهد، کمیت ارتباط بین این متغیرها را نیز به نمایش می‌گذارد. مبنای این روش، احتمالات وابسته (قانون بیز) است که توسط توماسبیز بنا گذاشته شده است (بیز (۱۷۶۳)). در شبکه بیزین برای محاسبه توزیع احتمال توأم مجموعه‌ای از متغیرها از رابطه زیر استفاده می‌شود (نیلسن و جنسن)<sup>۲</sup> (۲۰۰۹):

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

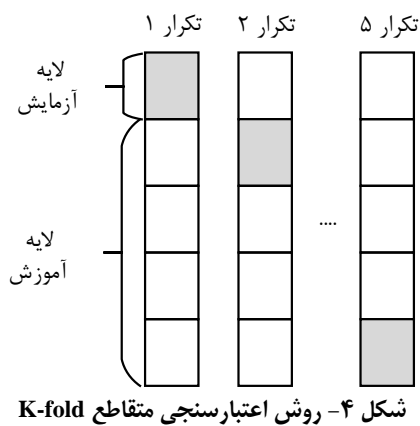
که در آن:

$X_i$  = متغیر  $i$ ام موجود در شبکه است. مثالی از توزیع توأم در شکل ۳ ارائه شده است. هر متغیری از فضای توأم به-صورت یک گره در BN نمایش داده شده و برای هر متغیر ارتباط بین والدین و فرزندان با استفاده از کمان‌هایی ترسیم می‌شود. همچنین، توزیع احتمال هر گره برای والدین بلافصل آن توسط جدول احتمالات شرطی<sup>۳</sup> (PT) ارائه

4 Prior Probability  
 5 Total Probability  
 6 Estimation Maximization Algorithm

1 Bayes  
 2 Nielsen and Jensen  
 3 Conditional Probability Table





مدل تحلیل ریسک سامانه تأمین آب شبکه آبیاری رودشت باتوجه به مطالب ذکر شده، اکنون به ارائه مدل تحلیل ریسک سامانه تأمین آب مطالعه موردی این تحقیق پرداخته می‌شود. خطرات گوناگونی سامانه تأمین آب کشاورزی شبکه آبیاری رودشت را تهدید می‌کند که پس از بررسی میدانی و مصاحبه با مدیران شبکه مشخص شد که مهم‌ترین خطر پیش روی سامانه تأمین آب این شبکه، خطر خشکسالی است. احتمال وقوع این خطر توسط شاخص خشکسالی جریان<sup>۱</sup> (SDI) که یکی از شاخص‌های مهم هیدرولوژیکی است، محاسبه می‌شود. به منظور محاسبه این شاخص، مقادیر دبی ایستگاه هیدرومتری ( $Q$ ) می‌بایست بر توزیع آماری مناسبی برازش داده شود. شوکلا و وود (۲۰۰۸) و نالباتیس و تساکریس (۲۰۰۹) در مطالعاتی نشان دادند که توزیع گاما در حوضه‌های کوچک و توزیع نرمال یا لوگ نرمال دومتغیره برای حوضه‌های بزرگ، مناسب‌ترین برازش هستند. چگونگی محاسبه شاخص خشکسالی جریان در روابط (۲) تا (۴) توضیح داده شده است (شوکلا و وود، ۲۰۰۸). همچنین، توصیف مقادیر شاخص SDI در جدول ۱ اشاره شده‌اند (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳؛ تساکریس و وانجلیس، ۲۰۰۵؛ نالباتیس و تساکریس، ۲۰۰۹).

مقاطع است که با استفاده از این روش برای واسنجی و صحت‌سنجی در مطالعات تال<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۷)، برگمیر و بنیتز<sup>۲</sup> (۲۰۱۲)، برگمیر<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۸) و چل<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۲۰) پیشنهاد شده است. در این روش، ارزیابی مدل به کمک دو گروه مجموعه آموزشی اعتبارسنجی متقاطع<sup>۵</sup> و مجموعه آزمایشی اعتبارسنجی متقاطع<sup>۶</sup> انجام می‌شود. برای کاهش واریانس، چندین مرحله اعتبارسنجی متقاطع با استفاده از مجموعه‌های آموزش و آزمایش انجام می‌گیرد. در نهایت، نتیجه همه مراحل میانگینی برای تخمین صحت و کارایی مدل خواهد بود. براساس شیوه و روش انتخاب مجموعه داده‌های اعتبارسنجی، انواع مختلفی از اعتبارسنجی متقاطع وجود دارد که یکی از عمومی‌ترین انواع آنها اعتبارسنجی متقاطع K-fold است (رودریگز<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۹)؛ ونگ<sup>۸</sup> (۲۰۱۵)). در روش اعتبارسنجی متقاطع K-fold اگر مجموعه داده‌های آموزشی به‌طور تصادفی به  $k$  زیرنمونه یا لایه<sup>۹</sup> با حجم یکسان تقسیم شود، در هر مرحله از فرآیند اعتبارسنجی متقاطع، تعداد  $k-1$  لایه به‌عنوان مجموعه داده آموزشی و یک لایه باقی مانده به‌عنوان مجموعه داده آزمایشی در نظر گرفته می‌شود. به‌عنوان نمونه، همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، با انتخاب  $k=5$ ، تعداد تکرارهای فرآیند اعتبارسنجی متقاطع برابر با پنج خواهد بود و پنج مرتبه مدل آموزش و آزمایش می‌شود. در این روش، همه داده‌های ورودی  $k-1$  مرتبه برای آموزش مدل استفاده می‌شوند و مدل آموزش دیده در تکرارهای مختلف نسبت به تک تک داده‌ها مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

6 Cross Validation Testing Set  
7 Rodriguez  
8 Wong  
9 Fold  
10 Streamflow Drought Index

1 Thall  
2 Bergmeir and Benitez  
3 Bergmeir  
4 Chelle  
5 Cross Validation Training Set



کمبود آب (اختلاف بین مقدار آب سطحی تخصیص یافته و نیاز) طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Cm = \frac{Gw}{De - Re} \quad (6)$$

$$V = 1 - Cm \quad (7)$$

که در آنها:

$Gw$  = حجم برداشت از آب زیرزمینی،  $De$  = مقدار تقاضای آب شبکه کشاورزی،  $Re$  = مقدار آب تخصیص یافته به نیازها از سامانه انحراف آب بالادست به شبکه،  $Cm$  = نسبت کمبود جبران شده توسط آب زیرزمینی و  $V$  = آسیب‌پذیری سامانه.

همانطور که ذکر شد، میزان شدت اثر خطرات تهدید کننده را می‌توان از جوانب گوناگونی مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق، باتوجه به این که ریسک سامانه تأمین آب کشاورزی مورد نظر است، بنابراین شاخص اعتمادپذیری به‌عنوان شاخص شدت اثر ( $C$ ) در نظر گرفته شده. اعتمادپذیری ( $Rel$ ) یعنی احتمال عدم رخداد شکست در بهره‌برداری از سامانه در یک زمان مشخص است. در بیان ریاضی، اعتمادپذیری میزان تأمین نیاز توسط آب تخصیص یافته از بند بالادست شبکه آبیاری است. مقدار این شاخص طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود (یموتوا، ۱۹۸۲).

$$Rel = \frac{De}{Re} \quad (8)$$

$$C = 1 - Rel \quad (9)$$

در نهایت، ریسک مربوط به خطر خشکسالی بعد از تعیین احتمال خطر، آسیب‌پذیری و اثرات آن همانطور که در رابطه زیر نشان داده شده است، محاسبه می‌شود (بارکرو همکاران، ۲۰۰۲؛ تورسو همکاران، ۲۰۰۹).

$$Risk = P \times C \times V \quad (10)$$

که در آن:

$P$  = احتمال وقوع خطر؛  $V$  = آسیب‌پذیری و  $C$  = اثرات. باتوجه به مطالب ذکر شده، گره‌های شبکه بیزین معرفی و روابط بین آنها توضیح داده شد. به‌منظور شفافیت بیشتر،

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^k Q_{i,j} \quad i = 1,2,3, \dots$$

$$j = 1,2,3, \dots, 12 \quad k = 1,2,3, \dots \quad (2)$$

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}) \quad i = 1,2,3, \dots$$

$$k = 1,2,3, \dots \quad (3)$$

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{S_{y,k}} \quad i = 1,2,3, \dots$$

$$k = 1,2,3, \dots \quad (4)$$

که در آنها،  $Q_{i,j}$  = دبی ماه  $j$ ام سال آبی نام،  $V_{i,k}$  = مقدار تجمعی دبی در دوره  $k$  ماهه از سال آبی نام و  $S_{y,k}$  و  $\bar{y}_k$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار داده‌ها هستند.

جدول ۱- رده‌بندی شاخص خشکسالی SDI

مقادیر SDI	شدت خشکسالی SDI
۲ و بیشتر	ترسالی خیلی شدید
۲ تا ۱/۵	ترسالی شدید
۱ تا ۱/۵	ترسالی متوسط
۰/۹۹ تا -۱	نرمال
-۱ تا -۱/۵	خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۲	خشکسالی شدید
-۲ و کمتر	خشکسالی خیلی شدید

پارامتر احتمال خطر ( $P$ ) که یکی از اجزای محاسبه ریسک است، با استفاده از مکمل مقادیر نرمال SDI طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود. در این رابطه، حد بالا ( $max$ ) و حد پایین ( $min$ ) اعداد SDI با توجه به تابع برازش داده شده، به ترتیب بین ۴ و -۴ می‌باشد.

$$P = 1 - \frac{SDI - min}{max - min} \quad (5)$$

از آنجاییکه در این منطقه، از آب زیرزمینی به عنوان منبع آب کمکی برای جبران کمبود ناشی از آب سطحی استفاده می‌شود، لذا میزان برداشت و در دسترس بودن این منبع باعث تغییرات آسیب‌پذیری سامانه نسبت به وقوع خطر خشکسالی می‌شود؛ بنابراین، شاخص آسیب‌پذیری نسبت حجم کمبود آب جبران شده به کل مقدار

مقادیر شاخص‌های RMSE و MAE به صفر و شاخص OI به یک نزدیک باشند، مدل از دقت بالاتری برخوردار است (بایرام و الجیوری، ۲۰۱۶؛ سرزعیم و همکاران، ۲۰۱۷).

$$r^2 = \left( \frac{n \sum RS_{obs,t} RS_{m,t} - (\sum RS_{obs,t})(\sum RS_{m,t})}{\sqrt{[n \sum RS_{obs,t}^2 - (\sum RS_{obs,t})^2][n \sum RS_{m,t}^2 - (\sum RS_{m,t})^2]}} \right)^2 \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (RS_{obs,t} - RS_{m,t})^2}{T}} \quad (12)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^T |RS_{obs,t} - RS_{m,t}| \quad (13)$$

$$OI = \frac{1}{2} \left[ 2 - \frac{RMSE}{RS_{obs,max} - RS_{obs,min}} - \frac{\sum_{t=1}^T (RS_{obs,t} - RS_{m,t})^2}{\sum_{t=1}^T (RS_{obs,t} - \overline{RS_{obs}})^2} \right] \quad (14)$$

که در آنها:

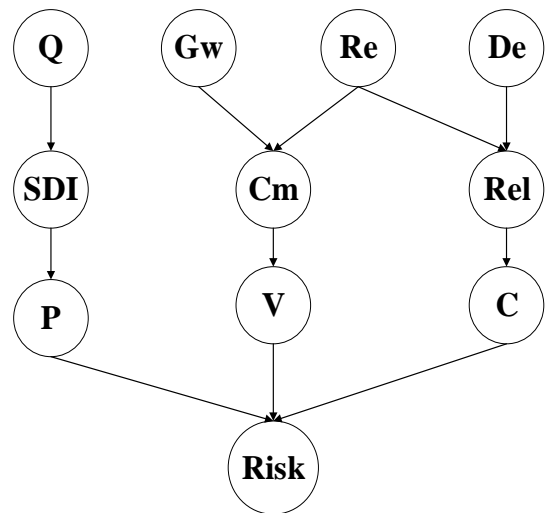
$RS_{obs,t}$  = مقادیر مشاهداتی،  $RS_{m,t}$  = خروجی مدل،  
 $RS_{obs,max}$  و  $RS_{obs,min}$  = بیشینه و کمینه مقادیر مشاهداتی،  
 $\overline{RS_{obs}}$  = میانگین مقادیر مشاهداتی و  $n$  = تعداد داده‌ها است.

#### نتایج و بحث

اطلاعات مورد نیاز به منظور ارزیابی ریسک سامانه تأمین آب کشاورزی رودشت، از منطقه مطالعاتی جمع‌آوری شد. همانطور که اشاره شد، برای محاسبه شاخص خشکسالی به‌عنوان خطر تهدید کننده سامانه، نیاز به اطلاعات دبی رودخانه بالادست شبکه رودشت است. از اطلاعات ایستگاه هیدرومتری پل چوم به‌عنوان اولین ایستگاه بالادست شبکه استفاده شد و مقادیر شاخص خشکسالی SDI با استفاده از اطلاعات دبی محاسبه شد که نتایج آن در شکل (۶-الف) نشان داده شده است. همچنین مقادیر آب تخصیص یافته به تقاضای آب در شبکه در شکل (۶-ب) ارائه شده است که طی انجام این پژوهش از دفتر مطالعات پایه منابع آب ایران شرکت مدیریت منابع آب

شماطیک مدل ارزیابی ریسک سامانه تأمین آب کشاورزی در شکل ۵ نشان داده شده است.

بعد از تعیین ساختار مدل BN و توسعه آن در نرم‌افزار R نیاز است که عملکرد مدل مورد ارزیابی قرار گیرد. دقت و صحت خروجی‌های مدل با شاخص‌های مختلفی قابل ارزیابی است. در این تحقیق، از شاخص‌های متنوعی استفاده شده که یکی از آنها ضریب تعیین ( $R^2$ ) است که در رابطه (۱۱) به آن اشاره شده است. استفاده از ضریب تعیین مقدار تطابق الگوی خروجی مدل با داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد. به این صورت که اگر خط رگرسیونی بین مقادیر خروجی مدل نسبت به مقادیر داده‌های مشاهداتی رسم شود، هرچه قدر شیب این خط به یک نزدیک باشد و مقدار  $R^2$  نزدیک به یک باشد عملکرد مدل دقیق‌تر بوده است.



شکل ۵- شماطیک مدل ارزیابی ریسک سامانه تأمین کشاورزی

بجز شاخص  $R^2$  که صحت الگوی خروجی مدل را تایید می‌کند، نیاز به شاخص‌های دیگری برای بررسی دقت اعداد خروجی محاسبه شده نسبت به مقدار مشاهداتی آن است. برای این منظور از شاخص‌های جذر مجموع مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE)، میانگین خطای مطلق<sup>۲</sup> (MAE) و شاخص کل عملکرد مدل<sup>۳</sup> (OI) استفاده شده است. چگونگی محاسبه هر شاخص در روابط (۱۲) تا (۱۴) اشاره شده است. باتوجه به فرمولاسیون این شاخص‌ها، هر چه قدر

3 Overall Index of Model Performance  
 4 Bayram and Al-Jibouri

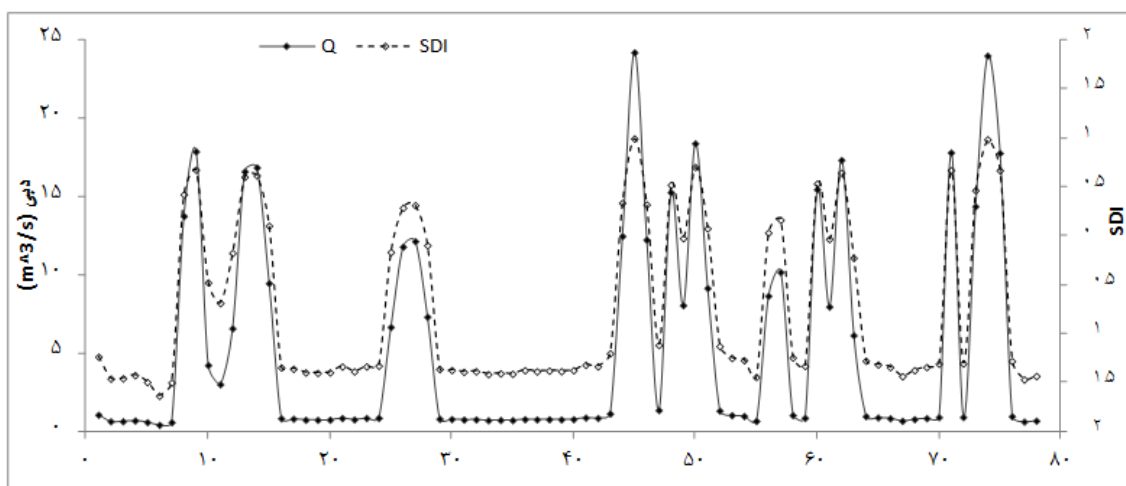
1 Root Mean Squares Error  
 2 Mean Absolute Error

است. بیشترین مقدار برآورد شده برای ریسک شبکه نشان می‌دهد که مقدار احتمال خطر ( $P$ ) برابر  $0/7$  و آسیب‌پذیری سامانه ( $V$ ) در این شرایط برابر  $0/8$  است و شدت اثر ( $C$ ) این شرایط بر سامانه یک است. در این شرایط سامانه در خشکسالی شدید ( $SDI = -1/6$ ) به سر می‌برد که حتی میزان بهره‌برداری از آب زیرزمینی ( $Cm = 0/17$ ) کمک چندانی به شبکه نکرده و شبکه کاملاً آسیب‌پذیر است؛ بنابراین، مقدار ریسک سامانه تأمین در این شرایط زیاد است.

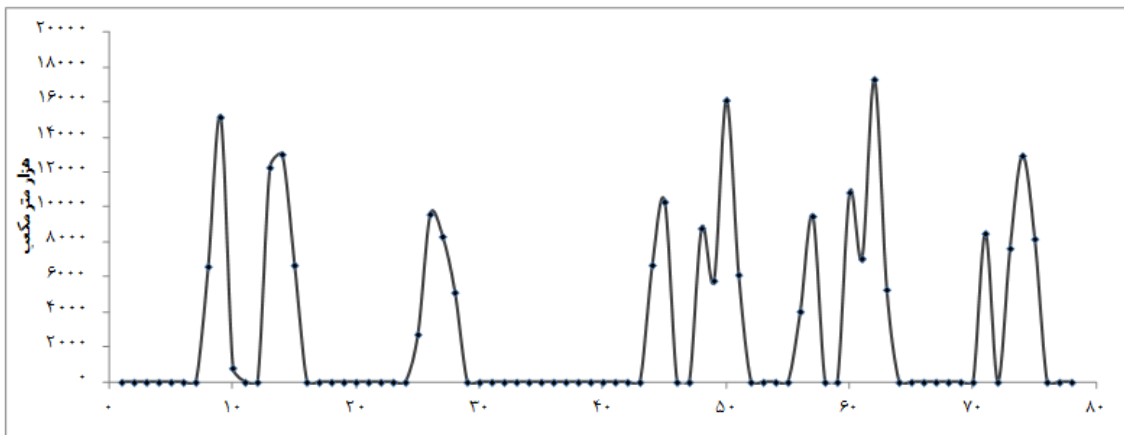
مدل تحلیل ریسک سامانه تأمین آب کشاورزی رودشت، با به‌کارگیری مدل BN، در محیط نرم‌افزار برنامه-نویسی R توسعه داده شد. سپس ساختار شبکه بیزین از جمله گره‌ها و ارتباطات بین آنها طبق شکل ۳ طراحی گردید. در ادامه، با استفاده از روش اعتبارسنجی مقاطع K-fold مجموعاً ۷۸ سری اطلاعات از سالهای ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۶ در این تحقیق به دو گروه آموزش و آزمایش تقسیم‌بندی شدند. در این تحقیق و مطابق تحقیق دوس ساتوس و همکاران (۲۰۲۰)، مقدار  $k$  برابر پنج در نظر گرفته شد. این انتخاب به این معنی است که داده‌ها به پنج دسته تقسیم شده و مدل پنج مرتبه آموزش می‌بیند که در هر تکرار یکی از دسته‌ها به‌عنوان مجموعه آزمایش در نظر گرفته می‌شود. نتایج ارزیابی عملکرد مدل بیزین در جدول ۳ برای دو قسمت آموزش و آزمایش به ازای هر تکرار نشان داده شده است.

ایران و شرکت آب منطقه‌ای اصفهان جمع‌آوری شد. به منظور محاسبه تقاضای آب شبکه، به اطلاعات مقادیر سطح زیر کشت شبکه رودشت شمالی، میزان راندمان کاربرد آب در مزرعه که برابر  $49/6$  درصد است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۵) و نیاز خالص آبی لازم است که این اطلاعات از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان جمع‌آوری شده است. با استفاده از این اطلاعات مقادیر نیاز به صورت ماهانه محاسبه می‌شود. همچنین مقادیر حجم برداشت از آب زیرزمینی به کمک اطلاعات برداشت شده از چاه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

بعد از انجام محاسبات لازم، مقادیر ریسک سامانه تأمین آب کشاورزی رودشت برآورد و در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، کم‌ترین مقدار ریسک سامانه صفر است که این بدین معنی است که میزان آب در دسترس که ترکیبی از آب تخصیص یافته از سامانه انحراف بالادست شبکه و حجم آب زیرزمینی است، تقاضای شبکه را تأمین کرده است. به بیان دیگر تقاضا یا از میزان آب تخصیص یافته تأمین شده و یا بعد از تخصیص آب از آب زیرزمینی به‌عنوان منبع کمکی، تقاضا شبکه کامل تأمین شده است. در این شرایط خشکسالی تأثیرگذاری بر سامانه تأمین نداشته و عملاً سامانه، عملکرد موفق داشته است؛ اما میزان ریسک همیشه صفر نبوده و برای این شبکه اعداد مختلفی در بازه صفر تا  $58/11$  درصد داشته که به‌طور متوسط برابر  $39/82$  درصد



(الف)

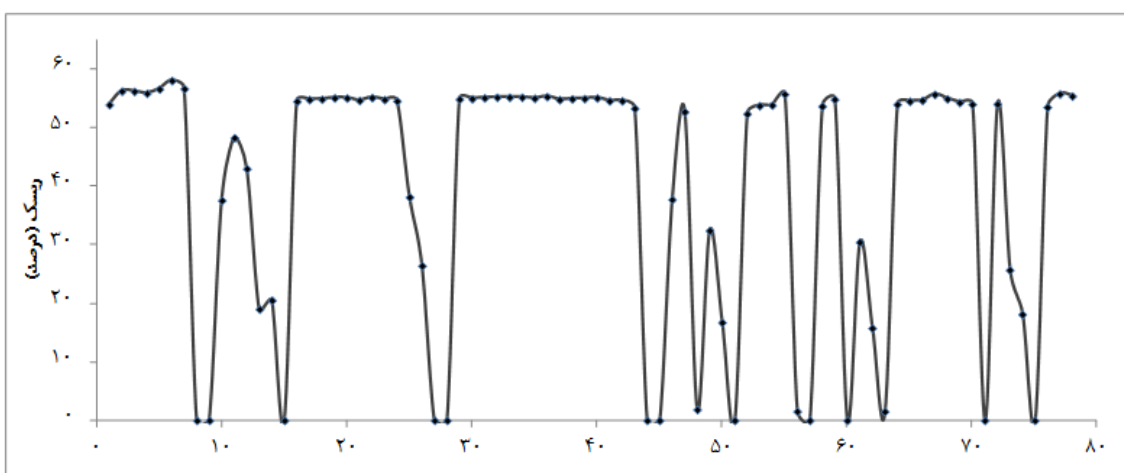


(ب)

شکل ۶- الف- اطلاعات دبی ایستگاه هیدرومتری پل چوم (Q) و مقادیر شاخص خشکسالی SDI محاسبه شده در این پژوهش؛ ب- حجم آب تخصیص یافته براساس تقاضای آب در شبکه

جدول ۲- اطلاعات سطح زیر کشت، نیاز خالص آبیاری و متوسط برداشت از آب زیرزمینی در منطقه رودشت شمالی (آب منطقه‌ای اصفهان، ۹۴-۱۳۹۳)

آب زیرزمینی (هزار متر مکعب)	گندم					سطح زیر کشت (هکتار)	نیاز خالص آبیاری (m <sup>3</sup> /ha)
	چغندر قند	گلرنگ	یونجه	جو	۱۰۳۴۳		
۲۷۲/۴	۱۷۷/۰	.	۱۷۷/۰	.	.	مه‌ر	
۹۲۸/۸	.	.	۲۶۲/۸	۳۵۴/۸	۴۳۱/۸	آبان	
۱۴۹۰/۳	.	.	.	۷۸۶/۰	۶۴۷/۹	آذر	
۹۵۴/۵	.	.	.	۴۵۸/۰	۴۲۷/۰	دی	
۱۸۵۲/۱	.	.	.	۹۴۷/۰	۸۲۶/۶	بهمن	
۲۰۳۲/۴	.	.	۸۶۸/۵	۹۶۳/۴	۸۴۱/۲	اسفند	
۶۳۴۵/۱	۱۸۷۷/۶	۳۶۳/۱	۱۸۷۷/۶	۲۵۳۸/۱	۲۶۱۴/۷	فروردین	
۶۹۷۵/۴	۲۷۵۷/۱	۲۸۴۶/۵	۲۷۵۷/۱	۱۸۷۳/۹	۳۰۱۸/۰	اردیبهشت	
۱۲۱۶/۵	۳۸۴۸/۲	۳۹۵۰/۴	۳۸۴۸/۲	.	۱۱۵/۰	خرداد	
۹۷۳/۹	۳۸۲۸/۱	۳۷۱۸/۶	۳۸۲۸/۱	.	.	تیر	
۵۷۳/۳	۳۰۷۴/۵	۸۹۰/۴	۳۰۷۴/۵	.	.	مرداد	
۴۳۰/۱	۲۶۹۳/۲	.	۲۶۹۳/۲	.	.	شهریور	



شکل ۷- مقدار ریسک ماهانه محاسبه شده سامانه تأمین آب کشاورزی رودشت توسط مدل BN

جدول ۳- نتایج واسنجی و صحت‌سنجی با داده‌های آموزش و آزمایش مدل BN ارزیابی ریسک خشکسالی سامانه تأمین آب کشاورزی رودشت

تکرار	آموزش				آزمایش			
	OI	MAE	RMSE	R <sup>2</sup>	OI	MAE	RMSE	R <sup>2</sup>
۱	۰/۸۲	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۸۳	۰/۶۷	۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۷۰
۲	۰/۸۰	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۸۲	۰/۸۰	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۷۷
۳	۰/۹۸	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۷۹
۴	۰/۸۰	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۸۱	۰/۸۲	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۷۸
۵	۰/۸۰	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۸۰	۰/۶۳	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۶۵
میانگین	۰/۸۵	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۸۲	۰/۷۵	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۷۴

آبیاری در هنگام مواجهه با خطر خشکسالی که در منطقه مورد مطالعه نیز زیاد رخ می‌دهد، استفاده کنند و برای بهترین اقدام در شرایط ریسک مختلف تصمیم‌گیری کنند. در واقع این ابزار قادر است به عنوان پیش‌بینی‌کننده ریسک خشکسالی با در نظر گرفتن ورودی‌هایی همچون میزان آب سطحی و زیرزمینی در دسترس و همچنین نیاز آبی مورد استفاده بهره‌برداران قرار گیرد.

#### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این تحقیق، مدلی برای تحلیل ریسک خشکسالی هیدرولوژیکی در سامانه‌های تأمین آب کشاورزی به‌وسیله شبکه بیزین توسعه داده است. این مدل از پارامترها و گره-های متنوعی تشکیل شده است که با استفاده از کمان‌هایی به یکدیگر وصل می‌شوند. بعد از طراحی مدل BN 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. شبکه مدرن آبیاری رودشت به-عنوان منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد. به‌طور کلی خطرات مختلفی این سامانه را تهدید می‌کند. ولی باتوجه به بررسی‌های انجام شده، در این تحقیق خطر خشکسالی به‌عنوان مهمترین خطر تهدیدکننده سامانه تأمین آب کشاورزی در این منطقه انتخاب و تحلیل ریسک نسبت به این خطر بررسی شد. نتایج، ریسک خشکسالی سامانه تأمین آب کشاورزی رودشت را بازه‌ای بین صفر تا ۵۸/۱۱٪ نشان داد. نتیجه اجرای این مدل بعد از آموزش پارامتری و

نتایج برای داده‌های آموزش در شاخص‌های RMSE و MAE برابر ۰/۰۹ و ۰/۰۷ و برای داده‌های آزمایش به‌ترتیب برابر ۰/۱ و ۰/۰۸ است. هرچقدر شاخص‌های RMSE و MAE به صفر نزدیک باشند، به معنی این است که مدل از دقت بالاتری برخوردار است. مقادیر این دو شاخص چه در تکرارهای مختلف و چه در میانگین، اعداد کوچکی هستند. همچنین شاخص‌های R<sup>2</sup> و OI برای مجموعه آموزشی برابر ۰/۸۵ و ۰/۸۲ است و برای مجموعه آزمایش به‌ترتیب برابر با ۰/۷۵ و ۰/۷۴ است. همانطور که اشاره شد این شاخص‌ها هرچقدر به یک نزدیک باشند به معنی دقت بالاتر مدل است که شاخص‌های محاسبه شده اعداد قابل قبولی را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده، مجموعه آموزشی در همه شاخص‌ها عملکرد بهتری نسبت به مجموعه آزمایشی داشته است. عملکرد بهتر مجموعه آموزش به دلیل این است که مدل شبکه بیزین با مجموعه آموزشی مورد آموزش قرار می‌گیرد و سپس نسبت به همان مجموعه ارزیابی می‌شود. ولی در گام دوم عملکرد شبکه بیزین با استفاده از مجموعه آزمایش که تا قبل از آن به مدل داده نشده و برای مدل اطلاعات ناشناخته‌ای بحساب می‌آید مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. عملکرد دقیق مدل نسبت به داده‌های آزمایش که داده ناشناخته هستند، نشان می‌دهد که این مدل توسعه یافته، توانایی تحلیل ریسک خشکسالی شبکه آبیاری را دارد؛ بنابراین تصمیم‌گیران و بهره‌برداران شبکه می‌توانند از این مدل برای شفاف‌سازی شرایط شبکه

داده‌شده، قابل استفاده برای سامانه‌هایی که تحت تهدید چندین خطر هستند نیز کاربرد دارد و تنها لازم است با توجه به نوع سامانه و خطرات تهدید کننده، پارامترهای محاسبه اجزای ریسک تعریف و ارتباطات منطقی بین آنها برقرار شود. در چنین شرایطی این مدل برای سامانه‌های تأمین آب کشاورزی و برای خطرهای مختلف از جمله سیل، نشت و آلودگی منابع آب کاربرد دارد. یکی دیگر از فواید این مدل قابلیت ارتباط آن با نتایج مدل‌های تحلیل خشکسالی ارایه شده توسط دیگر سازمان‌های ذیربط مانند سازمان هواشناسی در جهت مدیریت بهتر سامانه‌های کشاورزی در حوضه‌های آبریز مختلف کشور می‌باشد. همچنین می‌توان در مطالعات آینده این مدل *BN* تحلیل ریسک را برای سایر سامانه‌های پیچیده کشاورزی با در نظر گرفتن تأثیر خطرات مختلف موجود، از نقطه نظر اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی نیز بررسی کرد. لازم به ذکر است که ادامه این تحقیق به توسعه این مدل برای بخش سامانه توزیع آب کشاورزی تمرکز خواهد یافت.

آزمایش نشان می‌دهد که عملکرد مدل برای داده‌های آموزشی در شاخص‌های  $R^2$  و  $RMSE$  برابر  $0/85$  و  $0/09$  است و این شاخص‌ها برای داده‌های آزمایش به ترتیب برابر  $0/75$  و  $0/1$  است. تمامی شاخص‌ها نشان می‌دهند که مدل با دقت بالایی اجرا شده و نتایج آن قابل قبول می‌باشد. لذا با توجه به این نتایج، این مدل بیزین برای ارزیابی ریسک سامانه‌های تأمین آب کشاورزی کاربرد دارد. با استفاده از این مدل احتمالاتی، بهره‌بردار سامانه می‌تواند در هنگام بروز خشکسالی ناشی از کمبود رواناب به صورت شفاف‌تر و دقیق‌تر از وضعیت شبکه آبیاری اطلاع پیدا کند و به تبع آن تصمیمات صحیح‌تری در خصوص تأمین و تخصیص آب بگیرد. در واقع در هر گام زمانی و با در اختیار داشتن اطلاعات حداقلی از جمله دبی رودخانه، برداشت آب و نیاز آبی و با استفاده از مدل ارایه شده به تحلیل شدت و آسیب پذیری سامانه در برابر خشکسالی هیدرولوژیکی مبادرت نموده و بر اساس آن برنامه ریزی لازم را برای مدیریت توامان آب‌های سطحی و زیرزمینی انجام دهند. لازم به ذکر است که این مدل *BN* تحلیل ریسک توسعه

#### فهرست منابع

۱. عباسی، ف.، سهراب، ف.، عباسی، ن. (۱۳۹۵). "ارزیابی وضعیت راندمان آب آبیاری در ایران." تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۷(۶۷)، ۸۷-۷۴.
۲. کاردان مقدم، ح. و روزبهانی، ع. (۱۳۹۴). "ارزیابی مدل شبکه‌های بیزین در پیش‌بینی ماهانه سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان بیرجند)." مدیریت آب و آبیاری، ۵(۲)، ۱۳۹-۱۵۱.
۳. هاشمی شاهدانی، س. م. (۱۳۹۵) "بررسی میزان مطلوبیت بهره‌برداری کانال‌های اصلی آبیاری از نقطه نظر توزیع عادلانه آب در شرایط کم‌آبی در سامانه کنترل بالادست و کنترل پایین دست (مطالعه موردی، کانال اصلی شاخه شمالی شبکه آبیاری رودشت)" وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، گروه تحقیقات کاربردی.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

7. Bayes, T. (1763). "LII. An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. By the late Rev. Mr. Bayes, FRS communicated by Mr. Price, in a letter to John Canton, AMFR S. Philosophical" transactions of the Royal Society of London, (53), 370-418.
8. Bayram, S., and Al-Jibouri, S. (2016). "Efficacy of estimation methods inforecasting building projects' costs." Journal of construction engineering and management, 142(11).
9. Bergmeir, C., Benitez, J.M., 2012. On the use of cross-validation for time series predictor evaluation. Information Sciences, 191,192–213.
10. Bergmeir, C., Hyndman, R.J., Koo, B., 2018. A note on the validity of cross-validation for evaluating autoregressive timeseries prediction. Computational Statistics and Data Analysis. 120, 70–83.
11. Chelle, P., Yeung, C. H., Croteau, S. E., Lissick, J., Balasa, V., Ashburner, C., & Wynn, T. (2020). "Development and Validation of a Population-Pharmacokinetic Model for Ruriotacog Alfa Pegol (Adynovate®): A Report on Behalf of the WAPPS-Hemo Investigators Ad Hoc Subgroup." Clinical pharmacokinetics, 59(2), 245-256.
12. Dos Santos, J. P., Fernandes, S. B., McCoy, S., Lozano, R., Brown, P. J., Leakey, A. D., & Gore, M. A. (2020). Novel Bayesian networks for genomic prediction of developmental traits in biomass sorghum. G3: Genes, Genomes, Genetics, 10(2), 769-781.
13. Fares, H., and Zayed, T. (2010). "Hierarchical fuzzy expert system for risk of failure of water mains." Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 1(1), 53-62.
14. Feng, L. H., and Luo, G. Y. (2011). "Application of possibility-probability distribution in assessing water resource risk in Yiwu city". Water Resources, 38(3), 409.
15. Gain, A. K., and Giupponi, C. (2015). "A dynamic assessment of water scarcity risk in the Lower Brahmaputra River Basin: An integrated approach". Ecological indicators, 48, 120-131.
16. Haro-Monteagudo, D., Knox, J. W., and Holman, I. P. (2019). "D-Risk: A decision-support webtool for improving drought risk management in irrigated agriculture." Computers and Electronics in Agriculture, 162, 855-858.
17. Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982). "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." Water resources research, 18(1), 14-20.
18. Kaplan, S., and Garrick, B.J. (1981). "On the quantitative definition of risk." Risk Analysis, 1(1): 11–27.
19. Karamouz, M., Saadati, S., and Ahmadi, A. (2010). "Vulnerability assessment and risk reduction of water supply systems." In World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change, 4414-4426.
20. 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.
21. Li, M., Guo, P., Singh, V. P., and Yang, G. (2016). "An uncertainty-based framework for agricultural water-land resources allocation and risk evaluation." Agricultural Water Management, 177, 10-23.
22. Liu, B., Siu, Y. L., and Mitchell, G. (2017). "A quantitative model for estimating risk from multiple interacting natural hazards: an application to northeast Zhejiang, China". Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 31(6), 1319-1340.
23. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).
24. Nalbantis, I., and Tsakiris, G. (2009). "Assessment of hydrological drought revisited." Water Resources Management, 23(5), 881-897.
25. Nielsen, T. D., and Jensen, F. V. (2009). "Bayesian networks and decision graphs." Springer Science and Business Media.
26. Nieto-Morote, A., and Ruz-Vila, F. (2011). "A fuzzy approach to construction project risk assessment." International Journal of Project Management, 29(2), 220-231.
27. 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.
28. Rodriguez, J. D., Perez, A., and Lozano, J. A. (2009). “Sensitivity analysis of k-fold cross validation in prediction error estimation.” *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 32(3), 569-575.
  29. Roozbahani, A., Zahraie, B., and Tabesh, M. (2012). PROMETHEE with precedence order in the criteria (PPOC) as a new group decision making aid: an application in urban water supply management. *Water resources management*, 26(12), 3581-3599.
  30. 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.
  31. Sadiq, R., Kleiner, Y. and Rajani, B. (2004) “Aggregative risk analysis for water quality failure in distribution networks.” *Journal of Water Supply Res Technol.* 53(4):241–261.
  32. 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.
  33. Shukla, S., and Wood, A. W. (2008). “Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought.” *Geophysical research letters*, 35(2).
  34. Sun, Z., Zhang, J., Yan, D., Wu, L., and Guo, E. (2015). “The impact of irrigation water supply rate on agricultural drought disaster risk: a case about maize based on EPIC in Baicheng City, China.” *Natural Hazards*, 78(1), 23-40.
  35. Thall, P., Russel, K. and Simon, R., (1997). “Variable selection in regression via repeated data splitting.” *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 6 (4), 416–434.
  36. 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.
  37. Tsakiris, G., and Vangelis, H. J. E. W. (2005). “Establishing a drought index incorporating evapotranspiration.” *European water*, 9(10), 3-11.
  38. Wong, T. T. (2015). “Performance evaluation of classification algorithms by k-fold and leave-one-out cross validation.” *Pattern Recognition*, 48(9), 2839-2846.
  39. Zamani, R., Akhond-Ali, A. M., Roozbahani, A., and 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.
  40. Zhang, X., Xu, K., and Zhang, D. (2012). “Risk assessment of water resources utilization in Songliao Basin of Northeast China”. *Environmental earth sciences*, 67(5), 1319-1329.

## Development of Drought Risk Analysis Model in Agricultural Water Supply Systems of Northern Roodasht Irrigation Network Using Bayesian Network

**A. Bozorgi, A. Roozbahani<sup>1</sup> \* and S. M. Hashemy Shahedany**

PhD Student of Water Resources Engineering, Department of Irrigation Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran.

**bozorgi.atiyeh@ut.ac.ir**

Associate Professor, Department of Irrigation Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran.

**roozbahany@ut.ac.ir**

Assistant Professor, Department of Irrigation Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran.

**mehdi.hashemy@ut.ac.ir**

### Abstract

Agriculture is one of the most important economic sectors of Iran and the largest consumer of surface and underground water resources. Since various risks threaten agricultural water supply systems, developing a risk analysis framework is inevitable in order to identify and assess the impact of the aforementioned systems on promoting sustainable agricultural development. Therefore, for the first time, the present study has attempted to develop a drought risk analysis model for agricultural water supply system with the Bayesian network. The structure of this model, which consists of nodes and their interactions, is designed by using river discharge, water released from the upstream water diversion system, groundwater and irrigation network demand to provide system risk. In order to investigate the capability of the developed model, the risk analysis of the modern Roodasht Irrigation System in Isfahan was investigated. The risk values of the Roodasht agricultural water supply system were estimated in the range of zero to 58.11% and an average of 39.82%. The results showed that this model has good accuracy and performance in both training and test sections, with the root mean squares error of 0.09 and 0.1, coefficient of determination of 0.85 and 0.75, and overall index of model performance of 0.82 and 0.74. The results of this research and the proposed model helps operators and decision makers to better plan the allocation of irrigation water based on the risks predicted in hydrological drought conditions.

**Keywords:** Surface and groundwater resources, Hydrological drought, Water allocation

---

<sup>1</sup> - Corresponding author: Department of Irrigation Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Pakdasht, Tehran.

\*- Received: April 2020, and Accepted: June 2020