مدیریت آب و آبیاری
(نشریه علمی)
دوره ۱۱ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۰
صفحه‌های ۳۷۳-۳۵۷
DOI: 10.22059/jwim.2021.325508.887

مقاله پژوهشی:

تحلیل ریسک طرح‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای با روش تحلیل درخت خطای فازی (مطالعه موردی: فلات مرکزی ایران)

طاهره غنیان[۱]، عباس روزبهانی[۲*]
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۶

چکیده
امروزه یکی از راه‌کارها جهت تأمین نیازهای روزافزون منابع آب و رسیدن به تعادل منطقه‌ای، طرح‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای است. این مطالعه، به بررسی هشت سناریو به‌منظور ارزیابی ریسک سناریوهای انتقال آب بین‌حوضه‌ای از حوضه کارون بزرگ به فلات مرکزی ایران با هدف تأمین آب شرب می‌پردازد. اولویت‌بندی این سناریوها با استفاده از چهار معیار مهم و تأثیرگذار ریسک اجتماعی- سیاسی، ریسک زیست‌محیطی و منابع آبی، ریسک فنی و ریسک اقتصادی با توجه به معیارهای یونسکو انجام شده است. به‌کمک این معیارها، ده رویداد پایه مؤثر در طرح‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای شناخته شد. سپس به‌کمک مدل‌های درخت خطای صریح (FTA) و درخت خطای فازی (FFTA)، احتمال شکست رویداد نامطلوب نهایی راس «شکست طرح‌های انتقال آب» برای سناریوها محاسبه شد. نتایج نشان داد انتقال آب از حوضه بهشت‌آباد از طریق پمپاژ و تونل کوتاه از دبی پایه بهشت‌آباد برای استان اصفهان و حوضه خرسان- سد خرسان۳ برای استان‌های یزد و کرمان با احتمال شکست محاسبه‌شده صریح و فازی به میزان ۰/۶۵ و ۰/۶۱ سناریوی برتر می‌باشد. به‌دلیل میزان بالای احتمال شکست برآوردشده و به‌منظور شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع این شکست، رویدادهای پایه براساس سهم وقوع خود در شکست رویداد راس به‌کمک دو شاخص BI و FIM، رتبه‌بندی شدند که نتایج حاکی از اهمیت بیش‌تر معیارهای اجتماعی- سیاسی و زیست‌محیطی در شکست طرح‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای بود.

کلیدواژه‌ها: انتقال آب بین‌حوضه‌ای، تحلیل درخت خطا، تحلیل درخت خطای فازی، حوضه فلات مرکزی ایران.

Risk Analysis of Inter-Basin Water Transfer Plans by Fuzzy Fault Tree Analysis Method (Case Study: Iranian Central Plateau)

Tahereh Ghanian [1], Abbas Roozbahani[2*]
1. M.Sc. Student in Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
Received: June 13, 2021 Accepted: August 17, 2021

Abstract
Nowadays, one of the solutions to meet the growing water needs and achieve regional balance is inter-basin water transfer projects. This study examines eight scenarios in order to evaluate eight scenarios of inter-basin water transfer from great Karun watersheds to the central plateau of Iran with the aim of supplying drinking water. Prioritization and evaluation of these scenarios were performed using four important and effective criteria (social and political risk, environmental and water resources risk, technical risk and economic risk) in inter-basin water transfer according to UNESCO criteria. Then, with the help of these criteria, ten effective basic events in inter-basin water transfer projects. Then, using the Fault Tree Analysis (FTA) and Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) models, the failure probability of top event "failure of water transfer projects" for all eight scenarios were calculated. The results showed that water transfer from Behesht-Abad basin through Pumping and short tunnel from Behesht-Abad base flow for Isfahan province and khersaan basin - khersaan dam to Yazd and Kerman provinces with crisp and fuzzy failure probability of 0.65 and 0.61 as the eighth scenario, is the superior scenario. Due to the high probability of failure and in order to identify the factors affecting the occurrence of this failure, the basic events were ranked based on their effect in the failure of the top event using two indicators of BI and FIM. The results indicate the greater importance of socio-political and Environment criteria in the failure of inter-basin water transfer projects.

Keywords: Central plateau basin of Iran, Fault tree analysis, Fuzzy fault tree analysis, Inter-basin water transfer.

* نویسنده مسئول Email: roozbahany@ut.ac.ir

مقدمه

با توجه به نیاز روزافزون به آب به‌عنوان حیاتی ترین عنصر زندگی و با توجه به محدودیت منابع آب قابل استحصال، شناسایی ابزارهای مدیریتی برای تخصیص بهتر آب اهمیت می‌یابد. یکی از روش‌های نوین استفاده از منابع آب برای مناطقی که دسترسی کم‌تری به منابع آبی دارند، پروژه‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای است. پروژه‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای دارای پارامترهای چالش‌برانگیز گوناگون، پیچیده و غالبا کیفی می‌باشند. در طرح‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای به علت نقش متفاوت هر کدام از پارامترها بر پروژه موردنظر، مقدار اثر بخشی متفاوت آن‌ها و کیفی‌بودن برخی معیارها عدم قطعیت‌هایی در تصمیم‌گیری نهایی وجود دارد که تصمیم‌گیری در مورد آن‌ها را دشوار می‌کند. استفاده از تکنیک تحلیل ریسک درخت خطا می‌تواند در تصمیم‌گیری جامع، کارآمد باشد. مطالعات فراوانی در مورد انتقال آب بین‌حوضه ای، به‌ویژه در بحث تأمین آب شرب در طی سال‌های گذشته تا به امروز انجام شده است.

Zarghami *et al.* (2009) روشی برای تصمیم‌گیری کارآمد در انتقال بین‌حوضه‌ای آب در فلات مرکزی ایران (حوضه زاینده‌رود) با استفاده از عملگر میانگین وزنی مرتب‌شده (OWA)[1] به‌عنوان یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ارائه نمودند. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی بهتر از سایر روش های قدیمی (MCDM)[2] است. Calizaya *et al.* (2010) تجزیه و تحلیل روش تصمیم‌گیری چندمعیاره را در حوضه (دریاچه پوپو)[3] که با کمبود شدید کمیت و کیفیت آب مواجه است، براساس معیارهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تحت عدم قطعیت، با استفاده از تئوری تحلیلی سلسله مراتبی (AHP)[4] ارائه دادند. نتایج نشان داد روش به‌کار گرفته‌شده در پژوهش حاضر، بهترین راه‌حل را برای مدیریت منابع آب در حوضه پوپو ارائه می‌دهد. Razavi Toosi *et al.* (2011) از سه روش تصمیم‌گیری چند شاخصه‌ای فازی برای اولویت‌بندی برخی از پروژه‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای کارون بزرگ با درنظرگرفتن معیارهای مختلف، استفاده نمودند. نتایج نشان دادکه درکلیه روش‌ها، تونل اول کوهرنگ دراولویت بالاتری قرار دارد. هم‌چنین ضریب همبستگی اولویت‌بندی Spearman برای تعیین نزدیکی نتایج روش‌های مختلف به کار برده شد، که براساس نتایج به‌دست‌آمده، روش بونیسون و (TOPSIS)[5] فازی، بیش‌ترین ضریب همبستگی را نشان داد. Mohammadi *et al.* (2012) به رتبه‌بندی ۷ گزینه پیشنهادی طرح انتقال آب بهشت‌آباد با درنظرگرفتن ٦ معیار کمی و کیفی (اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فنی) با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) اقدام نمودند. نتایج نشان داد که معیار سهولت بهره‌برداری مهم ترین معیار در این پژوهش می‌باشد.. Kefayati *et al.* (2018) به توسعه شاخص‌ها ارزیابی توسعه پایدار در حوضه‌های آبریزی که دارای طرح‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای هستند پرداختند و۱۵ شاخص در سه بخش اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ارائه داده و با استفاده از (PCA)[6] و روش های (CIS)[7] به ارزیابی و تلفیق این شاخص‌ها در طرح انتقال آب حوضه کارون (طرح بهشت‌آباد) به‌حوضه گاوخونی پرداخته‌اند. Roozbahani *et al.* (2020) در مطالعه‌ای با روش COPRAS[8]، که یکی از روش‌های جدید MCDM است، به ارزیابی پروژه‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای به فلات مرکزی ایران در سه حالت صریح، فازی و خاکستری پرداخته‌اند. وزن معیارها با استفاده از سه روش AHP، DEMATEL[9]، Shannon Entropy به سه صورت صریح، فازی و خاکستری به‌دست آمد. سپس سناریوها با استفاده از روش COPRAS اولویت‌بندی شدند و سرانجام، نتایج با استفاده از روش شمارش (بوردا)[10] رتبه‌بندی شدند.

ماهیت قضاوت محور برخی عوامل بروز خطر (شکست) در انتقال آب بین‌حوضه‌ای، نقص یا نبود اطلاعات کمی و از سوی دیگر قابلیت گرافیکی و قیاس درخت خطا[11] و توانایی آن در تحلیل ریسک کیفی و کمی این روش را به ابزاری نیرومند در تشخیص نقاط ضعف سیستم‌های مورد بررسی بدل کرده است. از این‌رو، در پژوهشی که Sadiq *et al.* (2007) انجام دادند از روش تحلیل درخت خطا برای ارزیابی ریسک شکست‌های موجود در شبکه توزیع آب شهری، استفاده کردند. رویداد نامطلوب در تحقق یادشده «کیفیت نامناسب آب در سیستم توزیع آب شهری» انتخاب شد و رویدادهای آلودگی آب در منطقه ورودی، خوردگی اجزای سیستم و شکست در تصفیه‌خانه از جمله عوامل مؤثر در وقوع رویداد رأس شناخته شدند. هم‌چنین Lindhe *et al.* (2009) از درخت خطا برای تحلیل ریسک جامع و احتمالاتی سامانه آب شرب شهر گوتنبرگ[12]سوئد استفاده کردند رویدادهای پایه (BE)[13] در پژوهش یادشده در دو بخش اصلی شکست کمی و شکست کیفی برای سه زیرسامانه آب خام ورودی، تصفیه خانه و سامانه توزیع درنظر گرفته شدند. Jian *et al.* (2011) از روش درخت خطای فازی برای مشخص‌کردن پتانسیل آلودگی آب در منطقه اقتصادی خلیج بیبو[14] در چین استفاده کردند. Taheriyoun *et al.* (2015) قابلیت اطمینان مربوط به تصفیه‌خانه شهرک غرب با رویکرد درخت خطا را ارزیابی کردند که رویداد رأس، تخطی BOD پساب خروجی از میزان استاندارد است. در پژوهش یادشده تحلیل کمی براساس برش‌های حداقل انجام گرفت. Tabesh *et al.* (2018) به ارزیابی ریسک تصفیه خانه جلالیه تهران با روش تحلیل ریسک درخت خطا با دو رویکرد ساده و فازی[15] پرداختند که رویداد نامطلوب در این ساختار کمیت و کیفیت نامطلوب آب بود. نتایج پژوهش نشان داد رویدادهای طراحی نامناسب مخزن، خرابی تجهیزات برق‌رسانی، شکست لوله انتقال و تعمیر و نگهداری نامناسب پمپ‌ها بیش‌ترین سهم را در وقوع رویداد کمی و کیفی نامناسب آب داشتند. Babaei *et al.* (2018) نمونه کاربرد دیگری از رویکرد تحلیل درخت خطا، ارزیابی ریسک سیستم‌های انتقال و تحویل آب کشاورزی کانال آبیاری غرب دز در استان خوزستان با رویکرد درخت خطای فازی است که این مطالعه برای نخستین بار نوعی چارچوب منحصر به فرد به‌منظور ارزیابی کفایت، عدالت و بهره‌وری از توزیع و تحویل آب ارائه می‌دهد. هم‌چنین، در مطالعهٔ یادشده عوامل پایه که بیش‌ترین سهم را در شکست سیستم آبرسانی داشتند، مشخص شدند. در مطالعه دیگری Gachlou *et al.* (2019) با استفاده از روش تحلیل درخت خطا به ارزیابی ریسک جامع حوضه دریاچه ارومیه پرداختند، که در آن رویداد رأس «ریسک شکست منابع آب حوضه دریاچهٔ ارومیه» در نظر گرفته شد. رتبه‌بندی رویدادهای پایه نشان داده است که شکست کیفیت، بیش‌ترین تأثیر را در وقوع رویداد رأس دارد. Abedzadeh *et al.* (2020) به بررسی ریسک برنامه‌های توسعه منابع آب بر پایه معیارهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، به‌کمک ارزیابی مبتنی بر ریسک در چارچوب توسعه پایدار و با استفاده از تجزیه و تحلیل درخت خطای صریح (FTA) و فازی (FFTA) در استان هرمزگان در جنوب ایران پرداخته‌اند. رتبه‌بندی سناریوها از طریق تحلیل معیارهای مبتنی بر ریسک انجام گرفت. مطالعات یادشده نشان‌دهنده کاربرد گسترده روش تحلیل درخت خطا در ارزیابی ریسک سیستم‌ها و سامانه‌های آبی است. هم‌چنین، به‌دلیل داشتن قابلیت رتبه‌بندی رویدادهای پایه و استفاده از دروازه‌های منطقی، روش تحلیل درخت خطا از کارآمدترین روش‌ها در ارزیابی ریسک است.

انجام مطالعات متنوع در مورد طرح‌های انتقال آب در سطح ایران و جهان، نشان‌دهنده اهمیت موضوع انتقال آب است که بررسی پژوهش‌های پیشین نشان

می‌دهد تاکنون بیش‌تر مطالعات انجام‌شده در زمینه ارزیابی طرح‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای براساس رویکرد قطعی و تصمیم‌گیری چندمعیاره بوده است و پژوهشی در بخش تحلیل ریسک این طرح‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مطالعه با توجه به کاربرد مؤثر روش تحلیل ریسک درخت خطا در سامانه‌های آبی، برای نخستین بار اقدام به تحلیل خطرپذیری سناریوهای انتقال آب بین‌حوضه‌ای براساس معیارهای مشخص‌شده توسط یونسکو شده است. هدف اصلی این پژوهش، بهره‌گیری از روش درخت خطای به‌منظور ارائه ساختاری جامع برای اولویت‌بندی و ارزیابی سناریوهای انتقال آب بین‌حوضه‌ای به فلات مرکزی ایران بر مبنای تحلیل ریسک و احتمال شکست هم‌چنین استفاده از منطق فازی جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها و رویدادها است. علاوه بر این می‌توان به‌کمک مقایسه ریسک سناریوها در حالت صریح و فازی گزینه‌ای انتخاب شود که کم‌ترین احتمال وقوع شکست را دارد و اطمینان‌پذیری یک پروژه انتقال آب را افزایش دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه فلات مرکزی ایران با مساحتی غالب پر ۸۲٤/۳٥٦ کیلومتر مربع بیش از نیمی از مساحت ایران را در خود جای داده است. طرح انتقال آب بین‌حوضه‌ای به فلات مرکزی ایران از سرشاخه‌های حوضه‌های آبریز کارون بزرگ متشکل از رودخانه‌های دز و کارون با مساحت ٦۷/۲٥۷ کیلومترمربع به مختصات جغرافیایی ’۰۰ °٤۸ تا ’۳۰ °٥۲ درجه طول شرقی و ’۰۰ °۳۰ تا ’۰٥ °۳٤ درجه عرض شمالی می‌باشد. از این حوضه، حوضه‌های مبدأ شامل، بهشت‌آباد، بازفت، خرسان و گوکان که بخش عمده آن‌ها واقع در استان چهار محال و بختیاری می‌باشد به‌منظور تأمین بخشی از آب موردنیاز سه استان اصفهان، یزد و کرمان در نظر گرفته شده‌اند. در این انتقال آب بین‌حوضه‌ای، حوضه‌های مقصد شامل استان اصفهان با مساحت ۱۰۷/۰٤٥ کیلومترمربع در بخش مرکزی ایران واقع است، استان یزد با مساحت ۱۳۱/٥۷٥ کیلومترمربع در قسمت مرکزی فلات ایران و استان کرمان با مساحت بیش از ۱۸۳/۲۸٥ کیلومترمربع در جنوب‌شرقی ایران واقع شده است. موقعیت کلی منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده است.

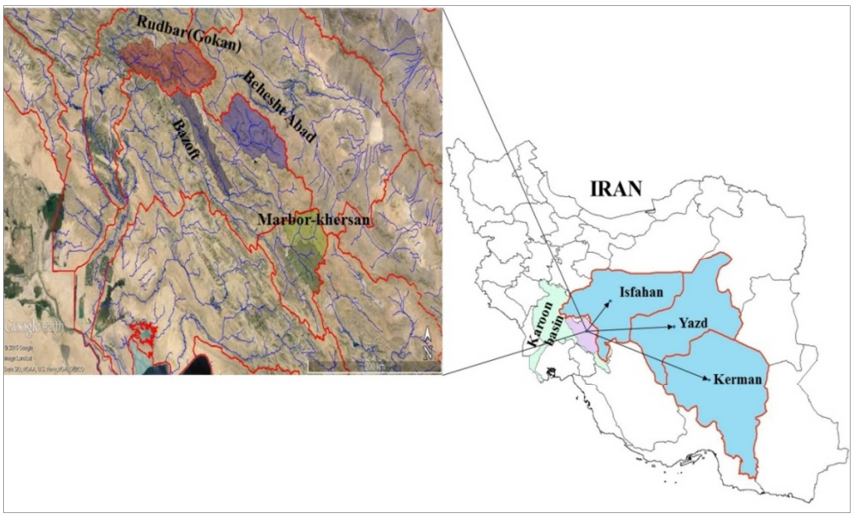

Figure 1. Study area

معرفی معیارهای تصمیم‌گیری

پروژه‌های انتقال آب که یکی از راه‌حل‌های نهایی جهت حل کمبود منابع آب به‌شمار می‌رود، می‌باید براساس لحاظ‌کردن معیارهای مختلف اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی، مسائل سیاسی و غیره صورت پذیرد. یونسکو در سال ۱۹۹۹ به‌منظور توجیه یا کنارگذاشتن طرح‌های انتقال بین‌حوضه‌ای آب معیارهایی را تدوین نموده است (Cox *et al*., 1999). این معیارها عبارتند از ۱- ناحیه مقصد با وجود استفاده از منابع جایگزین تأمین آب و انجام تمامی اقدامات منطقی برای کاهش تقاضای آن، باز هم در تأمین نیازهای فعلی و پیش‌بینی‌شده، کمبود جدی داشته باشد؛ ۲- حوضه مقصد در حال حاضر با آینده نزدیک دچار بحران آبی شده و یا رشد و توسعه منطقه از لحاظ مسائل مختلف منوط به تأمین آب به روش انتقال باشد و انتقال آب از حوضه مبدأ نیز توسعه این منطقه را در حال حاضر با آینده دچار بحران و مشکل جدی نکند؛ ۳- طرح نباید بر محیط زیست اثرات تخریبی زیاد و غیرقابل جبران داشته باشد. ارزیابی جامع پیامدهای زیست‌محیطی بایستی نشان دهد که سطح معقولی از قطعیت وجود دارد که طرح انتقال به شکل اساسی، کیفیت زیست‌محیطی را در حوضه مبدأ یا مقصد تخریب می‌کند. با این حال چنان‌چه هزینه‌های جبران خسارت زیست‌محیطی فراهم شود، طرح انتقال ممکن است توجیه‌پذیر باشد؛ ٤- ارزیابی جامع پیامدهای اجتماعی، فرهنگی باید نشان دهد سطح معقولی از قطعیت وجود دارد که طرح انتقال، سبب بروز اختلال اساسی اجتماعی و فرهنگی در حوضه مبدأ تا مقصد نخواهد شد؛ ٥- منافع خالص ناشی از اجرای طرح بایستی عادلانه میان حوضه‌های مبدأ و مقصد تقسیم شود، پس نه تنها طرح باید بازده اقتصادی داشته باشد بلکه منافع آن نیز نباید فقط برای مجری طرح یا مقصد صرف شود. معیارهایی که با درنظرگرفتن معیارهای تدوین‌شده یونسکو در سال (۱۹۹۹) به‌منظور توجیه و یا کنارگذاشتن طرح‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای انتخاب گردیده است.معیارهای موردنظر در جدول (۱) قابل مشاهده است و عبارتند از ۱- شکست سیاسی و اجتماعی (C1) شامل دو رویداد پایه، ایجاد تنش‌های اجتماعی (BE1) و ایجاد تنش‌های سیاسی (BE2) می‌باشد، که رویداد اول یعنی ایجاد تنش‌های اجتماعی شامل مسائل حقوقی و قانونی تملک اراضی، خسارت مخزن ناشی از زیر آب‌رفتن شهر کاج در صورت احداث سد بهشت‌آباد و برخی روستاها و واحدها، آسیب به میراث فرهنگی و آثار تاریخی محدوده اجرای طرح می‌باشد. رویداد پایه ایجاد تنش‌های سیاسی نیز شامل مشکلاتی نظیر مهاجرت، تغییر در جمعیت شهرها،تغییر در شرایط قومی، فرهنگی، بافت عشایری و ایلاتی منطقه مطالعاتی می‌شود.

۲- شکست زیست‌محیطی و منابع آبی (C2) شامل سه رویداد پایه عدم اطمینان‌پذیری در تأمین منابع آب (BE3)، تأثیر منفی و آسیب به منابع آب حوضه‌های درگیر در پروژه (BE4) و مجاورت با مناطق پنج‌گانه حفاظت‌شده (BE5) می‌شود. رویداد پایه عدم اطمینان‌پذیری در تأمین منابع آب، به بررسی نیازهای آبی در حوضه‌های درگیر در پروژه می‌پردازد که سناریو موردنظر به چه میزان ممکن است تأمین آب خوبی را در حوضه مقصد نداشته باشد یا به چه میزان موجب ایجاد تنش در منابع آب حوضه مبدأ شود. رویداد پایه تأثیر منفی و آسیب به منابع آب حوضه‌های درگیر در پروژه، به بررسی کمی و کیفی منابع آب حوضه‌های درگیر در پروژه می‌پردازد. سناریوهای مطرح در طرح‌های انتقال آب نباید باعث کاهش کیفیت و یا خشک‌شدن منابع آب نظیر چاه، چشمه‌ها، قنات‌ها و غیره در حوضه‌های مطالعاتی شوند. و رویداد آخر در این گروه یعنی مجاورت با مناطق پنج‌گانه حفاظت‌شده به بررسی میزان دخالت و دست‌اندازی در محیط زیست حوضه‌های مطالعاتی و ممانعت‌های موجود به‌دلیل وجود مناطق محافظت‌شده و ارزشمند زیست‌محیطی می‌پردازد.

Table 1. Basic events in the fault tree

Type of failure	Basic event No.	Description
Social	BE1	Creating social challenges
	BE2	Creating political challenges
Environment and water resources	BE3	Uncertainty in water supply
	BE4	Negative impact and damage to water resources of the basins involved in the project
	BE5	Proximity to protected areas
Technical	BE6	Issues and problems related to the construction of the dam
	BE7	Difficulty in running and accessing
	BE8	Technical problems and defects of transmission systems
Economic	BE9	Lack of capital and financial resources
	BE10	Cost per cubic meter of water

۳- شکست فنی (C3) شامل سه رویداد پایه، مسائل و مشکلات مربوط به بدنه سد (BE6)، صعوبت اجرا و دسترسی (BE7) و مشکلات و ایرادات فنی سامانه‌های انتقال (BE8) می‌باشد، که به‌ترتیب رویداد مسائل و مشکلات مربوط به بدنه سد، به بررسی مشخصات سد و سازه‌های ذخیره آب، مشکلات زمین‌شناسی و آب‌بندی مخزن و آسیب‌های احتمالی نظیر خسارت مخزن می‌پردازد. رویداد پایه صعوبت اجرا و دسترسی به بررسی مشکلاتی از جمله مدت زمان اجرای طرح و مشکلات زمین‌شناسی مانند عبور از مناطق گسله و کارستیک می‌پردازد. و رویداد پایه مشکلات و ایرادات فنی سامانه‌های انتقال به بررسی مشکلات سامانه انتقال آب، انرژی موردنیاز سامانه، تضمین بالای تأمین آب شرب، طول لوله و تونل‌ها و میزان پمپاژهای بلند با حجم زیاده می‌پردازد.

٤- شکست اقتصادی (C4) شامل دو رویداد پایه کمبود سرمایه و منابع مالی (BE9) و قیمت تمام‌شده هر مترمکعب آب (BE10) می‌باشد که رویداد پایه کمبود سرمایه و منابع مالی شامل میزان سرمایه‌گذاری برای احداث سامانه انتقال آب و میزان تأمین‌کننده‌های مالی و رویداد پایه قیمت تمام‌شده هر مترمکعب آب به بررسی هزینه هر مترمکعب آب در هر سناریو با برآورد میزان تولید انرژی برقآبی (انرژی تولیدی)، هزینه و میزان برق مصرفی انرژی مصرفی)، هزینه جاری، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری می‌پردازد. لازم به ذکر است که قیمت تمام‌شده هر متر مکعب آب توسط شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران برآورد شده و به‌صورت عددی و کمی برخلاف سه معیار دیگر که به‌صورت کیفی می‌باشد، در نظر گرفته شده است.

معرفی سناریوها

به‌منظور انتقال آب بین‌حوضه‌ای به فلات مرکزی ایران برای تأمین کمبود ۵۸۰ میلیون مترمکعب آب شرب سه استان اصفهان یزد و کرمان، هشت سناریوی انتقال آب برای ارزیابی، اولویت‌بندی و ارائه گزینه برتر با اعمال نظرات متخصصین آب و با توجه به گزارش‌های شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، تعیین شد که هر کدام به‌صورت جداگانه به شرح زیر است.

۱- انتقال آب از حوضه بازفت سد چمن گلی (از طریق تونل کوهرنگ۳) به استان‌های اصفهان، یزد و کرمان (S1)؛ این گزینه مبتنی به انتقال آب به دره کوهرنگ و استفاده از سامانه کوهرنگ۳ برای انتقال آب به فلات مرکزی ایران است. اجزای اصلی طرح انتقال شامل یک سد با ارتفاع حدود ۱۵۰ متری با گنجایش مخزن حدود ۷۰۰ میلیون مترمکعب با وظیفه تنظیم آب در دره بازفت است. انتقال آب با حجم ۵۰ میلیون مترمکعب توسط شبکه‌ای تشکیل‌شده از ۱۳ کیلومتر تونل و ۱۹ کیلومتر لوله به‌همراه چهار ایستگاه پمپاژ به دره کوهرنگ

صورت می‌گیرد، در ادامه آب بعد از خروج از تونل کوهرنگ۳ در بستر زاینده‌رود جریان می‌یابد و تا باغ بهادران ادامه می‌یابد، سپس آب استان اصفهان (۲۵۰ میلیون مترمکعب) از یزد و کرمان جدا می‌شود، آب یزد به میزان ۱۵۰ میلیون مترمکعب از طریق احداث خط لوله به موازات خط اول به طول ۳۵۲ کیلومتر و آب کرمان به میزان ۱۸۰ میلیون مترمکعب از طریق احداث خط لوله به طول ٦٦٠ کیلومتر انتقال می‌یابد.

۲- انتقال آب از حوضه بهشت‌آباد از طریق پمپاژ مستقل از سد بهشت‌آباد با استفاده از خط لوله و تونل کوتاه به استان‌های اصفهان، یزد و کرمان (S2)؛ این سناریو شامل احداث یک سد بلند بیش از ۱۷۰ متری با وظیفه ذخیره و تنظیم آب، در پایین‌دست محل الحاق رودخانه‌های بهشت‌آباد و کوهرنگ با خسارت مخزن زیاد با توجه به زیر آب‌رفتن شهر ٤۰۰۰ نفری کاج است. انتقال آب با حجم ۵۸۰ میلیون مترمکعب، توسط شبکه‌ای متشکل از تونل، خط لوله و پمپاژ از مبدأمبدأ تا مقصد برای اصفهان (تونل ۷/۸ کیلومتر، طول لوله ٦۲/۸ کیلومتر، چهار مرحله پمپاژ)، یزد (تونل ٦/٤ کیلومتر، طول لوله ٤۳۰ کیلومتر، چهار مرحله پمپاژ) کرمان (تونل ٦/٤ کیلومتر، طول لوله ۷۱۳ کیلومتر، شش مرحله پمپاژ) انجام می‌گیرد.

۳- انتقال آب از حوضه خرسان سد خرسان ۳ و رودخانه ماربر به سه استان اصفهان، کرمان و یزد (S3)؛ در این سناریو انتقال آب با حجم ۵۸۰ میلیون مترمکعب از مبدأ تا مقصد به‌ترتیب برای اصفهان از بند ماندگان واقع بر روی رودخانه ماریر (تونل ۲/۸ کیلومتر، طول لوله ۱۹۸/۱، چهار مرحله پمپاژ)، یزد از سد خرسان ۳ (تونل ۲۲ کیلومتر، طول لوله ٤٦۲ کیلومتر، شش مرحله پمپاژ) و کرمان از سد خرسان ۳ (تونل ۲۱/۳ کیلومتر، طول لوله ٦۵۵ کیلومتر، شش مرحله پمپاژ) انجام می‌گیرد.

٤- انتقال آب از حوضه بازفت سد شیخ عالی به اصفهان و یزد و از سد خرسان۳ و رودخانه ماربر برای کرمان (S4)؛ در بخش اول این سناریو سالانه ٤۰۰ میلیون مترمکعب آب، از بازفت به استان‌های اصفهان و یزد با احداث یک سد با ارتفاع ۱۰٦ متر و حجم کل مخزن معادل ۵۸۰ میلیون مترمکعب در ساختگاه شیخ عالی و با استفاده از یک خط انتقال ۱۱ کیلومتری، ۳ مرحله پمپاژ و با مجموع ۵ قطعه تونل به طول کل ۲۵ کیلومتر با اضافه‌شدن آب سرشاخه‌های نازی و الگی به دره کوهرنگ منتقل و در ادامه تا سد چم‌آسمان از طریق رودخانه زاینده‌رود ادامه می‌یابد. در این نقطه سهم اصفهان به تصفیه‌خانه منتقل شده و ۱۵۰ میلیون مترمکعب سهم یزد با احداث خط لوله جدید به طول ۳٦۵ کیلومتر انتقال خواهد یافت. بخش دوم سناریوی انتقال آب از سد خرسان ۳ و رودخانه ماربر به کرمان نیز با حجم انتقال آب برابر با ۱۸۰ میلیون مترمکعب با احداث تونلی به طول ۲۱/۳ کیلومتر و خط لوله‌ای به طول ٦۵۵ کیلومتر با ٦ مرحله پمپاژ بلند با حجم زیاد تا ارتفاع حدود ۱۲۰۰ متر صورت می‌گیرد.

۵- انتقال آب از حوضه بهشت‌آباد از طریق پمپاژ و تونل کوتاه از سد بهشت‌آباد برای استان‌های اصفهان و یزد و از حوضه خرسان سد خرسان ۳ برای کرمان (S5)؛ شرایط و ویژگی‌های سد و سامانه انتقال آب در بخش اول این سناریو مشابه سناریوی ۲ می‌باشد، انتقال آب در این بخش با حجم ٤۰۰ میلیون مترمکعب توسط شبکه‌ای تشکیل‌شده از تونل، خط لوله و پمپاژ از مبدأ تا مقصد به‌ترتیب برای اصفهان (تونل ۷۸ کیلومتر، طول لوله ٦۲/۸ کیلومتر، چهار مرحله پمپاژ) و یزد (تونل ٦/٤ کیلومتر، طول لوله ٤۳۰ کیلومتر، چهار مرحله پمپاژ) صورت می‌پذیرد. بخش دوم سناریوه انتقال ۱۸۰ میلیون مترمکعب آب تخصیص یافته به استان کرمان از سد خرسان ۳ می‌باشد، که این بخش از سناریو کاملاً مشابه سناریوی ٤ است.

٦- انتقال آب از حوضه بهشت‌آباد از طریق پمپاژ و

توتل کوتاه از دبی پایه بهشت‌آباد برای استان‌های اصفهان و یزد و از حوضه خرسان سد خوسان ۳ برای استان کرمان (S6)؛ بخش اول این سناریو، تأمین ٤۰۰ میلیون مترمکعب آب شرب در استان اصفهان و یزد از آب موجود معادل ٦٤۷ میلیون مترمکعب دبی پایه رودخانه بهشت‌آباد برای اهداف شرب اصفهان و یزد است. در این سامانه آبگیری با ظرفیت بیشینه ۳۰ مترمکعب بر ثانیه روی رودخانه بهشت‌آباد احداث می‌شود. انتقال آب توسط سه مرحله پمپاژ از تراز ١٦٦۰ با خط لوله‌ای به طول ٤۳ کیلومتر و تونلی آب بر به طول ۵ کیلومتر تا دره منتهی به مخزن سد کوهرنگ ۳ انجام می‌پذیرد. انتقال آب یزد از آبگیری در محل سد چم‌آسمان توسط خط لوله‌ای به طول حدود ۳۳۵ کیلومتر با دو مرحله پمپاژ در ابتدا و میانه مسیر انجام می‌گیرد. بخش دوم سناریو، انتقال ۱۸۰ میلیون مترمکعب آب تخصیص‌یافته به استان کرمان از سد خوسان ۳ است که کاملاً مشابه سناریو ٤ می‌باشد.

۷- انتقال آب از حوضه گوکان سد گوکان به استان اصفهان و از حوضه خرسان سد خرسان ۳ برای یزد و کرمان (S7)؛ در این سناریو خط اول انتقال آب به یزد به میزان ۹۸ میلیون مترمکعب حذف شد، بنابراین میزان آب موردنیاز برای استان اصفهان به ۱۵۰ میلیون مترمکعب کاهش یافته و ۹۸ میلیون مترمکعب به آب موردنیاز استان یزد اضافه می‌شود. در بخش اول این سناریو سازه اصلی تنظیم‌کننده آب یک سد مخزنی به ارتفاع ١٦٨ متر با حجم مخزن ۱۵۷ میلیون مترمکعب است که در دره گوکان احداث خواهد شد. در این طرح کل مسیر انتقال شامل تونل‌های فرعی و اصلی، دو بند انحرافی به ارتفاع حدود ۵ متر و ۳ قطعه تونل با مجموع طول ٦/۹۷ کیلومتر به‌صورت ثقلی با عبور از مناطق کارستیک و گسله طراحی شده است. در این سناریو انتقال آب به میزان ۱۵۰ میلیون مترمکعب از خروجی آخرین تونل تا محل مصرف آب بر بستر رودخانه زاینده‌رود در نظر گرفته شده است. بخش دوم سناریو، انتقال آب از سد خرسان ۳ به دو استان یزد و کرمان می‌باشد که با حجم ٤۳۰ میلیون مترمکعب توسط شبکه‌ای شامل تونل، خط لوله و پمپاژ از مبدأ تا مقصد به‌ترتیب برای یزد (تونل ۲۲ کیلومتر، طول لوله ٤٦۲ کیلومتر، شش مرحله پمپاژ) و کرمان (تونل ۲۱/۳ کیلومتر، طول لوله ٦۵۵ کیلومتر، شش مرحله پمپاژ) انجام می‌پذیرد.

۸- انتقال آب از حوضه بهشت‌آباد از طریق پمپاژ و تونل کوتاه از دبی پایه بهشت‌آباد برای استان اصفهان و از حوضه خرسان سد خرسان ۳ برای استان‌های یزد و کرمان (S8)؛ در بخش اول سناریو سامانه‌ای برای برداشت و انتقال سالانه ۲۵۰ میلیون مترمکعب برای تأمین کمبود آب شرب اصفهان دیده شده است. بدین منظور روی رودخانه بهشت‌آباد آبگیری با ظرفیت بیشینه ١٤ مترمکعب بر ثانیه احداث می‌شود که وظیفه برداشت آب از تراز ١٦٦۰ را برعهده دارد. از این نقطه آب توسط خط لوله‌ای به طول ٤۳ کیلومتر و تونلی آب بر با قطر کم‌تر نسبت به سناریو ٦ به طول ۵ کیلومتر بوسیله سه مرحله پمپاژ انتقال می‌یابد، هدایت آب تا رودخانه طبیعی بالادست مخزن سد زاینده‌رود بوسیله سامانه سد و تونل کوهرنگ ۳ صورت می‌گیرد. بخش دوم انتقال آب از سد خرسان ۳ برای دو استان یزد و کرمان به میزان ۳۳۰ میلیون مترمکعب توسط شبکه‌ای تشکیل شده از تونل، خط لوله و پمپاژ از مبدأ تا مقصد به‌ترتیب برای یزد (تونل ۲۲ کیلومتر، طول لوله ٤٦۲ کیلومتر، شش مرحله پمپاژ) و کرمان (تونل ۲۱/۳کیلومتر، طول لوله‌ها ٦۵۵ کیلومتر، شش مرحله پمپاژ) انجام می‌پذیرد. در این پژوهش، پس از تعیین گروه تصمیم‌گیرندگان و تعیین معیارها و گزینه‌ها، به‌کمک تهیه پرسش‌نامه و استفاده از معیارهای کیفی به هر رویداد پایه ریسک نظیر آن داده شد، در ادامه درخت خطای نظیر هر سناریو تشکیل و ریسک هر سناریو محاسبه شده و در نهایت با فازی‌سازی ریسک رویدادهای پایه، ریسک رویداد

راس به‌صورت فازی برآورد خواهد گشت. شکل (۲) فلوچارت مراحل پژوهش را نشان می‌دهد.

روش تحلیل درخت خطا

درخت خطا از جمله تکنیک‌های ترکیبی تحلیل ریسک و روشی جزءگراست. به این صورت که، ابتدا وضعیت نامطلوبی از سامانه (بحران یا شکست) به‌عنوان رویداد رأس مشخص می‌شود. سپس طی یک فرایند رو به پایین علل وقوع آن کشف می‌شود. این روش یک شرح گرافیکی و منطقی از ترکیب شکست‌های مختلف است (Liang *et al.*, 1991). یک درخت خطا شامل سه دست رویداد اصلی می‌باشد؛ ۱- رویدادهای پایه: نقاط انتهایی درخت هستند. احتمال وقوع این رویدادها بانک اطلاعاتی درخت خطا را تشکیل می‌دهد؛ ۲- رویدادهای میانی: به رویدادهای میانی رویداد رأس و رویداد پایه اطلاق می‌شود؛ ۳- رویداد رأس[16]: که به‌عنوان رویداد نامطلوب اصلی در ابتدای درخت خطا قرار می‌گیرد و به‌کمک ریسک رویدادهای میانی قابل محاسبه است که در این پژوهش رویداد راس شکست طرح‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای در نظر گرفته شده است.

انواع دروازه‌ها در درخت خطا

دروازه‌ها منطق موجود در درخت خطا را مشخص می‌کنند و رویدادهای پایه را به رویدادهای فرعی و در نهایت به رویداد رأس مربوط می‌کنند. اگر لزوماً شکست هم‌زمان دو رویداد شکست رویداد بالاتر را رقم بزند دروازه "AND" و اگر شکست حداقل یکی از آن‌ها منجر به شکست رویداد بالاتر شود دروازه "OR" متصل‌کننده آن دو خواهد بود. در شکل (۳) یک نمونه درخت خطای ساده قابل مشاهده است.

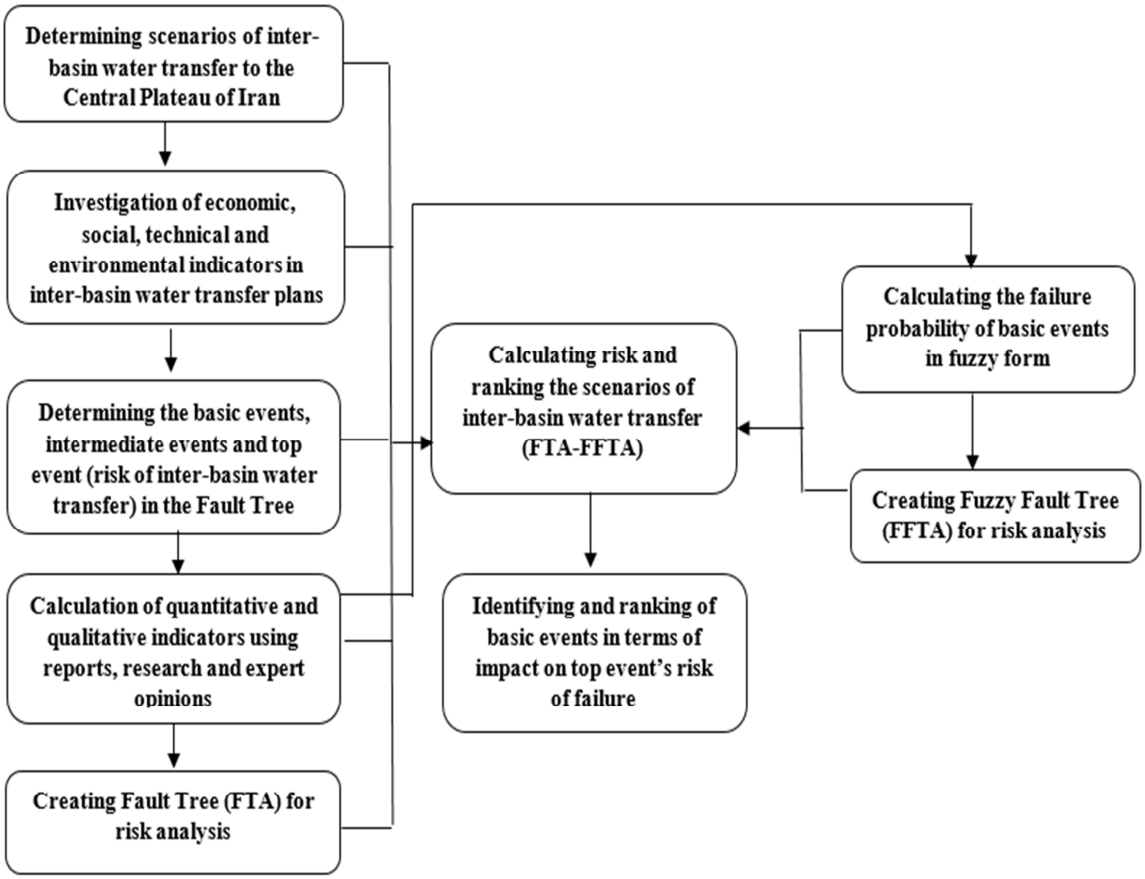

Figure 2. Research flowchart

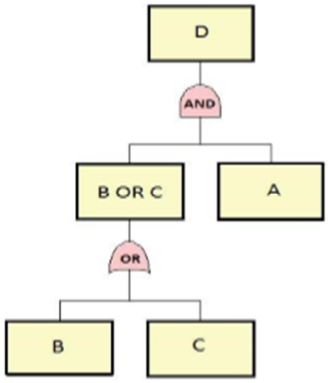

Figure 3. Structure of a simple fault tree

تحلیل کمی رویداد رأس در درخت خطا

پس از تبدیل متغیرهای کیفی دروازه‌های "AND" و "OR"براساس روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود:

دروازه AND

$$P = \prod_{i=1}^{n} P_i \qquad (۱)$$

دروازه OR

$$P = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - P_i) \qquad (۲)$$

که P_i مقدار احتمال شکست رویداد پایه iام و P احتمال شکست رویداد رأس است. اگر احتمال شکست رویداد رأس رضایت‌بخش نبود برای بهبود وضعیت و اقدامات پیشگیرانه،یافتن رویداد پایه‌ای که سهم بیش‌تری در شکست رویداد رأس داشته است ضرورت می‌یابد. به این منظور از شاخص بیرنبام[۱۷] برای رتبه‌بندی رویدادهای پایه استفاده می‌شود. شاخص مذکور توسط رابطه (۳) قابل تعریف است (Pan *et al*., 1988).

$$BI=Q_{qi=1}-Q_{qi=0} \qquad (۳)$$

در این رابطه $Q_{qi=1}$ و $Q_{qi=0}$ دو تابع فازی احتمال شکست رویداد رأس زمانی است که شکست رویداد پایه iام به‌طور کامل رخ دهد و تابع فازی احتمال شکست رویداد رأس زمانی است که شکست رویداد پایه iام اصلا رخ ندهد و هرچه مقدار شاخص بزرگ‌تر باشد سهم رویداد پایه در وقوع رویداد رأس بیش‌تر می‌باشد.

درخت خطای فازی

محدودیت اصلی درخت خطا مشکل‌بودن تعیین احتمال وقوع شکست‌ها است، هرچند که داده‌های زیادی از طریق بانک‌های اطلاعاتی، نظرات متخصصین و منابع دیگر در دسترس باشد. از دیگر نقایص درخت خطا این است که عدم قطعیت‌ها لحاظ نمی‌شوند. در درخت خطا، احتمال شکست به‌صورت یک مقدار دقیق تخمین زده می‌شود. اما محاسبه این مقدار دقیق با توجه به ابهام اطلاعات یا ناکافی‌بودن آن‌ها بسیار دشوار می شود، در این صورت استفاده از درخت خطای فازی اهمیت می‌یابد (Mahmood *et al*., 2013). یک مجموعه فازی در فضای احتمالات نمایانگر یک عدد فازی بین صفر و یک می‌باشد که نشان‌دهنده احتمال شکست یک رویداد پایه است (Misra *et al*., 1995). در این رویکرد روش کار به این صورت است که به جای تعریف یک مقدار منحصربه‌فرد برای مقدار احتمال شکست رویداد پایه، به‌صورت مجموعه‌های فازی تعریف می‌شود. روش موردنظر در این پژوهش استفاده از متغیرهای کیفی (بیانی) است که به‌وسیله پرسش‌نامه اخذ می‌شود. شکل (٤) فرم فازی‌شده ۵ تابع عضویت را براساس رویکرد یوهوا (Yuhua *et al*., 2004) نشان می‌دهد.

اما برای محاسبه احتمال شکست رویداد رأس، درحالی‌که احتمال شکست رویدادهای پایه به‌صورت غیرفازی باشند براساس رویکرد ارائه‌شده توسط (Yager et al., 2004) و با استفاده از رابطه (٤) غیرفازی می‌شوند.

$$Y(\overline{A})=\frac{\int_0^1 g(x)\mu_A(x)dx}{\int_0^1 \mu_A(x)dx} \qquad (٤)$$

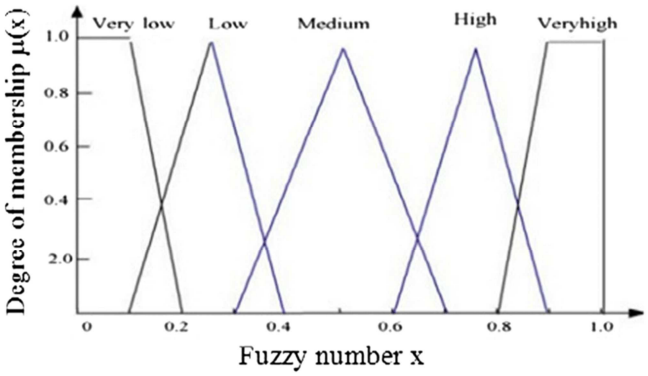

Figure 4. Linguistic expression of the probability of failure

تحلیل کمی رویداد رأس در درخت خطای فازی

رویکرد مورداستفاده در این پژوهش روش برش آلفا است که در محاسبه دروازه‌های AND و OR براساس روابط زیر مورداستفاده قرار می‌گیرد (Ferdous *et al*., 2011). شکل (۵) نحوه فازی‌سازی مقادیر رویدادهای پایه را به‌کمک روش برش آلفا نشان می‌دهد:

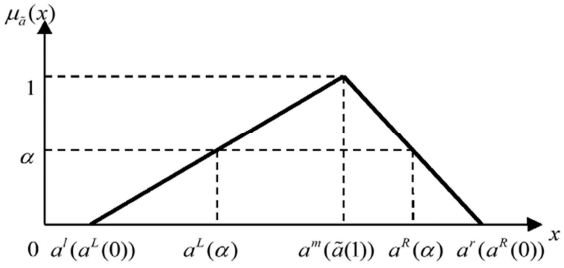

Figure 5. α-section for a triangular fuzzy function

دروازه AND

$$p_L^{\alpha}=\prod_{i=1}^{n} p_{iL}^{\alpha} \;;\; p_L^{\alpha}=\prod_{i=1}^{n} p_{iL}^{\alpha} \qquad (۵)$$

برای دروازه OR

$$p_L^{\alpha}=1-\prod_{i=1}^{n}(1-p_{iL}^{\alpha}) \;;\; p_R^{\alpha}=1-\prod_{i=1}^{n}(1-p_{iR}^{\alpha}) \qquad (۶)$$

p_L^{α} و p_R^{α} به‌ترتیب مقدار احتمال شکست در حد چپ و راست مجموعه فازی در برش آلفای موردنظر می‌باشند. p_i مقدار احتمال شکست رویداد iام است. شایان ذکر است برش‌های آلفا معمولاً در گام‌های یک‌دهم، یک‌صدم و بیش‌تر جهت تعیین میزان دقت تابع فازی ایجاد می‌شوند. تعیین رویدادهای پایه با سهم بالا در وقوع رویداد رأس برای این منظور از شاخص (FIM)[۱۸] رای رتبه‌بندی رویدادهای پایه استفاده می‌شود. شاخص مذکور توسط رابطه (۷) و (۸) قابل تعریف است (Peng *et al*., 2008):

$$Q=f(q_1,q_2,\ldots,q_i,\ldots,q_n) \qquad (۷)$$

$$FIM = ED\left[Q_{q_i=0}, Q_{q_i=1}\right] = \qquad (۸)$$

$$\Sigma_{\alpha_{i=1,2,3,\ldots,n}}\left((Q^L_{q_i=1}-Q^L_{q_i=0})^2+\left(Q^U_{q_i=1}-Q^U_{q_i=0}\right)^2\right)^{0.5}_{\alpha_i}$$

که $Q_{q_i=1}$ تابع فازی احتمال شکست رویداد رأس زمانی است که شکست رویداد پایه iام به‌طور کامل رخ دهد و $Q_{q_i=0}$ تابع فازی احتمال شکست رویداد رأس زمانی است که شکست رویداد پایه ام اصلا رخ ندهد. $Q^U_{q_i=1}$ و $Q^L_{q_i=0}$ به‌ترتیب حد پایین و بالای این مجموعه فازی در هر برش آلفا می‌باشند.

نتایج و بحث

تحلیل کمی رویداد رأس به‌صورت صریح

پس از تعیین هشت سناریو انتقال آب بین‌حوضه‌ای فلات مرکزی ایران به‌عنوان مورد مطالعه ابتدا درخت خطای نظیر هر طرح تشکیل شد. درخت خطای تدوین‌شده شامل، ده رویداد به‌عنوان رویدادهای پایه، چهار رویداد به‌عنوان رویدادهای میانی و رویداد شکست طرح انتقال آب بین‌حوضه‌ای به‌عنوان رویداد رأس، می‌باشد. برای ارتباط بین

رویدادهای پایه به رویدادهای میانی شکست اجتماعی و شکست زیست‌محیطی و منابع آبی به‌دلیل حساسیت بیش‌تر رویدادهای پایه و بالابردن احتمال شکست رویداد میانی در صورت وقوع، از دروازه OR استفاده شد و برای ارتباط بین رویدادهای پایه و رویدادهای میانی شکست فنی و شکست اقتصادی به‌دلیل حساسیت کم‌تر از دروازه AND استفاده شد. هم‌چنین به‌دلیل اهمیت بالای رویدادهای میانی در شکست رویداد راس برای ارتباط بین رویدادهای میانی و رویداد راس نیز از دروازه OR استفاده شد، شکل درخت خطای موردنظر مطابق شکل (٦) می‌باشد.

سپس، به منظور تحلیل ریسک کمی رویداد رأس احتمال شکست هر رویداد پایه براساس گزارش‌ها، پژوهش‌ها و نظرهای ۲۰ نفر از متخصصین اخذ شد و میانگین نظرات حاصل شد، در ادامه احتمال شکست متناظر با هر رویداد پایه به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار OpenFTA معرفی شد و ریسک رویدادهای راس نیز محاسبه شد که نتایج در جدول (۲) قابل مشاهده است.

رتبه‌بندی سناریوهای انتقال آب نیز باتوجه به ریسک محاسبه‌شده آن‌ها در جدول بالا قابل مشاهده است. طبق این رتبه‌بندی سناریو انتقال آب از حوضه بهشت‌آباد از طریق پمپاژ و تونل کوتاه از دبی پایه بهشت‌آباد برای استان اصفهان و از حوضه خرسان برای استان‌های یزد و کرمان (S8) به‌عنوان سناریو برتر و سناریو انتقال آب از حوضه گوکان سد گوکان به استان اصفهان و از حوضه خرسان برای یزد و کرمان (S7) و انتقال آب از حوضه بهشت‌آباد از طریق پمپاژ و توتل کوتاه از دبی پایه بهشت‌آباد برای استان‌های اصفهان و یزد و از حوضه خرسان سد خوسان ۳ برای استان کرمان (S6) به‌ترتیب به‌عنوان رتبه دوم و سوم شناخته شدند.

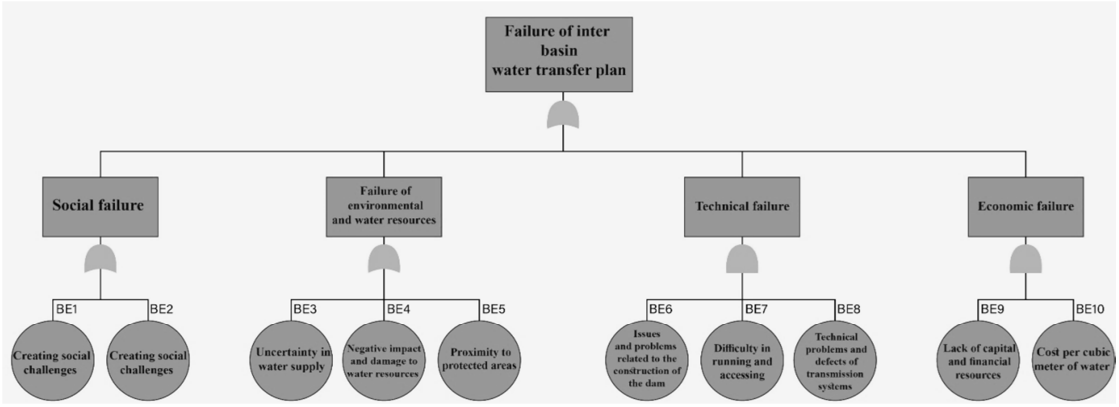

Figure 6. Inter-basin water transfer project's fault tree

Table 2. Probability of failure of basic events and top event and ranking of inter-basin water transfer scenarios based on calculated risk

Scenario	Probability of failure of basic events										Risk of failure of inter-basin water transfer plan	Rank
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
S1	0.5	0.25	0.25	0.5	0.5	0.25	0.5	0.75	0.25	0.07	0.9373	4
S2	0.93	0.75	0.25	0.75	0.75	0.93	0.75	0.75	0.75	0.5	0.9997	8
S3	0.75	0.5	0.25	0.25	0.25	0.5	0.25	0.25	0.75	0.5	0.9680	5
S4	0.75	0.5	0.07	0.75	0.25	0.5	0.75	0.75	0.07	0.07	0.9844	6
S5	0.93	0.75	0.07	0.5	0.5	0.75	0.75	0.75	0.25	0.25	0.9977	7
S6	0.25	0.25	0.07	0.25	0.5	0.25	0.25	0.5	0.25	0.25	0.8218	3
S7	0.25	0.07	0.07	0.25	0.5	0.25	0.25	0.5	0.07	0.07	0.7655	2
S8	0.25	0.07	0.07	0.25	0.25	0.25	0.25	0.07	0.07	0.5	0.6494	1

رتبه‌بندی رویدادهای پایه

رتبه‌بندی رویدادهای پایه براساس میزان تأثیر آن‌ها در وقوع رویداد راس است. از طرفی به‌دلیل بررسی سناریوهای مختلف این پارامتر در بهترین و بدترین سناریو مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور از شاخص بیرنبام (BI) طبق رابطه (۳) استفاده شده است. بنا بر نتایج ارائه‌شده در جدول (۳)، در بهترین سناریو (S8)، سه رویداد پایه ایجاد چالش‌های اجتماعی، تأثیر منفی و آسیب به منابع آب حوضه‌های درگیر در پروژه و مجاورت با مناطق پنج‌گانه حفاظت‌شده در رتبه اول و به‌عنوان مؤثرترین رویداد شناخته شدند. در ادامه رویدادهای ایجاد چالش‌های سیاسی و عدم اطمینان‌پذیری در تأمین منابع آب در رتبه دوم، کمبود سرمایه و منابع مالی در رتبه سوم و رویدادهای قیمت تمام‌شده هر مترمکعب آب، مشکلات و ایرادات فنی سامانه های انتقال و صعوبت اجرا و دسترسی و مسائل و مشکلات مربوط به بدنه سد به‌ترتیب در رتبه چهار تا ششم قرار گرفتند. در بدترین سناریو (S2)، رویداد پایه ایجاد چالش‌های اجتماعی در رتبه اول قرار گرفته و به‌عنوان مؤثرترین رویداد شناخته شد سپس رویدادهای ایجاد چالش‌های سیاسی، تأثیر منفی و آسیب به منابع آب حوضه‌های درگیر در پروژه و مجاورت با مناطق پنج‌گانه حفاظت‌شده در رتبه دوم، رویدادهای صعوبت اجرا و دسترسی و مشکلات و ایرادات فنی سامانه‌های انتقال در رتبه سوم و رویدادهای عدم اطمینان‌پذیری در تأمین منابع آب، قیمت تمام‌شده هر مترمکعب آب و مسائل و مشکلات مربوط به بدنه سد به‌ترتیب در رتبه چهار تا ششم قرار گرفتند و رویداد کمبود سرمایه و منابع مالی با کسب رتبه هفتم به‌عنوان کم‌اثرترین رویداد در وقوع رویداد راس در این سناریو شناخته شد.

تحلیل کمی رویداد رأس به‌صورت فازی

در این بخش براساس ریسک کمی رویدادهای پایه که پیش‌تر براساس گزارش‌های، پژوهش‌ها و نظرهای متخصصین اخذ و در جدول (۲) اعلام شد، طبق شکل (۵) به‌کمک روش برش آلفا، در ده برش با دقت ۰/۱، برش آلفا زده شد. سپس به‌کمک روابط (۵) و (٦) که پیش‌تر شرح داده شدند، ریسک رویدادهای میانی و راس محاسبه شد، سپس به‌کمک روش مرکز سطح و طبق رابطه (٤) ریسک محاسبه‌شده رویداد رأس، دی‌فازی‌سازی شد. نتایج ریسک رویداد رأس (شکست پروژه انتقال آب بین‌حوضه‌ای) در هشت سناریو در جدول (٤) قابل مشاهده است.

طبق جدول (٤) و براساس ریسک‌های محاسبه‌شده، مشابه حالت درخت خطای صریح سناریو انتقال آب از حوضه بهشت‌آباد از طریق پمپاژ و تونل کوتاه از دبی پایه بهشت‌آباد برای استان اصفهان و از حوضه خرسان برای استان‌های یزد و کرمان (S8) به‌عنوان سناریو برتر، سناریو انتقال آب از حوضه گوکان سد گوکان به استان اصفهان و از حوضه خرسان برای یزد و کرمان (S7) و انتقال آب از حوضه بهشت‌آباد از طریق پمپاژ و توتل کوتاه از دبی پایه بهشت‌آباد برای استان‌های اصفهان و یزد و از حوضه خرسان برای استان کرمان (S6) به‌ترتیب به‌عنوان رتبه دوم و سوم شناخته شدند. شکل (۷) نمونه‌ای از خروجی ریسک رویداد رأس به‌صورت فازی را در سناریو برتر (S8) نشان می‌دهد. ریسک کل سناریوها در دو حالت صریح و فازی تقریباً میزان برابری داشتند. با این تفاوت که در مدل فازی به‌دلیل درنظرگرفتن برخی از عدم قطعیت در برخی سناریوها مقادیر ریسک نسبتاً کم‌تری نسبت به مدل صریح به‌دست آمد، اما هر دو مدل از نظر رتبه‌بندی نتایج یکسانی ارائه دادند.

رتبه‌بندی رویدادهای پایه

همان‌طورکه پیش‌تر گفته شد رتبه‌بندی رویدادهای پایه براساس میزان تأثیر آن‌ها در وقوع رویداد رأس است. به این منظور از شاخص اهمیت فازی (FIM) طبق روابط (۷) و (۸) استفاده شده است. نتایج این رتبه‌بندی نیز مشابه رتبه‌بندی براساس شاخص BI به‌دست‌آمده و در جدول (۵) قابل ملاحظه است. تنها تفاوت در این دو رتبه‌بندی بنابرنتایج ارائه‌شده در جدول (۵)، در بدترین سناریو (S2)، رویداد عدم اطمینان‌پذیری در تأمین منابع آب در رتبه سوم و رویدادهای صعوبت اجرا و دسترسی و مشکلات و ایرادات فنی سامانه‌های انتقال در رتبه چهارم قرار گرفتند.

Table 3. Ranking of basic events based on BI index

	Event	Social failure		Failure of environmental and water resources			Technical failure			Economic failure	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S8	BI	0.4674	0.3769	0.3769	0.4674	0.46742	0.0061	0.0061	0.022	0.1816	0.0254
	Rank	1	2	2	1	1	6	6	5	3	4
S2	BI	0.0034	0.0009	0.0003	0.0009	0.0009	0.00028	0.00035	0.00035	0.00019	0.00029
	Rank	1	2	4	2	2	6	3	3	7	5

Table 4. Fuzzy risk of top event for all scenarios and ranking of inter-basin water transfer scenarios

Scenario	Fuzzy probability of top event failure	Defuzzified probability of top event failure	Rank
S1	(0.7688,0.9373,0.9903)	0.9084	4
S2	(0.9947,0.9997,0.9999)	0.9991	8
S3	(0.8577,0.9680,0.9967)	0.9486	5
S4	(0.9229,0.9844,0.9990)	0.9727	6
S5	(0.9754,0.9977,0.9999)	0.9924	7
S6	(0.5430,0.8218,0.9522)	0.7834	3
S7	(0.4767,0.7655,0.9285)	0.7286	2
S8	(0.3068,0.6494,0.8692)	0.6097	1

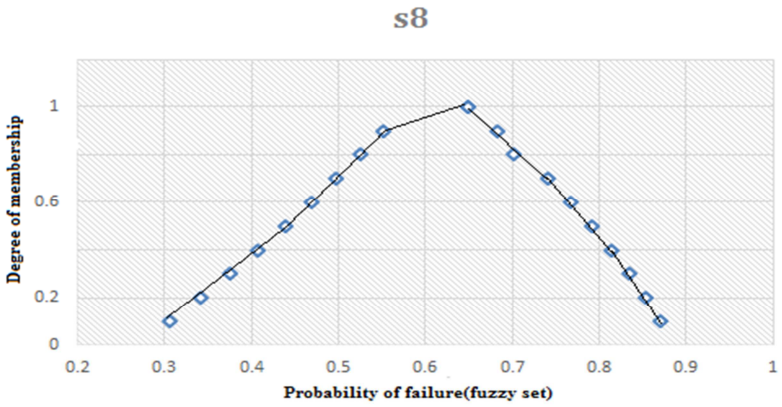

Figure7. Fuzzy probablity of failure in the best scenario (S8)

Table 5. Ranking of basic events based on FIM index

	Event	Social failure		Social failure			Failure of environmental and water resources			Economic failure	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S8	FIM	7.479	6.140	6.140	7.479	7.479	0.0879	0.0879	2.632	0.2834	0.2976
	Rank	1	2	2	1	1	6	6	5	3	4
S2	FIM	0.1323	0.0566	0.0231	0.0566	0.0566	0.01317	0.0170	0.0170	0.0097	0.0169
	Rank	1	2	3	2	2	6	4	4	7	5

نتیجه‌گیری

مشابه بسیاری از مناطق واقع در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، حوضه فلات مرکزی ایران که به لحاظ مساحت یکی از بزرگ‌ترین حوضه‌های آبریز کشور محسوب می‌شود، طی سال‌های اخیر با مشکل کمبود آب به‌ویژه در بخش شرب مواجه شده است. یکی از روش‌های رویارویی با چالش کمبود آب شرب انتقال آب بین‌حوضه‌ای می‌باشد. در این مطالعه، برای انتقال آب بین‌حوضه‌ای به فلات مرکزی ایران و تأمین کمبود ۵۸۰ میلیون مترمکعب آب شرب استان‌های اصفهان، یزد و کرمان، هشت سناریو با درنظرگرفتن چهار معیار ریسک‌های سیاسی و اجتماعی، ریسک‌های زیست‌محیطی و منابع آبی، ریسک‌های فنی و صعوبت اجرا و ریسک‌های اقتصادی انتخاب شد. این پژوهش برای نخستین‌بار به تحلیل ریسک طرح‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای با استفاده از روش تحلیل ریسک درخت خطا پرداخته است. برای این منظور چهار دسته خطرات و ریسک‌های پیش روی طرح‌های انتقال آب براساس گزارش‌ها، پژوهش‌ها و نظرهای متخصصین شناسایی شدند و رویدادهای مؤثر بر این چهار دسته،در قالب رویدادهای پایه جای گرفتند. مدل درخت خطا ابتدا به‌صورت صریح و سپس به‌صورت فازی جهت درنظرگرفتن عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها و نظرات کارشناسی تشکیل و بررسی شد. نتایج کلی مدل درخت خطا به دو صورت صریح و فازی نشان داد که سناریوی هشتم با عنوان سناریوی انتقال آب از حوضه بهشت‌آباد از طریق پمپاژ و تونل کوتاه از دبی پایه بهشت‌آباد برای استان اصفهان و از حوضه خرسان-سد خرسان ۳ برای استان‌های یزد و کرمان، سناریوی برتر برای انتقال آب به فلات مرکزی ایران است. ریسک این سناریو که به‌عنوان سناریو برتر شناخته شده است به‌صورت صریح و فازی به‌ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۶۱ محاسبه شد. با توجه به احتمال شکست بالای به‌دست‌آمده، اقدام به رتبه‌بندی رویدادهای پایه از نظر سهم وقوع در رویداد رأس شد. رتبه‌بندی رویدادهای پایه با استفاده از شاخص BI و FIM ، نشانگر اهمیت معیارهای اجتماعی- سیاسی و زیست‌محیطی در شکست طرح‌های انتقال آب است. در این پژوهش چون رویدادهای پایه به‌صورت مستقل فرض شدند از پیچیدگی محاسبات تا حد زیادی کاسته شده است، اما ردیابی مسیر منتهی به رویداد رأس و اولویت‌بندی رویدادهای پایه از مهم‌ترین مزیت‌های این روش نسبت به روش‌های مشابه می‌باشد. در همین راستا پیشنهاد می‌شود برای حل این مشکل از تبدیل درخت خطا به شبکه‌های بیزین استفاده کرد.

پی‌نوشت‌ها

1. Ordered Weighted Averaging
2. Multi-Criteria Decision Making
3. Lake Poopo
4. Analytical Hierarchy Process
5. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
6. Principal Component Analysis
7. Composite Indicators of Sustainability
8. Complex Proportional Assessment
9. Decision Making Trial and Evaluation Laboratory
10. Borda count
11. Fault Tree Analysis (FTA)
12. Gothenburg City
13. Basic event (BE)
14. Beibu Gulf
15. Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA)
16. Top Event
17. Birnbaum Importance
18. Fuzzy Importance Measure

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Abedzadeh, S., Roozbahani, A., & Heidari, A. (2020). Risk Assessment of Water Resources Development Plans Using Fuzzy Fault Tree Analysis.*Water Resources Management*, 7(1), 29-45.
2. Babaei, M., Roozbahani, A., & Hashemy Shahdany, SM. (2018). Risk Assessment of Agricultural Water Conveyance and Delivery Systems by Fuzzy Fault Tree Analysis Method. *Water Resources Management*, 32(12), 4079–4101.
3. Calizaya, A., Meixner, O., Bengtsson, L., & Berndtsson, R. (2010). Multi-criteria decision analysis (MCDA) for integrated water resources management (IWRM) in the Lake Poopo Basin, Bolivia. *Water Resources Management*, 24(10), 2267-89.
4. Cox, W.E. (1999). Determining when interbasin water transfer is justified: criteria for evaluation. Proceedings, International Workshop on Interbasin Water Transfer, UNESCO, Paris, 173-178.
5. Ferdous, F., Miao, H., Leaird, D. E., Srinivasan, K., Wang, J., Chen, L., ... & Weiner, A. M. (2011). Spectral line-by-line pulse shaping of on-chip microresonator frequency combs. *Nature Photonics*, 5(12), 770-776.
6. Gachlou, M., Roozbahani, A., & Banihabib, ME. (2019). Comprehensive risk assessment of river basins using Fault Tree Analysis. *Journal of hydrology*, 5(4), 1321-1334.
7. Jian, H.U., Junying, C., Jiahong, L., & Dayong, Q. (2011). Risk identification of sudden water pollution on fuzzy fault tree in beibu-gulf economic zone. *Procedia Environmental Sciences*, 10(C), 2413-2419.
8. Kefayati, M., Saghafian, B., Ahmadi, A., & Babazadeh, H. (2018). Empirical evaluation of river basin sustainability affected by inter-basin water transfer using composite indicators. *Water and Environment Journal*, 32(1), 104-111.
9. Liang, G. S., & Wang., M. J. (1991). A fuzzy multi-criteria decision-making method for facility site selection. *The International Journal of Production Research*, 29(11), 2313-2330.
10. Lindhe, A., Rosén, L., Norberg, T., & Bergstedt, O. (2009). Fault tree analysis for integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems. *Water research*, 43(6), 1641-1653.
11. Humaimi Mahmood, N., Lim, P. C., Mazalan, S. M., & Abdul Razak, M. A. (2013). Blood cells extraction using color based segmentation technique, *International journal of life sciences biotechnology and pharma research*, 2(2), 2250-3137.
12. Misra, Krishna B., & Soman, K. P. (1995). Multi State Fault Tree Analysis Using Fuzzy Probability Vectors and Resolution Identity." Reliability and safety analyses under fuzziness. *Physica-Verlag HD*, 113-125.
13. Mohammadi, F., Fatahi, R., Samadi Boroujeni, H., & Javadi, M. (2012). Assessment of the sensitivity of environmental and social criteria in the ranking of suggested alternatives for the Beheshtabad inter-basin Water Transfer Project using the AHP method. *National Conference on Inter-basin Water Transfer (Challenges and Opportunities), Iran*. (In Persian)
14. Pan, Z.J., & Tai, Y.C. (1988). Variance importance of system components by Monte Carlo. *IEEE Transactions on Reliability*, 37(4), 421-423.
15. Peng, Z., Xiaodong, M., Zongrun, Y., & Zhaoxiang, Y. (2008). An approach of fault diagnosis for system based on fuzzy fault tree. *MultiMedia and Information Technology, MMIT'08. International Conference on IEEE*, China.
16. Razavi Toosi, S., Samani, J.M.V. & Koorehpazan Dezfuli, A. (2011). Ranking Inter-basin Water Resources Projects Using Fuzzy Multiple Attribute Group Decision Making Method. *Iran Water Resources Research*, 3(2), 1-9. (In Persian).
17. Roozbahani, A., Ghased, H., & Hashemy Shahdany, SM. (2020). Inter-basin water transfer planning with grey COPRAS and fuzzy COPRAS techniques: A case study in Iranian Central Plateau. *Journal of Science of the Total Environment*, 726, 138499.
18. Sadiq, R., Kleiner, Y., & Rajani, B. (2007). Water quality failures in distribution networks-risk analysis using fuzzy logic and evidential reasoning. *Risk analysis*, 27(5),1381-1394.
19. Tabesh, M., Roozbahani, A., & Hadigol, F. (2018). Risk Assessment of Water Treatment Plants Using Fuzzy Fault Tree Analysis (Case Study: Jalaliyeh Water Treatment Plant). *Journal of Water and Wastewater*, 29(4),132-144. (In Persian)
20. Taheriyoun, M., & Moradinejad, S. (2015) Reliability analysis of a wastewater treatment plant using fault tree analysis and Monte Carlo simulation. *Environmental monitoring and assessment*, 187(1), 4186.

21. Yager, R.R. (1980). On a general class of fuzzy connectives. *Fuzzy sets and Systems*, 4(3), 235-242.
22. Dong, Y., & Datao, Y. (2005). Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis. *Journal of loss prevention in the process industries*, 18(2), 83-88.
23. Zarghami, M., Szidarovszky, F., & Ardakanian, R. (2009). Multi-attribute decision making on inter-basin water transfer projects. *Scientia Iranica. Transaction E, Industrial Engineering*, 16(1), 73-80.