اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۷، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۹، ص ۴۵-۲۹

ارزیابی ریسک طرح‌های توسعهٔ منابع آب با روش تحلیل درخت خطا (مطالعهٔ موردی: ناحیهٔ ۴ مکران و بندرعباس)

سعیده عابدزاده[۱]، عباس روزبهانی[۲*]، علی حیدری[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. دکترای مدیریت منابع آب، شرکت توسعهٔ منابع آب و نیروی ایران، تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۵/۱۴ ؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۱۱/۲۸)

چکیده

امروزه پراکنش نامناسب بارش وکاهش نزولات جوی، به علاوهٔ افزایش جمعیت و به تبع آن، افزایش مصرف و تقاضای آب، جامعه را به استفاده از طرح‌های توسعهٔ منابع آب سوق داده است. همچنین، یکی از اهداف بلندمدت راهبردی آب کشور، برقرار کردن تعادل بین میزان تقاضای آب و منابع آب موجود با توجه به شاخص‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی است. از این‌رو، تحلیل ریسک طرح‌های توسعهٔ منابع آب با توجه به شاخص‌های توسعهٔ پایدار ضرورت می‌یابد. در پژوهش حاضر برای نخستین‌بار، تکنیک تحلیل درخت خطا به منظور ارزیابی ریسک طرح‌های توسعهٔ منابع آب، تحت چارچوب توسعهٔ پایدار استفاده شده است. پس از تعیین رویداد رأس، عوامل منجر به وقوع آن شامل شکست شاخص‌های اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و منابع آب، شناسایی شدند. مدل پیشنهادی در قالب مطالعهٔ موردی برای طرح‌های توسعهٔ منابع آب ناحیهٔ ۴ سواحل مکران تا شهر بندرعباس ارائه شد. پس از محاسبهٔ عملکرد منطقه در ونسیم، احتمال شکست شاخص‌های توسعهٔ پایدار براساس خروجی ونسیم برآورد شد و به عنوان ورودی درخت خطای پیشنهادی به کار رفت. نتایج مطالعهٔ حاضر نشان داد احتمال شکست بهترین و بدترین سناریو و همچنین شرایط موجود برای نیازهای آتی، به‌ترتیب برابر ۳۸، ۹۰ و ۵۰ درصد برآورد شد. در نهایت، به دلیل ریسک زیاد محاسبه‌شده، به رتبه‌بندی رویدادهای پایه براساس سهمی که در وقوع رویداد رأس دارند، پرداخته شد. نتایج رتبه‌بندی نشان داد مؤثرترین رویدادهای پایه در بهترین سناریو به‌ترتیب، شکست اجتماعی و اقتصادی و در بدترین سناریو، شکست اقتصادی و اجتماعی هستند.

کلیدواژگان: تحلیل درخت خطا، توسعهٔ پایدار، طرح‌های توسعهٔ منابع آب، ناحیه مکران، ونسیم.

* نویسندهٔ مسئول

Email: roozbahany@ut.ac.ir

مقدمه

با توجه به نیاز روزافزون به آب به عنوان حیاتی‌ترین عنصر زندگی و با توجه به محدودیت منابع آب قابل استحصال، شناسایی ابزارهای مدیریتی برای تخصیص بهتر آب اهمیت می‌یابد. از طرفی، برنامه‌ریزی‌های پایدار طوری طراحی و مدیریت می‌شوند که اهداف جامعهٔ در حال حاضر و آینده را مهیا سازند، به طوری که پایداری اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی را حفظ کنند. توسعهٔ پایدار به معنای تلفیق اهداف اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی برای حداکثرسازی رفاه انسان فعلی بدون آسیب به توانایی‌های نسل‌های آینده برای برآوردن نیازهای آنهاست [۱]. بنابراین، ارزیابی طرح‌های مدیریت منابع آب برای ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا به منظور اهداف توسعهٔ پایدار، به روشی نوین و کارآمد احتیاج دارد. روش تحلیل درخت خطا (FTA)[1]، عموماً برای تجزیه و تحلیل اطمینان‌پذیری سیستم و ارزیابی ریسک استفاده می‌شود. همچنین، در سامانه‌های آبی مختلف ازجمله تصفیه‌خانه‌ها، شبکه‌های آبرسانی و آبیاری کاربرد فراوانی دارد. از این‌رو، در تحقیقی که Sadiq و همکارانش انجام دادند از روش تحلیل درخت خطا برای ارزیابی ریسک شکست‌های موجود در شبکهٔ توزیع آب شهری استفاده کردند. رویداد نامطلوب در تحقیق یادشده «کیفیت نامناسب آب در سیستم توزیع آب شهری» انتخاب شد و رویدادهای آلودگی آب در منطقهٔ ورودی، خوردگی اجزای سیستم و شکست در تصفیه‌خانه از جمله عوامل مؤثر در وقوع رویداد رأس شناخته شدند [۲]. در مطالعهٔ دیگری Sadiq و همکارانش ریسک شکست کیفی آب در یک شبکهٔ توزیع آب شهری با رویکرد درخت خطا را ارزیابی کردند. در این مطالعه احتمال رویداد پایه به صورت فازی تعریف شده است [۳]. همچنین، لیندهه و همکارانش از درخت خطا برای تحلیل ریسک جامع و احتمالاتی سامانهٔ آب شرب شهر گوتنبرگ[2] سوئد استفاده کردند. رویدادهای پایه[3] (BE) در پژوهش یادشده در دو بخش اصلی شکست کمی (عدم تحویل آب به مصرف‌کنندگان) و شکست کیفی (عدم تطابق با استانداردهای کیفی آب شرب) برای سه زیرسامانهٔ آب خام ورودی، تصفیه‌خانه و سامانهٔ توزیع در نظر گرفته شدند [۴]. طاهریون و همکارانش قابلیت اطمینان مربوط به تصفیه‌خانهٔ شهرک غرب با رویکرد درخت خطا را ارزیابی کردند که رویداد رأس، تخطی BOD پساب خروجی از میزان استاندارد است. در تحقیق یادشده تحلیل کمی براساس برش‌های حداقل انجام گرفت [۵]. ازجمله کاربردهای گستردهٔ تحلیل درخت خطا، پژوهش انجام‌شده در یک تصفیه‌خانهٔ آب توسط Stein و همکارانش است. در این پژوهش از روش یادشده به عنوان نوعی سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای شناسایی ارتباط بین رویدادهای پایه و اثری که بر رویداد رأس[4] می‌گذارند، استفاده شده است [۶]. تابش و همکارانش به ارزیابی ریسک تصفیه‌خانهٔ جلالیه تهران با روش تحلیل ریسک درخت خطا با دو رویکرد ساده و فازی پرداختند که رویداد نامطلوب در این ساختار کمیت و کیفیت نامطلوب آب بود. نتایج پژوهش یادشده نشان داد رویکرد فازی به دلیل در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در دیدگاه‌های کارشناسان و ماهیت خطرات تهدیدکننده، ریسک بیشتری را نسبت به رویکرد ساده برآورد می‌کند. همچنین، رویدادهای طراحی نامناسب مخزن، خرابی تجهیزات برق‌رسانی، شکست لولهٔ انتقال و تعمیر و نگهداری نامناسب پمپ‌ها بیشترین سهم را در وقوع رویداد کمی و کیفی نامناسب آب داشتند [۷]. نمونهٔ 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 نخستین‌بار نوعی چارچوب منحصربه‌فرد به منظور 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 [۸]. در مطالعهٔ دیگری، گچلو و همکارانش با استفاده از روش تحلیل درخت خطا به ارزیابی ریسک جامع حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه پرداختند، که در آن رویداد رأس «ریسک شکست منابع آب حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه» در نظر گرفته شد. رتبه‌بندی رویدادهای پایه نشان داده است که شکست کیفیت، بیشترین تأثیر را در وقوع رویداد رأس دارد [۹]. مطالعات یادشده نشان‌دهندهٔ کاربرد گستردهٔ روش تحلیل درخت خطا در ارزیابی ریسک

1. Fault Tree Analysis
2. Gothenburg City
3. Basic event (BE)
4. Top event (TE)

سیستم‌ها و سامانه‌های آبی است. همچنین، به دلیل داشتن قابلیت رتبه‌بندی رویدادهای پایه و استفاده از دروازه‌های منطقی، روش تحلیل درخت خطا از کارآمدترین روش‌ها در ارزیابی ریسک است.

برای ارزیابی ریسک طرح‌های توسعهٔ منابع آب تحت چارچوب توسعهٔ پایدار که موضوع تحقیق حاضر است تا کنون مطالعاتی انجام شده است که از آن میان می‌توان به پژوهش Raju و همکارانش که در یک منطقهٔ آبیاری واقع دراسپانیا انجام شد، اشاره کرد. در پژوهش یادشده به بررسی استراتژی‌های مختلف برای آبیاری پرداخته شد. در ضمن، استراتژی‌ها براساس اهداف اقتصادی و اجتماعی و محیطی توسعهٔ پایدار با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره[1](MCDM) اولویت‌بندی شدند تا با وجود رشد جمعیت و فعالیت‌های کشاورزی، با به کار بردن بهترین استراتژی، از مشکلات پایداری آب در منطقه پیشگیری شود [۱۰]. Yilmaz و همکارانش نوعی مدل مدیریت منابع آب به منظور تصمیم‌گیری مبتنی بر شاخص‌های توسعهٔ پایدار با توجه به ابعاد زیستی، اجتماعی، اقتصادی طراحی کردند. پژوهشگران یادشده از ابزار Weap[2] برای مدل‌سازی منابع و مصارف آبی در منطقهٔ مطالعه‌شده استفاده کردند. آنها برای تصمیم‌گیری از سه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده کردند و به اولویت‌بندی استراتژی‌های مدیریت منابع آب پرداختند [۱۱]. عبادی و همکارانش با توجه به پویایی زیاد سیستم‌های مدیریت منابع آب از مدل ونسیم[3] برای مدل‌سازی سیستم منابع آب پایین‌دست سد کرخه استفاده کردند. پس از تأیید مدل، شاخص‌های پایداری تحت سناریوهای شبیه‌سازی‌شده و بسته‌های مختلف سیاست‌گذاری بررسی شدند. در پایان، بسته‌های سیاست مربوط به هر سناریو براساس فرایند سلسله‌مراتب تحلیلی رتبه‌بندی شدند [۱۲]. در تحقیقی دیگر، بنی‌حبیب و همکارانش استراتژی‌های مدیریت منابع آب در منطقهٔ شاهرود را با رویکرد MCDM تحت معیارهای توسعهٔ پایدار مطابق با استانداردهای بین‌المللی اولویت‌بندی کردند. در این مطالعه معیارهای توسعهٔ پایدار عبارت بودند از: اقتصادی، پذیرش عمومی، حفاظت از محیط زیست، اثربخشی، امکان‌سنجی و انعطاف‌پذیری. در ضمن، استراتژی‌ها با استفاده از تکنیک SWOT[4] انتخاب شدند [۱۳]. همچنین، کفایتی و همکارانش نوعی رویکرد تجربی را برای ارزیابی پایداری حوضه‌های رودخانهٔ کارون تحت پروژهٔ انتقال آب بین حوضه‌ای از شمال حوضهٔ رودخانهٔ کارون به حوضهٔ گاوخونی ایران، توسعه دادند. به این منظور، آنها از رویکرد CIA[5](شاخص‌های ترکیبی پایداری) استفاده کردند و ۱۵ شاخص پایداری[6] که شامل سه معیار عمدهٔ اقتصادی، اجتماعی و محیطی می‌شد را برای داشتن نتایجی قوی‌تر ترکیب کردند. در مطالعهٔ یادشده برای تعیین شاخص‌های اصلی و فرعی از تجزیه و تحلیل چندمتغیره (PCA) استفاده شد [۱۴].

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد تا کنون بیشتر مطالعات انجام‌شده در زمینهٔ ارزیابی طرح‌های توسعهٔ منابع آب براساس رویکرد قطعی و تصمیم‌گیری چندمعیاره بوده است و پژوهشی در بخش تحلیل ریسک طرح‌های توسعهٔ منابع آب با استفاده از رویکرد درخت خطا انجام نگرفته و از رویکرد احتمالاتی درخت خطا برای دستیابی به یک شاخص جامع و یکپارچه که پوشش‌دهندهٔ عمدهٔ شاخص‌های توسعهٔ پایدار از جمله اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و منابع آبی باشد، استفاده نشده است. از این‌رو، در پژوهش حاضر برای نخستین‌بار، تکنیک تحلیل درخت خطا برای ارزیابی ریسک طرح‌های توسعهٔ منابع آب، تحت چارچوب توسعهٔ پایدار استفاده شده است. هدف اصلی در پژوهش حاضر، ارائهٔ نوعی رویکرد جامع با بهره‌گیری از مدل درخت خطا برای ارزیابی مبتنی بر ریسک طرح‌های توسعهٔ منابع آب در چارچوب توسعهٔ پایدار است. نتایج حاصل از این رویکرد، می‌تواند سبب افزایش اطمینان‌پذیری طرح‌های توسعهٔ منابع آب منتخب شود. به این منظور، رویکرد پیشنهادی برای ارزیابی ریسک طرح‌های توسعهٔ منابع آب ناحیهٔ ۴ سواحل مکران[7] و شهر بندرعباس واقع در استان هرمزگان، که به دلیل برنامه‌های توسعهٔ اقتصادی سواحل جنوبی کشور، از نظر تأمین آب برای مصارف مختلف ازجمله شرب، صنعت وکشاورزی مهم

1. Multi Criteria Decision Making(MCDM)
2. Water Evaluation And Planning System (WEAP)
3. Vensim
4. Strengths- Weaknesses -Opportunities –Threats (SWOT)
5. Composite Indicators of Sustainability (CIA)
6. Stability Index
7. Makran Beaches

هستند، به کار برده شد. برای برآورد احتمال شکست رویدادهای رأس و میانی درخت خطا، از نتایج مدل‌سازی و شبیه‌سازی منابع آب در هر سناریو با کمک مدل شبیه‌ساز ونسیم استفاده شد و ریسک نرسیدن به اهداف توسعهٔ پایدار به عنوان رویدادهای پایه وارد درخت خطا شد. در ادامه، چگونگی انجام پژوهش شرح داده شده است.

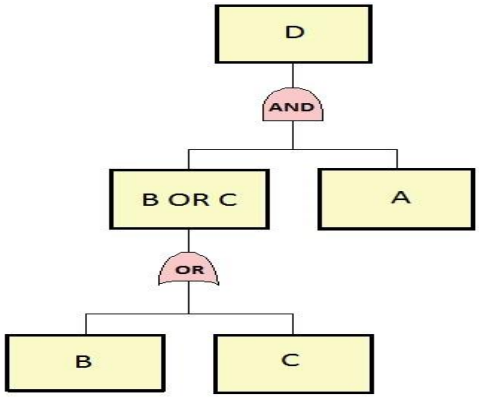
مواد و روش‌ها

با توجه به شکل ۱ که مراحل انجام پژوهش را نشان می‌دهد، پس از مطالعات انجام‌شده، شاخص‌های مربوط به آن استخراج شده و پس از تدوین درخت خطا، به انتخاب منطقهٔ مطالعه‌شده پرداخته شده است.

شکل ۱. مراحل انجام پژوهش

مدل تحلیل ریسک درخت خطا

از جمله روش‌های تحلیل ریسک ترکیبی می‌توان به روش‌های تحلیل خطای انسانی، تحلیل درخت رویداد، روش‌های سلسله‌مراتبی، شبکهٔ بیزین، درخت خطا و غیره اشاره کرد. درخت خطا از جمله روش‌های تحلیل ریسک ترکیبی است که رویکرد قیاسی دارد. به این صورت که مدل، مسیر خطاها را از یک رویداد یا شرایط نامطلوب به عنوان رویداد رأس تا رسیدن به خطاها یا عیوبی که به آنها عوامل آغازگر یا رویداد پایه گفته می‌شود، دنبال می‌کند. این روش نوعی شرح گرافیکی و منطقی از ترکیب شکست‌های مختلف است [۱۵]. دروازه‌ها منطق موجود در درخت خطا را مشخص می‌کنند و رویدادهای پایه را به رویدادهای فرعی و درنهایت، به رویدادهای رأس مربوط می‌کنند. در صورتی که شکست هم‌زمان دو رویداد سبب شکست رویداد بالاتر شود، از دروازهٔ AND استفاده می‌شود و اگر شکست حداقل یکی از رویدادها منجر به شکست رویداد بالاتر شود، دروازهٔ OR متصل‌کنندهٔ آنهاست. در شکل ۲ شکست «D» به عنوان رویداد رأس در نظر گرفته شده است. همچنین، شکست «B» و شکست «C» دو رویداد پایه هستند که با دروازهٔ OR به هم متصل شده‌اند؛ اما بین رویداد فرعی شکست «B» یا «C» و رویداد پایهٔ شکست «A» دروازهٔ OR به کار رفته است.



شکل ۲. ساختار یک درخت خطای ساده

با احتمال شکست رویدادهای پایه براساس سوابق ثبت‌شده و یا دیدگاه‌های کارشناسان به صورت کمی و کیفی برآورد می‌شود که در صورت نبود اطلاعات و یا ناقص بودن آنها از دیدگاه‌های کارشناسان به صورت متغیر

زبانی استفاده شده و سپس به عدد صریح تبدیل می‌شود. پس از برآورد احتمال شکست رویدادهای پایه برای رسیدن به احتمال شکست رویداد رأس دروازه‌های AND و OR براساس روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شود [۱۶].

$$P=\prod_{i=1}^{n} P_i \qquad (۱)$$

$$P=1-\prod_{i=1}^{n} (۱ - P_i) \qquad (۲)$$

P_i احتمال شکست رویداد i ام و P احتمال شکست رویداد بیشتر 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[1] برای رتبه‌بندی رویدادهای پایه استفاده می‌شود. شاخص یادشده براساس رابطهٔ ۳ تعریف شده است [۱۷].

$$P=\prod_{i=1}^{n} P_i \qquad (۳)$$

در رابطهٔ یادشده $Q_{qi=1}$ احتمال شکست رویداد رأس در زمانی است که رویداد پایهٔ i ام به طور کامل رخ داده باشد. و $Q_{qi=0}$ احتمال شکست رویداد رأس در زمانی است که رویداد پایهٔ i ام هرگز رخ نداده باشد و هر چقدر این شاخص افزایش یابد، آن رویداد در شکست رویداد رأس مؤثرتر است.

منطقهٔ مطالعه‌شده

با توجه به اینکه در مطالعهٔ حاضر، مدل درخت خطا برای نخستین‌بار برای ارزیابی ریسک طرح‌های توسعهٔ منابع آب استفاده می‌شود، بنابراین برای مدل پیشنهادی، طرح‌های توسعهٔ منابع آب ناحیهٔ ۴ سواحل مکران تا شهر بندرعباس واقع در استان هرمزگان به دلیل وجود گزینه‌های مختلف تأمین آب از منابع آب متعارف (منابع داخل سرزمین) و غیرمتعارف (منابع آب دریا) و ضرورت مقایسه و انتخاب گزینه‌ها از نگاه توسعهٔ پایدار به عنوان مطالعهٔ موردی انتخاب شده‌اند. منابع تأمین آب در این مناطق، منابع آب‌های سطحی، زیرزمینی و طرح‌های شیرین‌سازی آب دریا هستند. منابع آب سطحی مطرح عبارت‌اند از: سدهای جگین، میناب و شمیل ونیان که در حال بهره‌برداری هستند و سد سرنی که در حال ساخت است. منابع آب زیرزمینی تحت پوشش منطقهٔ مطالعه‌شده شامل بخشی از محدودهٔ مطالعاتی گابریک، جگین، جاسک، سیریک، میناب، کریان، بمانی، شمیل تخت و بندرعباس می‌شود که به نسبت مساحتی که منطقهٔ مطالعه‌شده، محدودهٔ مطالعاتی را پوشش می‌دهد، مقدار آب قابل برنامه‌ریزی زیرزمینی برای تأمین نیازهای شرب و صنعت و کشاورزی برآورد شده است، حجم کل آب قابل برنامه‌ریزی در کل منطقهٔ مطالعه‌شده معادل ۱۶۴/۹۱ است. طرح‌های شیرین‌سازی آب دریای موجود شامل آب شیرین‌کن سیریک و بونجی و فاز یک آب‌شیرین‌کن بندرعباس می‌شود. همچنین، آب‌شیرین‌کن کرگان و بمانی و فاز بعدی آب‌شیرین‌کن بندرعباس در حال ساخت هستند. موقعیت کلی منطقهٔ مطالعه‌شده، سدها و آب‌شیرین‌کن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین، نیاز آبی موجود در منطقهٔ مطالعه‌شده شامل نیاز شرب، صنعت و کشاورزی می شود که مقادیر این نیازها در سال مبنا (۱۳۹۴) و سال آتی (۱۴۲۵)، در جدول ۱ ارائه شده است [۱۸ـ ۲۰].

جدول ۱. مقادیر نیاز شرب و صنعت منطقهٔ مطالعه‌شده در سال مبنا و سال آتی (حجم به میلیون مترمکعب)

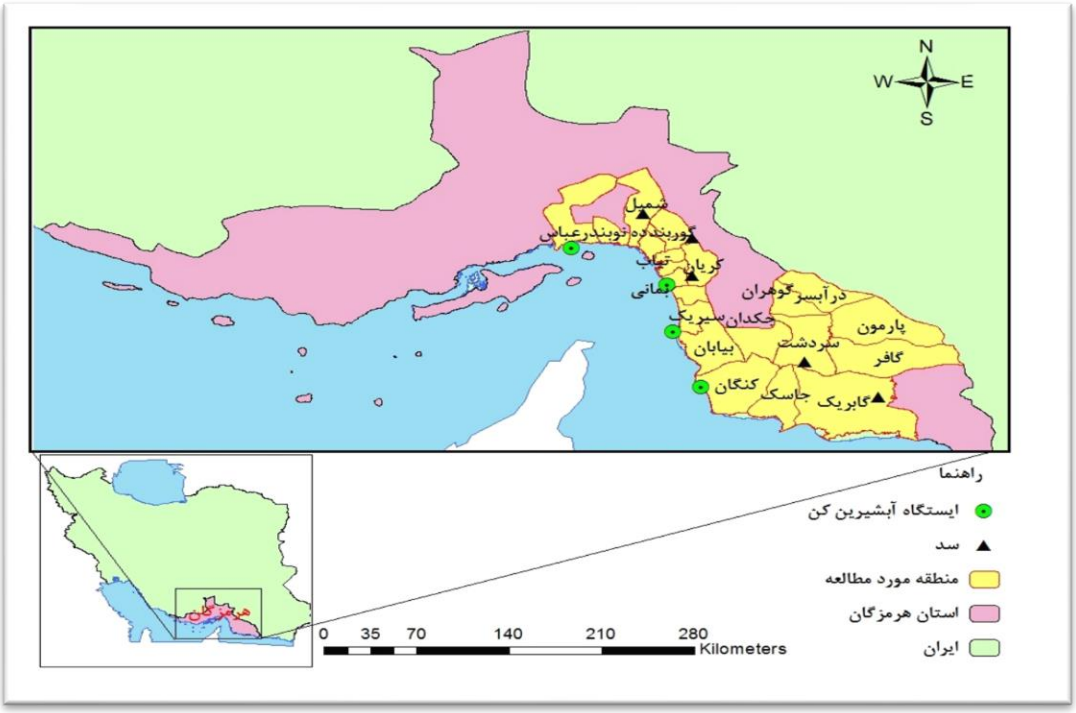
۱۳۹۴		۱۴۲۵	
شرب	صنعت	شرب	صنعت
۸۷/۷۸۳	۱۰/۹۵	۱۶۱/۰۱	۴۳

تدوین سناریوها

علاوه بر منابع متعارف و غیرمتعارف منطقهٔ مطالعه‌شده که پیش‌تر گفته شد، طرح‌های توسعهٔ منابع آبی نیز در منطقهٔ یادشده توسط آب منطقه‌ای هرمزگان به عنوان کارفرمای پروژه مطرح است که از جملهٔ آن می‌توان به طرح انتقال از جگین به میناب برای هدف تأمین نیاز شرب ناحیهٔ ۴ مکران و شهر بندرعباس و نیاز صنعت اشاره کرد. بنابراین، به منظور جبران کمبود آب برای شبکهٔ جگین، طرح احداث سد گابریک مطرح شده است. گزینهٔ مقابل آن، احداث آب‌شیرین‌کن برای تأمین کمبودهای شرب ناحیهٔ

1. Birnbaum Importance

۴ مکران و شهر بندرعباس و نیاز صنایع است. سناریوها براساس گزارش‌های شرکت‌های مهندسین مشاور ری آب [۱۸] و لار [۱۹] که به‌ترتیب مسئول اقدام مطالعات طرح انتقال از جگین به میناب و طرح احداث سد گابریک هستند، تدوین شده‌اند. سناریوهای ارائه‌شده در پژوهش حاضر به سه بخش کلی تقسیم می‌شوند که بخش اول (سناریوی صفر)، سامانه‌های موجود بدون هیچ طرح توسعهٔ منابع آب است. بخش دوم (سناریوی ۱)، شامل تمامی منابع موجود و در حال ساخت به علاوهٔ آب‌شیرین‌کن‌های کمکی به منظور جبران کمبودها برای نیازهای شرب و صنعت وگلخانه‌های ساحلی در سناریوهای لزوم تأمین کشاورزی می‌شود. اما در بخش سوم (سناریوی ۲)، علاوه بر منابع متعارف موجود و در حال ساخت، طرح انتقال از جگین به میناب و طرح احداث سد گابریک و انتقال آب آن به شبکهٔ جگین نیز مطرح است و برای جبران کمبودهای موجود در کنار این منابع، آب‌شیرین‌کن کمکی نیز در نظر گرفته شده است. همچنین، سناریوهای ۱ و ۲ براساس ظرفیت خط انتقال و تراز نرمال سد گابریک و سیاست‌های بهره‌برداری (اولویت تأمین نیازها با آب‌شیرین‌کن‌های موجود یا سدها و لزوم یا عدم لزوم تأمین کشاورزی) به چند زیرسناریو تقسیم می‌شوند که جزئیات آن در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳. موقعیت منطقهٔ مطالعه‌شده و منابع سطحی تأمین آب

مدل ونسیم

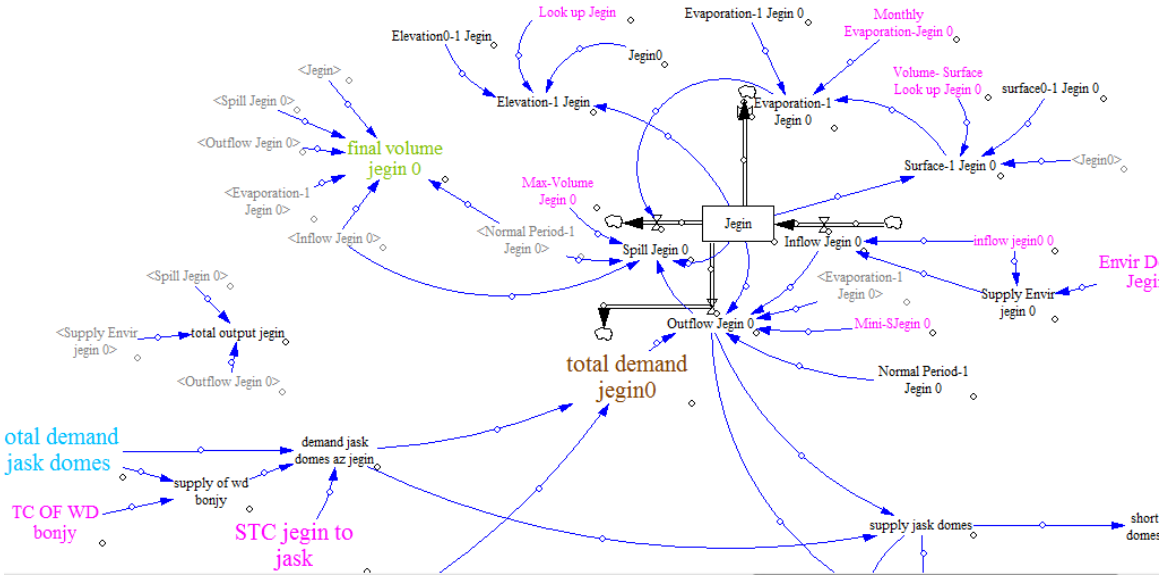
ونسیم یکی از نرم‌افزارهای معتبر برای مدل‌سازی پویایی سیستم است که در سال ۱۹۹۱ توسط مؤسسهٔ Ventana System منتشر شده و توسعه یافته است. از جمله قابلیت‌های این نرم‌افزار شبیه‌سازی، می‌توان به امکان بهینه‌سازی مدل‌ها، وجود الگوریتم‌های تخصیص منابع آب، رابط کاربری منحصربه‌فرد، امکان توسعه دادن آن به صورت دلخواه، پشتیبانی از مدل‌های پیچیده برای مدیریت اشاره کرد [۲۱]. بنابراین، در مطالعهٔ حاضر برای شبیه‌سازی سیستم منابع و مصارف آب در منطقهٔ مطالعه‌شده از نرم‌افزار ونسیم استفاده شده است. در این مرحله با تهیهٔ موقعیت طرح‌ها نسبت به یکدیگر، طرح‌های توسعهٔ منابع آب مدل شده‌اند. اطلاعات واردشده به مدل، ورودی به سد پس از حذف ترند، تبخیر از سد، نیاز زیست‌محیطی، نیاز تغذیهٔ آبخوان، مشخصات فنی سد (تراز حداکثر، تراز حداقل، حجم اولیهٔ سد، مقادیر حجم-سطح-ارتفاع)، مقدار آب قابل برنامه‌ریزی زیرزمینی، ظرفیت خطوط انتقال و ظرفیت آب‌شیرین‌کن‌ها را شامل می‌شود که این مقادیر، در

مقیاس‌های زمانی ماهانه طی دورهٔ ۱۳۴۱-۱۳۹۴ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، نیازهای شرب و صنعت منطقه به عنوان ورودی دیگر به مدل ونسیم وارد شده است. اولویت تأمین نیازها پس از کسر حقابهٔ زیست‌محیطی از ورودی به سد به‌ترتیب شرب، صنعت و کشاورزی در نظرگرفته شد و عملکرد منطقهٔ مطالعه‌شده، نیاز کشاورزی و درصد تأمین زمانی و حجمی نیازهای زیست‌محیطی، شرب، صنعت و کشاورزی و مقادیر برداشت از منابع متعارف (سطحی و زیرزمینی) و غیرمتعارف (آب‌شیرین‌کن) و میزان تبخیر و سرزیر سدها به عنوان خروجی مدل، استخراج شدند.

شکل ۴. تقسیم‌بندی سناریوهای ۱ و ۲ طرح‌های توسعهٔ منابع آب

پس از صحت‌سنجی مدل با استفاده از روش حدی، تمامی سناریوها به ازای نیازهای سال آتی (۱۴۲۵) اجرا شدند، در حالی که نیاز شرب و صنعت برای سال آتی ثابت فرض شدند. در سناریوهای مختلف در صورت عدم تأمین نیازهای شرب و صنعت برای رسیدن به حداقل استانداردهای تأمین به کاهش سطح زیرکشت کشاورزی پرداخته شد. بنابراین، برای جبران سطح زیرکشت کاهش‌یافته در سناریوهایی که بنا بر سیاست بهره‌برداری، لزوم تأمین نیاز کشاورزی اعمال شده است، از آب‌شیرین‌کن کمکی برای تأمین نیاز آب گلخانهٔ ساحلی استفاده شده است. حداقل استانداردهای تأمین برای شرب و صنعت و کشاورزی به‌ترتیب ۱۰۰، ۹۲ و ۸۰ درصد بوده است. در ادامه، چگونگی صحت‌سنجی مدل ونسیم شرح داده شد و رتبه‌بندی سناریوها فقط از دیدگاه منابع آب با استفاده از خروجی ونسیم شامل مقادیر میانگین سالانهٔ نیاز آبی منطقه، میانگین سالانهٔ کل تأمین‌ها، میانگین سالانهٔ برداشت از منابع متعارف

و متوسط سالانهٔ حجم مصرفی از کل آب‌شیرین‌کن‌ها و حجم میانگین سالانهٔ سرزیر سدها (حجم تخلیه به دریا) انجام شد و نتایج در بخش بعدی ارائه شد. در این رتبه‌بندی، شاخص‌ها عبارت بودند از: بیشترین تأمین نیاز کشاورزی، کمترین برداشت از منابع متعارف، بیشترین برداشت از منابع غیرمتعارف (شیرین‌سازی آب دریا) و کمترین میزان تخلیه به دریا. شکل ۵ طرح شماتیک بخشی از مدل منابع و مصارف آب در شرایط موجود را نشان می‌دهد.



شکل ۵. طرح شماتیک بخشی از مدل منابع و مصارف آب منطقه در محیط ونسیم

صحت‌سنجی مدل ونسیم

مدل‌ها برای حل مسائل ساخته می‌شوند و نمایشی از واقعیت یا برداشت ما از واقعیت هستند. قبل از اینکه از مدل استفاده شود، باید نسبت به عملکرد صحیح مدل اطمینان حاصل کرد. برای این منظور، یکی از آزمون‌ها متداول، آزمون شرایط حدی است [۲۲]. توانایی مدل در کارا بودن تحت شرایط حدی، به درجهٔ اطمینان‌پذیری آن در تصمیم‌گیری‌ها و انتخاب گزینهٔ مناسب می‌افزاید. هدف اصلی این آزمون، کنترل مقادیر خروجی از مدل تحت شرایط حدی است. به گونه‌ای که با لحاظ کردن مقادیر خیلی کوچک (نزدیک به صفر) و خیلی بزرگ برای متغیرهای حالت و جریان، روند تغییر در رفتار مدل با روند شرایط نرمال و مورد انتظار مقایسه می‌شود. به طور کلی، آزمون‌های تحت شرایط حدی همراه با سایر آزمون‌های رفتار مدل، ابزار کارآمد و مفیدی برای شناخت ضعف‌های مدل محسوب می‌شود. در مطالعهٔ حاضر، مدل تحت شرایط حدی نیاز شرب بررسی شده است. به بیانی دیگر، در مدل ارائه‌شده از حلقهٔ تعادل‌بخشی استفاده شده که در صورت افزایش نیاز شرب از سدها به منظور رسیدن به حداقل استاندارد تأمین برای نیاز شرب باید نیاز کشاورزی کاهش یابد. از طرفی، به دلیل اینکه اهداف سدها در تأمین نیاز شرب با هم متفاوت بوده است و نیازهای شرب به صورت نقطه‌ای وارد شده‌اند. بنابراین، برای اعمال شرایط حدی نیاز شرب، بخشی از مدل انتخاب شده و عملکرد مدل طی دو حالت حدی یادشده بررسی شد.

رویدادهای پایه

با توجه مطالعات انجام‌شده توسط محققان پیشین [۲۳ و ۲۴] و شاخص‌هایی که توسط ایالت متحده (UN[1]) و ISO[2][۲۵]، توصیه شده‌اند، ۱۴ شاخص توسعهٔ پایدار انتخاب شده است (جدول ۲).

تدوین درخت خطا

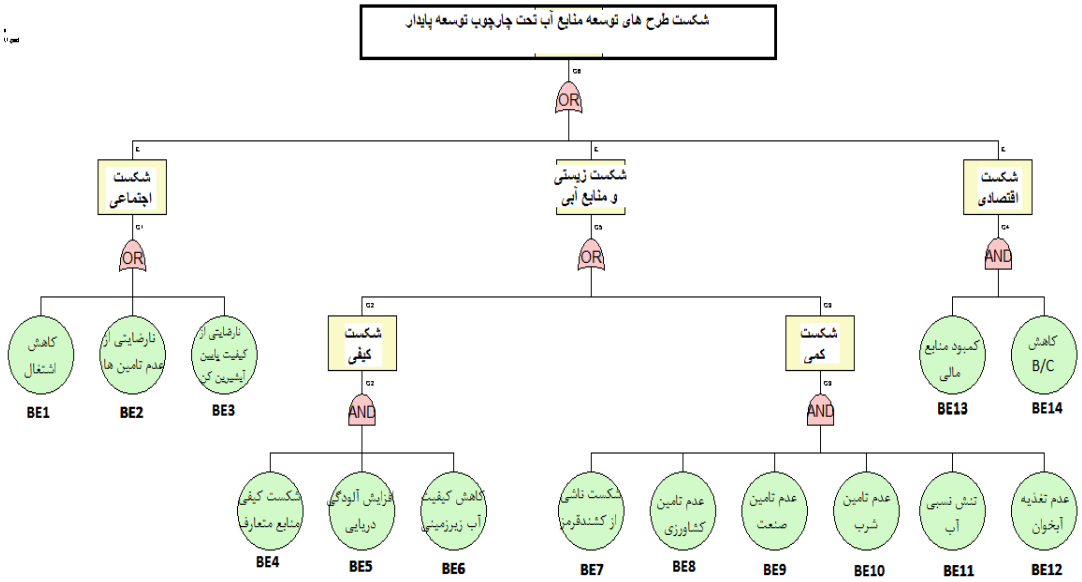
برای ارزیابی ریسک طرح‌های توسعهٔ منابع آب تحت چارچوب توسعهٔ پایدار، ۱۴ شاخص توسعهٔ پایدار (ارائه‌شده توسط محققان مختلف، سازمان‌ها و منابع معتبر) مشخص شدند. ریسک نرسیدن به این شاخص‌ها به عنوان رویدادهای پایه وارد درخت خطا شدند. درخت خطا در

1. United Nation
2. International Organization for Standardization

محیط OPEN FTA تدوین شد، به طوری که رویداد رأس درخت خطای ارائه‌شده عبارت است از: شکست طرح‌های توسعهٔ منابع آب تحت چارچوب توسعهٔ پایدار که در صورت وقوع حداقل یکی از شکست‌های اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و منابع آب به عنوان رویدادهای میانی، شکست در رویداد رأس رخ می‌دهد. بنابراین، دروازهٔ OR برای اتصال رویدادهای میانی در نظر گرفته شد. هریک از این رویدادهای میانی به چند رویداد پایه تقسیم شدند که چگونگی دروازه‌ها و ساختار درخت خطای یادشده در شکل ۶ نمایش داده شده است.

جدول ۲. رویدادهای پایهٔ ارائه‌شده در درخت خطا

نوع شکست	رویدادهای پایه	مرجع	رویداد پایه
اجتماعی	BE1	ISO(www.iso.org/sdgs)	کاهش اشتغال
	BE2	Yilmaz,2010	نارضایتی مردم از عدم تأمین نیازها
	BE3	جلسات مشورتی با وزارت نیرو	نارضایتی مردم ناشی از پایین بودن سطح کیفیت آب‌شیرین‌کن نسبت به منابع متعارف
محیط زیست و منابع آب	BE4	جلسات مشورتی با وزارت نیرو	شکست کیفی منابع متعارف بر اثر افزایش تبخیر و رسوب
	BE5	ISO(www.iso.org/sdgs)	افزایش آلودگی دریایی
	BE6	Kefayati et al.(2018)	کاهش کیفیت آب زیرزمینی
	BE7	نظام‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۹	شکست در آب‌شیرین‌کن‌ها ناشی از پدیدهٔ کشند قرمز
	BE8	Yilmaz,2010	عدم تأمین نیاز آتی کشاورزی نسبت به نیاز کشاورزی موجود
	BE9	مریم حافظ‌پرست و همکاران، ۱۳۹۳	عدم تأمین صنعت
	BE10	مریم حافظ‌پرست همکاران، ۱۳۹۳	عدم تأمین نیاز شرب
	BE11	Kefayati et al.(2018)	تنش نسبی آب
	BE12	مریم حافظ‌پرست و همکاران، ۱۳۹۳	عدم تغذیهٔ آبخوان
اقتصادی	BE13	Wu,2008	کمبود منابع مالی
	BE14	Yilmaz,2010	کاهش درآمدها به هزینه‌ها (B/C)



شکل ۶. ساختار درخت خطای ریسک طرح‌های توسعهٔ منابع آب در محیط OPEN FTA

محاسبهٔ احتمال شکست رویدادهای پایه

رویداد پایهٔ ۱ (کاهش اشتغال): در کشاورزی متعارف به ازای هر لیتر برثانیه ۲ تا ۳ نفر شاغل هستند، اما در کشاورزی گلخانه‌ای به ازای هر لیتر بر ثانیه ۲۰ تا ۳۰ نفر شاغل هستند (جلسات مشورتی با وزارت نیرو). بنابراین، وقتی نیاز آبی سطح زیر کشت به ازای کشاورزی مدرن و سنتی در هر سناریو براساس خروجی از ونسیم مشخص شود، می‌توان با در نظر گرفتن مقادیر یادشده، تعداد افراد شاغل در کشاورزی برای هر سناریو را برآورد کرد و از رابطهٔ ۴ به شاخص کاهش اشتغال دست یافت.

رویداد پایهٔ ۲ (نارضایتی مردم از عدم تأمین نیازها): این شاخص از نسبت اختلاف بین مقدار نیازها و مقدار تأمین‌شدهٔ آنها بر مقدار نیازها به دست می‌آید (رابطهٔ ۵). این مقادیر از خروجی مدل ونسیم استخراج می‌شود.

رویداد پایهٔ ۳ (نارضایتی مردم ناشی از پایین بودن سطح کیفیت آب‌شیرین‌کن نسبت به منابع متعارف): در منطقهٔ مطالعه‌شده کیفیت منابع متعارف بهتر از کیفیت آب‌شیرین‌کن است، بنابراین هرچقدر تأمین نیازها از آب‌شیرین‌کن کمتر باشد، نارضایتی مردم نیز بیشتر خواهد شد. بنابراین، این شاخص از نسبت، مقدار حجم مصرفی آب‌شیرین‌کن به کل مقدار تأمین‌شدهٔ نیازها برآورد می‌شود (رابطهٔ ۶). می‌توان این مقادیر را نیز از خروجی مدل ونسیم به دست آورد.

رویداد پایهٔ ۴ (شکست کیفی منابع متعارف بر اثر افزایش تبخیر و رسوب): حجم تبخیر و رسوب ورودی به سد جگین و گابریک در منطقهٔ مطالعه‌شده، نسبتاً زیاد است. بنابراین، چون در سناریوهای بررسی‌شده وجود داشتن و نداشتن سد گابریک بررسی می‌شود، شاخص یادشده اهمیت زیادی پیدا می‌کند. بنابراین، پس از برآورد مقادیر متوسط تبخیر و رسوب سالانه و حجم کل مخازن موجود از مدل ونسیم، این شاخص به صورت رابطهٔ ۷ برآورد می‌شود:

رویداد پایهٔ ۵ (افزایش آلودگی دریایی): هرچقدر حجم مصرفی آب‌شیرین‌کن (خروجی مدل ونسیم) افزایش یابد، پساب تولیدی از آب‌شیرین‌کن نیز زیاد می‌شود و چون در منطقهٔ مطالعه‌شده این پساب‌ها به دریا می‌ریزد، این شاخص اهمیت زیادی پیدا می‌کند. با توجه به مطالعات انجام‌شده، پساب تولیدی آب‌شیرین‌کن‌ها ۲۵ درصد حجم ورودی به آب‌شیرین‌کن‌هاست. بنابراین، پس از برآورد پساب تولیدی هر سناریو از طریق فرمول ۸، این شاخص برآورد می‌شود:

رویداد پایهٔ ۶ (کاهش کیفیت آب زیرزمینی): هرچقدر برداشت از منابع آب زیرزمینی کمتر شود، کیفیت آب زیرزمینی بهبود می‌یابد. بنابراین، در سناریوهای مختلف بررسی‌شده حجم برداشت از منابع زیرزمینی (خروجی مدل ونسیم) به دست می‌آید و از نسبت برداشت از زیرزمینی به کل تأمین‌ها (خروجی مدل ونسیم) شاخص کاهش کیفیت آب زیرزمینی برآورد می‌شود:

$$\text{احتمال شکست رویداد پایهٔ ۱} = \frac{\text{افراد شاغل در سطح زیرکشت آتی - افراد شاغل در سطح زیرکشت فعلی}}{\text{افراد شاغل در سطح زیرکشت فعلی}} \quad (۴)$$

$$\text{احتمال شکست رویداد پایهٔ ۲} = \frac{\text{کل تأمین‌ها - کل نیاز آبی}}{\text{کل نیاز آبی}} \quad (۵)$$

$$\text{احتمال شکست رویداد پایهٔ ۳} = \frac{\text{حجم تأمین‌شده از آب‌شیرین‌کن}}{\text{مقدار کل تأمین‌ها}} \quad (۶)$$

$$\text{احتمال شکست رویداد پایهٔ ۴} = \frac{\text{متوسط تبخیر سالانه از مخازن + متوسط رسوب}}{\text{حجم کل مخازن}} \quad (۷)$$

$$\text{احتمال شکست رویداد پایهٔ ۵} = \frac{\text{حجم پساب تولیدی در هر سناریو}}{\text{مقدار پساب تولیدی ماکزیمم}} \quad (۸)$$

$$\text{احتمال شکست رویداد پایهٔ ۶} = \frac{\text{مقدار تأمین از آب زیرزمینی}}{\text{مقدار کل تأمین‌ها}} \quad (۹)$$

رویداد پایهٔ ۷ (شکست در آب‌شیرین‌کن‌ها ناشی از پدیدهٔ کشند قرمز): پدیدهٔ کشند قرمز ناشی از فعالیت میکروارگانیسم‌های موجود در فاضلاب‌ها و آلودگی‌های دریایی است و سبب از کار افتادن بخش‌های مختلف آب‌شیرین‌کن‌ها و مسدود شدن فیلترها می‌شود و حجم تولیدی آب‌شیرین‌کن‌ها را کاهش می‌دهد. این کاهش مقدار آب تولیدی بنا بر مطالعات انجام‌شده حدود ۴۰ درصد آب مورد نیاز است. همچنین، این پدیده در منطقهٔ

مطالعه‌شده حدود ۶ ماه در سال رخ می‌دهد، یعنی احتمال رخداد آن ۵۰ درصد است [۲۶]. با توجه به اطلاعات یادشده مقدار حجم کاهش‌یافته توسط این پدیده در سال برای هر سناریو و شاخص شکست ناشی از پدیدهٔ کشند قرمز از روابط ۱۰ـ ۱۶ به دست می‌آید:

(۱۰) حجم آب مورد نیاز از آب‌شیرین‌کن = ۰/۴* ۰/۵* حجم کاهش‌یافتهٔ آب تولیدی در آب‌شیرین‌کن

(۱۱) احتمال شکست رویداد پایهٔ ۷ = حجم کاهش‌یافتهٔ آب تولیدی در آب‌شیرین‌کن / حجم کاهش‌یافتهٔ آب تولیدی ماکزیمم

رویداد پایهٔ ۸ (عدم تأمین نیاز کشاورزی موجود):

(۱۲) احتمال شکست رویداد پایهٔ ۸ = مقدار تأمین کشاورزی - نیاز کشاورزی موجود / نیاز کشاورزی موجود

رویداد پایهٔ ۹ (عدم تأمین نیاز صنعت):

(۱۳) احتمال شکست رویداد پایهٔ ۹ = مقدار تأمین صنعت - مقدار نیاز صنعت / مقدار نیاز صنعت

رویداد پایهٔ ۱۰ (عدم تأمین نیاز شرب):

(۱۴) احتمال شکست رویداد پایهٔ ۱۰ = مقدار تأمین شرب - مقدار نیاز شرب / مقدار نیاز شرب

رویداد پایهٔ ۱۱ (تنش نسبی آب):

(۱۵) احتمال شکست رویداد پایهٔ ۱۱ = برداشت از سدها + برداشت از آب‌های زیرزمینی / متوسط سالانهٔ ورودی به سدها + آب قابل برنامه‌ریزی زیرزمینی

رویداد پایهٔ ۱۲: عدم تأمین نیاز تغذیهٔ مصنوعی

(۱۶) احتمال شکست رویداد پایهٔ ۱۲ = مقدار تأمین تغذیه - مقدار نیاز تغذیه / مقدار نیاز تغذیه

رویداد پایهٔ ۱۳ (کمبود منابع مالی): مقدار کل بودجهٔ تخصیصی به طرح‌های عمرانی کشور در سال ۱۳۹۶ برابر ۶۲ هزار میلیارد ریال بوده است که از این مقدار فقط ۴۰ درصد معادل ۲۴۸۰۰ میلیارد ریال پرداخت شده است. کمبود منابع مالی به‌دست‌آمده سبب متوقف شدن بیشتر طرح‌های عمرانی شده است. بنابراین، در مطالعهٔ حاضر برای محاسبهٔ شاخص کمبود مالی ابتدا ارزش فعلی هزینهٔ طرح‌ها به ازای سال مبنا (۱۳۹۴) با میزان کاهش ۱۲ درصد محاسبه شده و در ضریب ۰/۶ (ضریب عدم تأمین مالی) ضرب می‌شود که مقدار به‌دست‌آمده کمبود منابع مالی به ازای هر سناریو است. با توجه به روابط ۱۷ و ۱۸ مقدار شاخص کمبود منابع مالی برای هر سناریو محاسبه می‌شود:

(۱۷) کمبود منابع مالی هر سناریو = ۰/۶* ارزش فعلی هزینهٔ هر سناریو

(۱۸) احتمال شکست رویداد پایهٔ ۱۳ = کمبود منابع مالی در هر سناریو / مقدار کمبود منابع مالی ماکزیمم

رویداد پایهٔ ۱۴ (کاهش B/C): ارزش فعلی هزینه‌ها و درآمدهای حاصل از هر سناریو با میزان کاهش ۱۲ درصد برای سال مبنا (۱۳۹۴) محاسبه شده است. شایان یادآوری است که برای محاسبهٔ هزینه‌ها، هزینه‌های ریخته‌شده در نظر گرفته نشده است. سپس، شاخص B/C برای هر سناریو محاسبه شده و شاخص کاهش B/C با استفاده از رابطهٔ ۱۹ برآورد می‌شود:

(۱۹) احتمال شکست رویداد پایهٔ ۱۴ = شاخص درآمد به هزینه در هر سناریو / ماکزیمم مقدار شاخص درآمد به هزینه

نتایج و بحث

نتایج مدل‌سازی منابع و مصارف ونسیم

شبیه‌سازی منابع و مصارف آب منطقهٔ مطالعه‌شده با توجه به مطالب ارائه‌شده در بخش ۲ـ ۴ انجام گرفت. در ادامه، نتایج صحت‌سنجی و رتبه‌بندی سناریوها به طور کامل شرح داده شد.

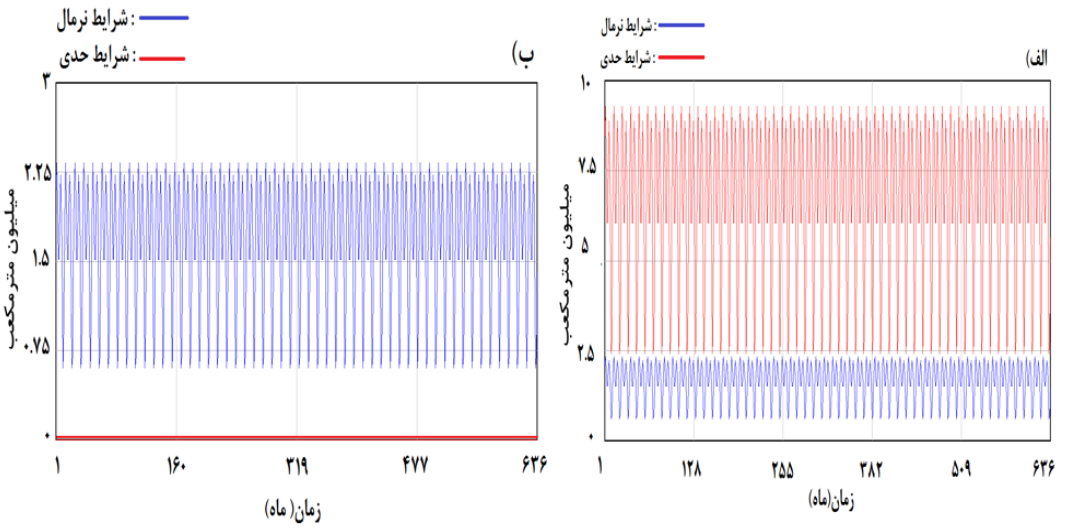
نتایج صحت‌سنجی

با توجه به مطالبی که پیش‌تر ارائه شد، برای صحت‌سنجی مدل از بخش شبیه‌سازی سد جگین استفاده شد و چون این سد هدف تأمین نیاز شرب جاسک و نیاز کشاورزی شبکهٔ جگین را به عهده دارد، دو حالت شرایط حدی نیاز شرب جاسک اعمال شده و عملکرد مدل در شکل ۷ نشان داده شده است. نمودار الف) نیاز کشاورزی شبکهٔ جگین در صورت کاهش نیاز شرب به کمینهٔ مقدار ممکن (صفر) را نشان می‌دهد. نمودار ب) نیز نیاز کشاورزی شبکهٔ جگین در صورت افزایش نیاز شرب به بیشینهٔ مقدار ممکن را نشان می‌دهد که این مقدار معادل کلیهٔ منابع موجود برای تأمین شرب جاسک در نظر گرفته شد (مجموع ظرفیت آب‌شیرین‌کن و حجم آب قابل استفادهٔ زیرزمینی و کل ظرفیت خط انتقال جگین به جاسک برابر ۳۳/۷۲ میلیون مترمکعب در سال است که همین مقدار به عنوان ماکزیمم

مقدار نیاز شرب جاسک تعریف شده است). نتایج باید به گونه‌ای باشد که با افزایش نیاز شرب، نیاز کشاورزی کاهش یافته و با کاهش نیاز شرب، مقدار نیاز کشاورزی افزایش یابد تا بتوان نتیجه گرفت عملکرد حلقهٔ تعادل‌بخشی به‌درستی انجام می‌شود. نمودارهای الف و ب نشان می‌دهند که مدل به‌خوبی این انتظار را برآورده کرده است. به بیانی دیگر، با توجه به اختلاف بین شرایط حدی و نرمال در شکل یادشده، هنگامی که نیاز شرب جاسک به بیشترین مقدار خود می‌رسد، نیاز کشاورزی جگین صفر شود تا نیاز شرب به حداقل استاندارد تأمین میل کند. و زمانی که نیاز شرب به کمترین مقدار خود یعنی صفر می‌رسد، نیاز شبکهٔ جگین افزایش یابد و بیشتر از مقدار نیاز کشاورزی در حالت نرمال شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که این مدل آماده برای اجرای سناریوها براساس نیازهای سال آتی است.

نتایج رتبه‌بندی سناریوها براساس دیدگاه منابع آب

مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده از ونسیم و رتبه‌بندی سناریوها براساس دیدگاه منابع آب نشان داد سناریوی هجدهم و چهاردهم به‌ترتیب رتبهٔ اول و دوم را به خود اختصاص دادند، چون این دو سناریو رتبه‌های پایین‌تر (بهتر) را در هر ۴ شاخص معرفی‌شده در بخش قبلی کسب کردند. شاخص‌ها عبارت‌اند از: بیشترین تأمین از منابع غیرمتعارف، کمترین تأمین از منابع متعارف، بیشترین تأمین کشاورزی و کمترین تخلیه به دریا که سناریوی هجدهم به‌ترتیب رتبهٔ ۱، ۲، ۴ و ۱۷ را در این شاخص‌ها به خود اختصاص داد. در حالی که در سناریوی چهاردهم این رتبه‌ها به ۲، ۴، ۳ و ۲۱ تغییر یافت. این دو سناریوی برتر از دیدگاه منابع آب، به دلیل تغییر ظرفیت خط انتقال جگین به میناب از ۱۲۰۰ لیتر بر ثانیه به ۹۰۰ لیتر بر ثانیه با هم اختلاف دارند و چون در سناریوی چهاردهم این ظرفیت انتقال بیشتر از سناریوی هجدهم است، در شاخص‌های کمترین تأمین از منابع متعارف و بیشترین تأمین از منابع نامتعارف رتبهٔ بیشتری نسبت به سناریوی هجدهم دارد. همچنین، سناریوی وضع موجود به دلیل استفادهٔ بیشتر از منابع متعارف با حجم معادل ۲۴۵/۷ میلیون مترمکعب در سال رتبهٔ ۱۵ را در شاخص کمترین برداشت از منابع متعارف داشته است. و چون در این سناریو از طرح‌های توسعهٔ منابع آب برای تأمین کشاورزی استفاده نشده است، رتبهٔ آخر را در شاخص بیشترین تأمین کشاورزی به خود اختصاص داده است. علاوه بر این، به دلیل استفاده نکردن از طرح‌های توسعهٔ منابع نامتعارف، در شاخص بیشترین برداشت از منابع نامتعارف رتبهٔ آخر را کسب کرده است. نتایج در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۷. روند تغییرات حجم نیاز کشاورزی شبکهٔ جگین در شرایط حدی نیاز شرب جاسک
الف) نیاز کشاورزی جگین (کمینهٔ مقدار شرب جاسک)، ب) نیاز کشاورزی جگین (بیشینهٔ مقدار شرب جاسک)

جدول ۳. نتایج خروجی از ونسیم و رتبه‌بندی سناریوها براساس دیدگاه منابع آبی

سناریو	حجم کل نیازها	حجم کل تأمین‌ها	تأمین کشاورزی	رتبه‌بندی براساس بیشترین تأمین کشاورزی	مجموع برداشت از منابع متعارف	رتبه براساس کمترین برداشت از منابع متعارف	حجم مصرفی آب شیرین کن	رتبه براساس بیشترین برداشت منابع نامتعارف	حجم تخلیه به دریا	رتبه براساس کمترین تخلیه به دریا
S0	۳۲۷/۷	۲۴۴/۶	۱۰۸/۵	۲۱	۲۴۵/۷	۱۵	۹/۸	۲۱	۹۰/۲	۳
S1	۳۸۵/۲	۳۵۴/۶	۱۵۴/۴	۱۵	۲۳۴/۷	۷	۱۳۲/۱	۱۵	۹۸	۱۲
S2	۴۲۰/۴	۳۸۲/۸	۱۸۲/۶	۷	۲۳۴/۷	۸	۱۶۰/۲	۷	۹۸	۱۳
S3	۳۸۲/۵	۳۵۲/۵	۱۵۲/۳	۱۶	۲۴۷/۱	۱۶	۱۱۷/۱	۲۰	۸۹/۱	۱
S4	۴۱۷/۷	۳۸۰/۷	۱۸۰/۴	۸	۲۴۷/۱	۱۷	۱۴۵/۳	۱۰	۸۹/۱	۲
S5	۴۰۱/۴	۳۶۴/۰	۱۶۳/۸	۱۰	۲۳۵/۷	۹	۱۴۰/۵	۱۳	۱۱۰/۹	۱۸
S6	۴۴۱/۶	۳۹۶/۲	۱۹۶/۰	۱	۲۳۵/۷	۱۰	۱۷۲/۶	۳	۱۱۰/۹	۱۹
S7	۳۹۷/۴	۳۶۰/۹	۱۶۰/۶	۱۲	۲۵۱/۱	۱۸	۱۲۱/۵	۱۶	۹۵/۱	۴
S8	۴۳۷/۶	۳۹۳/۰	۱۹۲/۸	۵	۲۵۱/۱	۱۹	۱۵۳/۶	۸	۹۵/۱	۵
S9	۳۹۹/۶	۳۶۲/۶	۱۶۲/۴	۱۱	۲۳۳/۵	۶	۱۴۰/۹	۱۱	۱۰۴/۷	۱۵
S10	۴۴۱/۶	۳۹۶/۲	۱۹۶/۰	۲	۲۳۳/۵	۵	۱۷۲/۶	۴	۱۰۴/۷	۱۴
S11	۳۹۷/۴	۳۶۰/۹	۱۶۰/۶	۱۳	۲۵۱/۱	۲۰	۱۲۱/۵	۱۷	۹۵/۱	۶
S12	۴۳۷/۶	۳۶۰/۹	۱۶۰/۶	۱۴	۲۵۱/۱	۲۱	۱۵۳/۶	۹	۹۵/۱	۷
S13	۳۸۶/۴	۳۵۱/۹	۱۵۱/۷	۱۷	۲۲۳/۵	۳	۱۴۰/۵	۱۴	۱۴۲/۸	۲۰
S14	۴۴۱/۶	۳۹۶/۰	۱۹۵/۸	۳	۲۲۳/۵	۴	۱۸۴/۶	۲	۱۴۲/۸	۲۱
S15	۳۸۲/۴	۳۴۸/۷	۱۴۸/۵	۲۰	۲۳۹/۰	۱۱	۱۲۱/۵	۱۸	۹۵/۱	۸
S16	۴۳۷/۶	۳۹۲/۹	۱۹۲/۶	۶	۲۳۹/۰	۱۲	۱۶۵/۶	۵	۹۵/۱	۹
S17	۳۸۴/۶	۳۵۰/۵	۱۵۰/۳	۱۸	۲۲۱/۴	۱	۱۴۰/۹	۱۲	۱۰۴/۷	۱۶
S18	۴۳۹/۸	۳۹۴/۶	۱۹۴/۴	۴	۲۲۱/۴	۲	۱۸۵/۱	۱	۱۰۴/۷	۱۷
S19	۳۸۲/۴	۳۴۸/۷	۱۴۸/۵	۱۹	۲۳۹/۰	۱۳	۱۲۱/۵	۱۹	۹۵/۱	۱۰
S20	۴۳۷/۶	۳۶۴/۷	۱۶۴/۵	۹	۲۳۹/۰	۱۴	۱۶۵/۶	۶	۹۵/۱	۱۱

نتایج درخت خطا

پس از برآورد رویدادهای پایه به ازای سناریوهای مختلف، براساس روابط ۴ تا ۱۶ که در بخش قبلی ارائه شد، مقادیر به‌دست‌آمده به عنوان ورودی درخت خطای یادشده به کار رفت. در ادامه، احتمال شکست رویداد رأس متناظر با هر سناریو در محیط اکسل محاسبه شد. نتایج برآورد رویدادهای پایه و ریسک رویداد رأس در جدول ۴ قابل مشاهده است. درخور یادآوری است، به دلیل اینکه در مدل ونسیم همسان‌سازی در تأمین نیاز شرب و صنعت در زیرسناریوهای S_1 تا S_{20} صورت گرفت، به بیانی نیازها در تمامی سناریوها به حداقل درصد تأمین استاندارد (شرب ۱۰۰ درصد و صنعت ۹۲ درصد) رسیدند. بنابراین، احتمال شکست شاخص‌های ۹ و ۱۰ که به‌ترتیب عدم تأمین نیاز صنعت و شرب هستند، برای همهٔ سناریوها به‌جز سناریوی S_0 که طرحی برای جبران کمبودها وجود ندارد، برابر ۰/۰۸ و صفر است. نتایج شاخص‌ها نشان می‌دهد شکست ناشی از شاخص‌های اقتصادی در تمامی زیرسناریوهای سناریوی ۲ بیشتر از زیرسناریوهای سناریوی ۱ بوده است که علت آن کم بودن درآمد حاصل از طرح انتقال از جگین به میناب با هدف شرب در سناریوی ۲ است. این در حالی است که هزینهٔ بسیار زیادی برای اجرای طرح یادشده برآورد شده است. همچنین، احتمال شکست شاخص‌های اقتصادی در سناریوی S_0 (شرایط موجود) به دلیل نبود طرح توسعهٔ منابع آب برابر صفر است. شاخص ۱ (کاهش

اشتغال) که براساس کاهش سطح زیرکشت با استفاده از فرمول ۴ محاسبه می‌شود، در زیرسناریوهایی که لزوم تأمین کشاورزی اعمال می‌شود، مقدار احتمال شکست برابر صفر را به خود اختصاص می‌دهد. در حالی که در زیرسناریوهایی که عدم لزوم تأمین کشاورزی اعمال می‌شود، نتایج نشان می‌دهد سناریوی ۲ احتمال شکست بیشتری نسبت به سناریوی ۱ و صفر دارد و دلیل آن، افزایش تأمین نیاز شرب از مخزن سد جگین است که این امر کاهش حقابهٔ کشاورزی شبکهٔ جگین و در نتیجه، کاهش اشتغال را در پی دارد. سپس، سناریوها براساس احتمال شکست رویداد رأس به‌دست‌آمده از درخت خطا رتبه‌بندی شده‌اند و نتایج در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، سناریوی ۱- ۴(S_4) با کسب رتبهٔ نخست با احتمال شکست رویداد رأس معادل ۳۸ درصد به عنوان بهترین سناریو و سناریوی ۲-۳-۱ (S_{13}) با کسب رتبهٔ ۲۱ و با احتمال شکست رویداد رأس ۹۰ درصد به عنوان بدترین سناریو انتخاب شدند. سناریوی شرایط موجود (S_0) با احتمال شکست معادل ۵۰ درصد رتبهٔ سوم را به خود اختصاص داده است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد تمامی زیرسناریوهای سناریوی ۱ احتمال شکست رویداد رأس کمتری نسبت به زیرسناریوهای سناریوی ۲ دارند و دلیل آن، اختلاف زیاد احتمال شکست رویدادهای پایهٔ شاخص اقتصادی و اجتماعی است که احتمال شکست این شاخص‌ها در سناریوی ۲ بیشتر از سناریوی ۱ است. در بین زیرسناریوهای سناریوی ۱، S_4 به دلیل اولویت تأمین نیازها از سدها که سبب کاهش هزینه در واحدهای آب‌شیرین‌کن موجود و در نهایت، سبب کاهش احتمال شکست شاخص‌های اقتصادی می‌شود و همچنین لزوم تأمین کشاورزی که سبب کاهش شکست ناشی از کاهش اشتغال می‌شود، به عنوان سناریوی برتر انتخاب شده است. این در حالی است که سناریوی شرایط موجود (S_0) به دلیل احتمال شکست بیشتر نسبت به S_4 در شاخص‌های کمی منابع آب و احتمال شکست شاخص‌های اقتصادی کمتر نسبت به زیرسناریوهای دیگر رتبهٔ سوم را به خود اختصاص داده است. در ادامه، به دلیل ریسک زیاد سناریوی برتر و بدترین سناریو، یافتن رویدادهای پایهٔ مؤثر در وقوع رویداد رأس ضرورت می‌یابد. بنابراین، در بخش بعدی به رتبه‌بندی رویدادهای پایه براساس سهم آنها در وقوع رویداد رأس پرداخته شده است.

اهمیت رویدادهای پایه

رتبه‌بندی رویدادهای پایه براساس میزان تأثیر آنها در وقوع رویداد رأس است. از طرفی، به دلیل بررسی سناریوهای مختلف، در این بخش اهمیت رویدادهای پایه در بهترین و بدترین سناریو و سناریوی شرایط موجود بررسی شده است. به این منظور، برای رتبه‌بندی از شاخص بیرنبام (BI) مطابق رابطهٔ ۳ استفاده شد. بنا بر نتایج ارائه‌شده در جدول ۶، مؤثرترین رویدادهای پایه در بهترین سناریو (S4) شاخص‌های اجتماعی هستند که به‌ترتیب شاخص نارضایتی مردم ناشی از پایین بودن سطح کیفیت آب‌شیرین‌کن نسبت به منابع متعارف، نارضایتی مردم از عدم تأمین نیازها و شکست ناشی از کاهش اشتغال رتبه‌های ۱ تا ۳ را به خود اختصاص داده‌اند. پس از آنها، شاخص شکست کیفی منابع متعارف بر اثر افزایش تبخیر و رسوب، رتبهٔ ۴ و کاهش B/C رتبهٔ ۵ را کسب کرد. اما در بدترین سناریو (S13)، ابتدا شکست شاخص‌های اقتصادی و سپس، اجتماعی بیشترین تأثیر را در وقوع رویداد رأس داشته‌اند. به بیانی، شاخص کاهش B/C، کمبود منابع مالی، کاهش اشتغال، نارضایتی مردم ناشی از پایین بودن سطح کیفیت آب‌شیرین‌کن نسبت به منابع متعارف و نارضایتی مردم از عدم تأمین نیازها به‌ترتیب رتبه‌های ۱ تا ۵ را به خود اختصاص داده‌اند. اما در سناریوی شرایط موجود (S0)، ابتدا شکست شاخص‌های اجتماعی، سپس شکست کیفی و کمی زیست‌محیطی و منابع آب و درنهایت، شکست شاخص‌های اقتصادی به‌ترتیب بیشترین تأثیر را در وقوع رویداد رأس داشته‌اند. نتایج رتبه‌بندی رویدادهای پایهٔ درخت خطا این امکان را به مدیران ذی‌نفع می‌دهد که برای کاهش ریسک طرح‌های توسعهٔ منابع آب به منظور اهداف توسعهٔ پایدار به اولویت‌بندی راهکارهای مدیریت ریسک بپردازند.

جدول ۴. نتایج احتمال شکست رویدادهای پایه و احتمال شکست رویداد رأس

سناریو	احتمال شکست رویدادهای پایه به ازای سناریوهای مختلف														ریسک
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	
S0	۰/۲۲	۰/۳۲	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۰۵	۰/۵۴	۰/۰۵	۰/۳۲	۰/۷۷	۰/۲۱	۰/۵۴	۰/۲۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۵۰
S1	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۸۶	۰/۳۷	۰/۸۶	۰/۳۲	۰/۰۸	۰۰	۰/۴۹	۰/۳۱	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۵۷
S2	۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۳۴	۰/۱۴	۱/۰۰	۰/۳۴	۱/۰۰	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۹	۰/۳۱	۰/۲۶	۰/۱۰	۰/۴۴
S3	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۲۴	۰/۱۲	۰/۶۹	۰/۳۷	۰/۶۹	۰/۳۲	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۵۲	۰/۳۲	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۵۳
S4	۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۳۰	۰/۱۲	۰/۸۳	۰/۳۴	۰/۸۳	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۵۲	۰/۳۲	۰/۲۳	۰/۰۰	۰/۳۸
S5	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۲۶	۰/۱۵	۰/۶۹	۰/۳۴	۰/۶۹	۰/۳۷	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۳	۰/۳۰	۰/۹۸	۰/۷۸	۰/۹۰
S6	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۳۳	۰/۱۵	۰/۸۴	۰/۳۰	۰/۸۴	۰/۱۶	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۳	۰/۳۰	۱/۰۰	۰/۷۳	۰/۸۴
S7	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۱۱	۰/۶۹	۰/۳۵	۰/۶۹	۰/۳۷	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۶	۰/۳۱	۰/۹۸	۰/۷۹	۰/۸۹
S8	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۸۵	۰/۳۱	۰/۸۵	۰/۱۶	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۶	۰/۳۱	۱/۰۰	۰/۷۳	۰/۸۳
S9	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۲۶	۰/۱۲	۰/۶۹	۰/۳۳	۰/۶۹	۰/۳۷	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۳	۰/۳۱	۰/۸۱	۰/۷۴	۰/۸۳
S10	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۳۳	۰/۱۲	۰/۸۴	۰/۳۰	۰/۸۴	۰/۱۶	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۳	۰/۳۰	۰/۸۳	۰/۶۷	۰/۷۴
S11	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۱۱	۰/۶۹	۰/۳۵	۰/۶۹	۰/۳۷	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۶	۰/۳۱	۰/۸۱	۰/۷۴	۰/۸۱
S12	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۸۵	۰/۳۱	۰/۸۵	۰/۱۶	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۶	۰/۳۱	۰/۸۳	۰/۶۸	۰/۷۲
S13	۰/۳۵	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۱۰	۰/۶۹	۰/۳۵	۰/۶۹	۰/۴۴	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۱	۰/۳۰	۰/۹۵	۰/۷۷	۰/۹۰
S14	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۳۷	۰/۱۰	۰/۹۰	۰/۳۰	۰/۹۰	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۱	۰/۳۰	۰/۹۸	۰/۷۰	۰/۸۳
S15	۰/۳۵	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۱۱	۰/۶۹	۰/۳۶	۰/۶۹	۰/۴۴	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۴	۰/۳۱	۰/۹۵	۰/۷۸	۰/۹۰
S16	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۳۲	۰/۱۱	۰/۹۰	۰/۳۱	۰/۹۰	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۴	۰/۳۱	۰/۹۸	۰/۷۰	۰/۸۱
S17	۰/۳۵	۰/۲۱	۰/۲۸	۰/۱۲	۰/۶۹	۰/۳۵	۰/۶۹	۰/۴۴	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۰	۰/۳۱	۰/۷۹	۰/۷۳	۰/۸۵
S18	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۳۷	۰/۱۲	۰/۹۰	۰/۳۰	۰/۹۰	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۰	۰/۳۱	۰/۸۲	۰/۶۴	۰/۷۴
S19	۰/۳۵	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۱۱	۰/۶۹	۰/۳۶	۰/۶۹	۰/۴۴	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۴	۰/۳۱	۰/۷۸	۰/۷۳	۰/۸۳
S20	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۳۲	۰/۱۱	۰/۹۰	۰/۳۱	۰/۹۰	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۴	۰/۳۱	۰/۸۱	۰/۶۴	۰/۷۱

جدول ۵. رتبه‌بندی سناریوها براساس ریسک به‌دست‌آمده از درخت خطا

سناریو	سناریوی صفر	سناریوی ۱-۱	سناریوی ۱-۲	سناریوی ۱-۳	سناریوی ۱-۴	سناریوی ۲-۱-۱	سناریوی ۲-۱-۲
رتبه	۳	۵	۲	۴	۱	۱۹	۱۶
سناریو	سناریوی ۲-۱-۳	سناریوی ۲-۱-۴	سناریوی ۲-۲-۱	سناریوی ۲-۲-۲	سناریوی ۲-۲-۳	سناریوی ۲-۲-۴	سناریوی ۲-۳-۱
رتبه	۱۸	۱۴	۱۲	۹	۱۰	۷	۲۱
سناریو	سناریوی ۲-۳-۲	سناریوی ۲-۳-۳	سناریوی ۲-۳-۴	سناریوی ۲-۴-۱	سناریوی ۲-۴-۲	سناریوی ۲-۴-۳	سناریوی ۲-۴-۴
رتبه	۱۳	۲۰	۱۱	۱۷	۸	۱۵	۶

جدول ۶. رتبه‌بندی رویدادهای پایه براساس شاخص BI

	رویداد	شکست اجتماعی		شکست زیست‌محیطی و منابع آبی									شکست اقتصادی	
				شکست کیفی				شکست کمی						
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
S4	BI	۰/۶۲	۰/۶۷	۰/۸۹	۰/۱۸	۰/۰۳	۰/۰۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱۴
	رتبه	۳	۲	۱	۴	۷	۶	۹	۱۰	۱۱	۸	۱۲	۱۳	۱۴	۵
S13	BI	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۰۲	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۲۹	۰/۳۵
	رتبه	۳	۵	۴	۶	۸	۷	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۲	۱
S0	BI	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۵۲	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰	۰
	رتبه	۲	۱	۳	۵	۴	۷	۶	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، برای نخستین‌بار، ریسک کل طرح‌های توسعهٔ منابع آب تحت چارچوب توسعهٔ پایدار با استفاده از روش تحلیل ریسک درخت خطا انجام گرفت. رویداد نامطلوب، شکست طرح‌های توسعهٔ منابع آب تحت چارچوب توسعهٔ پایدار انتخاب شد. برای این منظور، کلیهٔ عوامل منجر به شکست رویداد رأس، براساس شاخص‌های معرفی‌شده توسط سازمان‌های معتبر و محققان مختلف شناسایی شدند و در قالب ۱۴ شاخص در ساختار درخت خطا به کار برده شدند. سپس، براساس نتایج مدل‌سازی طرح‌های توسعهٔ منابع آب در محیط ونسیم، احتمال شکست شاخص‌های توسعهٔ پایدار برآورد شدند و در قالب رویدادهای پایه جای گرفتند. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل ریسک طرح‌های توسعهٔ منابع آب به ازای ۲۱ سناریو، نشان داد احتمال شکست بهترین سناریو برابر با ۳۸ درصد و بدترین سناریو برابر با ۹۰درصد است، در حالی که احتمال شکست شرایط موجود ۵۰ درصد است. همچنین، به دلیل ریسک زیاد به‌دست‌آمده به رتبه‌بندی رویدادهای پایه براساس سهم آنها در وقوع رویداد رأس با استفاده از شاخص BI برای بهترین و بدترین سناریو و سناریوی وضع موجود پرداخته شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، عامل مهم شکست در بهترین سناریو (S4)، عدم تحقق شاخص‌های اجتماعی (با احتمال ۳۴ درصد) و پس از آن، شکست اقتصادی (با احتمال ۳ درصد) است. و در بدترین سناریو (S13)، مهم‌ترین عامل شکست رویداد رأس، عدم تحقق شاخص‌های اقتصادی (با احتمال ۷۴ درصد) بوده‌اند، پس از آن شکست اجتماعی (با احتمال ۶۲ درصد) بیشترین تأثیر را در وقوع رویداد رأس دارد. اما عامل مؤثر در شکست شرایط موجود، شکست شاخص‌های اجتماعی (با احتمال ۵۰ درصد) به دلیل نارضایتی مردم از عدم تأمین نیازها و کاهش اشتغال بوده است، و عامل مؤثر دیگر در وقوع رویداد رأس، شکست کمی منابع آب (با احتمال ۴ درصد) به دلیل عدم تأمین نیازها است. به بیانی دیگر، در بدترین سناریو، طرح انتقال از جگین با هدف تأمین شرب مطرح است که هزینهٔ زیادی را در بر می‌گیرد. از طرفی، درآمد حاصل از این طرح (فروش آب شرب)، بسیار ناچیز است. بنابراین، سناریوهایی که شامل این طرح انتقال از جگین به بندرعباس هستند به دلیل ریسک زیاد شاخص B/C، احتمال شکست بیشتری را به شکست اقتصادی و در نهایت، شکست رویداد رأس اختصاص می‌دهند. اما در سناریوهایی که این طرح وجود ندارد و گزینهٔ مقابل آن یعنی طرح احداث آب‌شیرین‌کن برای تأمین کمبودها مطرح است، به دلیل بهره‌برداری از ظرفیت دوم این آب‌شیرین‌کن‌ها در فصول ترسالی برای مصارف گلخانهٔ ساحلی، ریسک شاخص کاهش B/C، نسبت به سایر سناریوها کاهش یافته و در عوض، به دلیل وجود آب‌شیرین‌کن و نارضایتی مردم ناشی از پایین بودن سطح کیفیت آب‌شیرین‌کن نسبت به منابع متعارف، ریسک ناشی از شکست اجتماعی افزایش یافته است. به طور کلی، به دلیل اینکه ارزیابی طرح‌های توسعهٔ منابع آب، به صورت جامع و یکپارچه تحت شاخص‌های توسعهٔ پایدار در درخت خطای ارائه‌شده مد نظر قرار گرفت، ساختار درخت خطای ارائه‌شده می‌تواند به عنوان یک معیار جامع برای سایر مناطق برای انتخاب بهترین طرح توسعهٔ منابع آب با دیدگاه توسعهٔ پایدار از میان گزینه‌های مختلف، به کار برده شود. در درخت خطای ارائه‌شده رویدادهای پایه به صورت مستقل فرض شده‌اند، بنابراین از پیچیدگی و زمان اجرای مدل کاسته شده است و چون در ارزیابی طرح‌های توسعهٔ منابع آب مهم‌ترین مسئله، شناخت عوامل مؤثر بر شکست طرح و تصمیم‌گیری برای مدیریت آنهاست، بنابراین اولویت‌بندی رویدادهای پایه و استفاده از دروازه‌های منطقی و احتمالاتی مهم‌ترین مزیت این روش نسبت به روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است. همچنین، پیشنهاد می‌شود برای کاهش عدم قطعیت‌های موجود از روش‌هایی مانند منطق فازی در محاسبهٔ درخت خطا استفاده شود.

منابع

[1].WCED (World Commission on Environment and Development). Our Common Future. Oxford:Oxford University Press;1987.

[2].Sadiq R, Kleiner Y, Rajani B. Water quality failures in distribution networks—risk analysis using fuzzy logic and evidential reasoning. Risk analysis. 2007; 27(5):1381-1394.

[3].Sadiq R, Saint-Martin E, Kleiner Y. Predicting risk of water quality failures in distribution networks under uncertainties using fault-tree analysis. Urban Water Journal. 2008; 5(4):287-304.

[4].Lindhe A, Rosén L, Norberg T, Bergstedt O. Fault tree analysis for integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems. Water research. 2009; 43(6):1641-1653.

[5].Taheriyoun M, Moradinejad S. Reliability analysis of a wastewater treatment plant using fault tree analysis and Monte Carlo simulation. Environmental monitoring and assessment. 2015; 187(1):4186.

[6].Stein D, Achari G, Langford CH, Dore MH, Haider H, Zhang K, Sadiq R. Performance management of small water treatment plant operations: a decision support system. Water and Environment Journal. 2017; 31(3):330-44.

[7].Tabesh M, Roozbahani A, Hadigol F. Risk Assessment of Water Treatment Plants Using Fuzzy Fault Tree Analysis (Case Study: Jalaliyeh Water Treatment Plant). Journal of Water and Wastewater. 2018; 29(4):132-144. [Persian]

[8].Babaei M, Roozbahani A, Shahdany SMH. Risk Assessment of Agricultural Water Conveyance and Delivery Systems by Fuzzy Fault Tree Analysis Method. Water Resources Management. 2018; 32(12):4079-4101.

[9].Ghachlou M, Roozbahani A, Banihabib ME. Comprehensive risk assessment of river basins using Fault Tree Analysis. Journal of hydrology. 2019;123974.

[10].Raju KS, Duckstein L, Arondel C. Multicriterion analysis for sustainable water resources planning: a case study in Spain. Water Resources Management. 2000;14(6):435-456.

[11].Yilmaz B, Harmancioglu N. Multi-criteria decision making for water resource management: a case study of the Gediz River Basin, Turkey. Water SA. 2010; 36(5).

[12].Abadi L, Sadeghi Kh, Shamsai A, Goharnejad H. An analysis of the sustainability of basin water resources using Vensim model. KSCE Journal of civil engineering. 2015;19(6):1941-1949.

[13].Banihabib ME, Shabestari M.H. Decision Models for the Ranking of Agricultural Water Demand Management Strategies in an Arid Region. Irrigation and Drainage. 2017; 66(5):773-783.

[14].Kefayati M, Saghafian B, Ahmadi A, Babazadeh H. Empirical evaluation of river basin sustainability affected by inter- basin water transfer using composte indicators. Water and Environment Journal. 2018(1):104-111.

[15].Liang GS, Wang MJJ. A fuzzy multi-criteria decision-making method for facility site selection. 1991; 29(11):2313-2330.

[16].Zhang GD, Lu YX. Analysis and design of reliability and maintenance of system." Beijing: Beijing Aeronautics and Astronautics University Press, Beijing. 1990; 120-125.

[17].Pan ZJ, Tai YC. Variance importance of system components by Monte Carlo. IEEE Transactions on Reliability.1988; 37(4):421-423.

[18]. Rayab Consulting Engineering Company. Report of "Design landscape of water transfer from the Jagin dam to Makran coast".2010. [Persian]

[19]. Lar Consulting Engineering Company. Report of "Complementary studies of the second phase of the Gabrick Dam". 2017. [Persian]

[20].Regional Water Company of Hormozgan. Report of "Water section Development document of Hormozgan Province". 2010. [Persian]

[21].Rajaian MM. Dynamic Systems Simulation with Vensim Software. 2nd ed. Mashhad:farayaz; 2013. [Persian]

[22].Sterman JD. Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world. Boston. New York:McGraw-Hill. 2000.

[23].Hafezparast M, Araghinezhad SH, SharifAzari S. Sustainability Criteria in Assessment of Integrated Water Resources Management in the Aras Basin Based on DPSIR Approach. Journal of water and soil conservation. 2015; 22(2). [Persian]

[24]. Wu J. Land use changes: Economic, social, and environmental impacts. Choices. 2008; 23 (4): 6-10.

[25].Iternational Organization for Standardization. 2018. Access site; www.iso.org/sdgs/

[26].Nezamabadi AA, Rostami MNk, Moradi S. Red Tide Effects on the Function of Desalination Plant in Kish Island. Specialized Conference on Saltwater Desalination, Saltwater and Wastewater Treatment.Tehran. University of Water and Power Technolog. 2012. [Persian]