اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۵، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۷، ص ۱۳۳۴-۱۳۲۱

توسعهٔ شاخص ریسک منابع آب با روش تحلیل درخت خطا (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه)

مهدی گچلو[۱]، عباس روزبهانی[۲*]، محمدابراهیم بنی‌حبیب[۳]

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

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

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

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۲/۱۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۷/۳۰)

چکیده

پیامدهای منفی از بین رفتن منابع آب برای حیات انسان و دیگر گونه‌های زیستی موجب شده تا بررسی اطمینان‌پذیری حوضه‌های آبریز برای تأمین این نیاز اساسی ضرورت یابد. از این رو، در پژوهش حاضر برای نخستین‌بار روش تحلیل ریسک برای شناسایی نقاط آسیب‌پذیر و ارائهٔ یک شاخص جامع در مقیاس حوضهٔ آبریز به کار گرفته شد. به این ترتیب، با استفاده از روش تحلیل ریسک درخت خطا رویداد نامطلوب حوضه تعیین شد. سپس، عوامل منجر به وقوع آن شامل مخاطرات طبیعی و تهدیدهای انسانی شناسایی و با کمک دروازه‌های منطقی، راه‌های منجر به وقوع شکست در حوضه به کمک روابط علی- معلولی مشخص شدند. این مدل در قالب یک مطالعهٔ موردی برای حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه ارائه شد. «ریسک شکست حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه» به عنوان رویداد رأس در ساختار درخت خطا، از وقوع عواملی همچون شکست‌های کمیت آب، کیفیت آب، اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی در نظر گرفته شد. احتمال شکست رویداد رأس، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از احتمال تجمیع‌شده توسط دیدگاه‌های کارشناسان، ۵۷ درصد برآورد شد. به دلیل احتمال زیاد شکست، برای افزایش اطمینان‌پذیری حوضه، از شاخص بیرنبام برای «اندازه‌گیری اهمیت» رویدادهای پایه استفاده شد. بر اساس نتایج، به‌ترتیب سه رویداد «حکمرانی نامناسب»، «پایین‌بودن سطح آگاهی حوضه‌نشینان»، و «عدم رهاسازی حقابهٔ زیست‌محیطی» بیشترین سهم را در وقوع رویداد رأس داشتند. درنتیجه، شاخص جامع به‌دست‌آمده می‌تواند به عنوان یک معیار کلی برای بررسی ریسک منابع آب در سایر حوضه‌های ایران توصیه شود.

کلیدواژگان: تحلیل درخت خطا (FTA)، تحلیل ریسک، حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه، شاخص بیرنبام.

* نویسندهٔ مسئول

Email: roozbahany@ut.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

مقدمه

امروزه، بحران آب تهدیدی جدی برای حیات بشر محسوب می‌شود. دیدگاه کوتاه‌مدت برای مقابله با خطرات و عدم شفافیت برنامه‌ریزی مرتبط با بحران یادشده و علمی‌نبودن برخی برنامه‌ریزی‌ها، خطرات ناشی از این تهدیدها را افزایش می‌دهد و امکان افزایش و گسترش بحران پس از وقوع را به همراه دارد. بنابراین، ضروری است که حوضه‌های آبریز به‌وسیلهٔ ابزاری ارزیابی شوند تا بتوان آب مورد نیاز و با کیفیت مناسب را تأمین کرد. یکی از حوضه‌های پرتنش کشور طی چند سال اخیر، حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه است. این دریاچه به دلیل داشتن مشکلات فراوان در بخش‌های کمبود منابع آب، کیفیت نامناسب آب، خطرات اکولوژیکی و آسیب‌های اقتصادی و اجتماعی؛ به یک ارزیابی جامع از کل حوضهٔ ارومیه نیاز دارد تا بتوان با شناسایی نقاط خطرپذیر حوضه به منظور مدیریت ریسک و بهبود آن گام برداشت.

درخت خطا در سیستم‌های آبی مختلف از جمله در تصفیه‌خانه‌ها، شبکه‌های آب‌رسانی و آبیاری کاربرد فراوانی دارد. از این رو، رویداد نامطلوب «کیفیت نامناسب آب در سیستم توزیع آب شهری» با استفاده از روش تحلیل ریسک درخت خطا (FTA)[1] بررسی شد. رویدادهای آلودگی آب در نقطهٔ ورودی، خوردگی اجزای سیستم و شکست در تصفیه‌خانه ازجمله عوامل اصلی ای بودند که در وقوع رویداد رأس شناخته شدند [۱]. در حوضهٔ باگماتی[2] نپال شاخص‌های زیست‌محیطی و شاخص‌های اجتماعی-اقتصادی بررسی شدند که سرانجام شاخص جامع با وزن‌دهی به شاخص‌های مختلف اعم از کمبود منابع آب و آلودگی آب به دست آمد [۲].

روش درخت خطا برای تجزیه و تحلیل اطمینان‌پذیری سیستم و عموماً برای ارزیابی ریسک استفاده می‌شود. هدف اصلی تحلیل درخت خطا کمک به محاسبهٔ احتمال شکست ناشی از رویدادهای پایه[3] و مؤلفه‌های مختلف است که ابتدا وضعیت نامطلوب شناسایی و سپس به کمک دروازه‌های منطقی علل وقوع آن کشف می‌شوند [۳]. در پژوهشی ریسک‌های اعتباری، مقرراتی و فیزیکی چندین رودخانه در کشور چین با استفاده از شاخص‌های ارائه‌شده توسط سازمان‌های معتبری مانند صندوق جهانی طبیعت (WWF[4]) و شرکت توسعه و سرمایه‌گذاری آلمانی (DEG)[5] برای شناسایی و بررسی آسیب‌ها و علل شکست حوضه در جهات مختلف ارائه شدند. در پژوهش یادشده، با استفاده از روش وزن‌دهی به هر شاخص و تجمیع آنها، توانستند ریسک کلی رودخانه را محاسبه کنند [۴].

Gain و همکارانش ریسک کمبود آب از نظر اکولوژیکی، اجتماعی و فیزیکی در حوضهٔ براهماپوترا[6] را ارزیابی کردند. آنها برای دستیابی به یک شاخص جامع ریسک، از ترکیب سلسله‌مراتبی شاخص‌های مختلف استفاده کردند. همچنین، برای تجمیع شاخص‌ها، از میان روش‌های تجمعی مختلف (میانگین وزنی، میانگین هندسی و اندازه‌گیری‌های جمع‌ناپذیر (NAM[7]) و...) از روش NAM استفاده کردند. سرانجام، در این روش تجمعی برای دستیابی به یک رابطهٔ کلی از معیارها، به هر شاخص توسط کارشناسان امتیاز داده شد [۵]. طاهریون و مرادی‌نژاد اطمینان‌پذیری یک تصفیه‌خانه در محدودهٔ شهرک غرب تهران را با استفاده از روش درخت خطا ارزیابی کردند. روش تحلیل ریسک درخت خطا بر اساس مجموعه‌های برشی حداقل و شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام شد. رویداد نامطلوب در این تصفیه‌خانه، تخطی BOD پساب خروجی از میزان استاندارد آبیاری بود. آنها نشان دادند درخت خطا ابزاری کارآمد در نمایش گرافیکی و تحلیل ریسک عوامل شکست تصفیه‌خانهٔ فاضلاب است. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد رویدادهای پایه در تصفیه‌خانهٔ فاضلاب مواردی از قبیل خطای اپراتور، آسیب فیزیکی و مشکلات مربوط به طراحی بودند که احتمالات شکست آنها به‌وسیلهٔ اطلاعات در دسترس و نظر کارشناسان خبره به دست آمد [۶]. تابش و همکارانش از تحلیل ریسک درخت خطا با دو رویکرد فازی و ساده برای ارزیابی ریسک تصفیه‌خانهٔ آب استفاده کردند. برای شناسایی عدم قطعیت‌های موجود در دیدگاه‌های کارشناسی و ماهیت خطرات تهدیدکنندهٔ منطق فازی به کار گرفته شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، رویدادهای طراحی نامناسب مخزن، خرابی تجهیزات برق‌رسانی، شکست لولهٔ انتقال و تعمیر و نگهداری

1. Fault Tree Analysis
2. Bagmati
3. Basic Events
4. The World Wide Fund For Nature
5. German Investment and Development Co
6. Brahmaputra
7. Non-additive Measures

Archive of SID

www.SID.ir

نامناسب پمپ‌ها بیشترین سهم را در وقوع رویداد کمیت و کیفیت نامناسب آب داشتند [۷].

ازجمله کاربردهای گستردهٔ درخت خطا می‌توان به پژوهش انجام‌شده توسط Stein و همکارانش اشاره کرد. آنها در پژوهش خود از روش درخت خطا به عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای شناسایی ارتباط بین رویدادهای پایه و آثار آنها بر رویداد رأس در تصفیه‌خانهٔ آب استفاده کردند [۸].

درخت خطا روشی کاربردی برای ارزیابی سیستم و قابلیت اطمینان است که تأثیرات ترکیبی از شکست ها روی یک سیستم را ارزیابی می‌کند. در تحقیقی از افزونه‌ای با عنوان پاندورا[1] با به‌کارگیری دروازه ها و قواعد زمانی به منظور آنالیز دینامیکی برای توسعهٔ درخت خطا استفاده شد. ارزیابی کمی احتمالات شکست از درخت خطای زمانی پاندورا با بهره‌گیری از داده‌های احتمالاتی دقیق از شکست مؤلفه‌ها انجام شد. در نتیجه، مجموعهٔ فازی به همراه درخت خطای زمانی پاندورا قادر به آنالیز دینامیکی سیستم‌های پیچیده با وجود محدودیت داده‌های کمی خواهند بود [۹]. در تحقیقی دیگر، با توسعهٔ یک مدل سلسله‌مراتبی در انواع مختلف از شبکه‌های آبیاری مختلف، ضعف‌ها و تهدیدهای طبیعی و انسان‌ساز شناسایی شدند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد نگهداری ضعیف در کانال اصلی، عملیات نگهداری ضعیف در سازه‌های تقاطعی، خطای نیروی انسانی کم‌تجربه و کالیبراسیون بی‌دقت در دریچه‌های قابل بهره‌برداری، بیشترین ریسک را در وقوع شکست یک شبکهٔ آبیاری داشتند [۱۰].

همچنین، درخت خطا را می‌توان به عنوان یک روش برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده معرفی کرد. مدل مبتنی بر آنالیز قابلیت اطمینان (MBDA[2]) توسط درخت خطا ارائه شد. در کل، MBDA به عنوان ابزاری برای تحلیل و بررسی سیستم‌های پیچیده تحت عدم قطعیت به کار گرفته شد [۱۱].

برای ارزیابی دسترسی به منابع آب در یک حوضهٔ آبریز که موضوع تحقیق حاضر است، تا کنون از شاخص فقر آبی نیز استفاده شده است. Asiabi Hir و همکارانش شاخص فقر آبی را بر اساس یک رویکرد ارزیابی چندمعیاره در برخی حوضه‌های آبریز استان اردبیل بررسی کردند. این شاخص نشان‌دهندهٔ تأثیر ترکیبی عوامل مؤثر بر کمبود و تنش منابع آبی است که امکان اولویت‌بندی و تدوین سناریوهای مدیریتی را برای مناطق مختلف فراهم می‌کند [۱۲]. Bao و همکارانش برای نشان‌دادن کاربرد مدیریت ریسک در حوضهٔ آبریز لیوانه[3]، یک شاخص ریسک اکولوژیکی جامع برای ارزیابی ریسک حوضهٔ آبریز ارائه کردند که پوشش‌دهندهٔ سه ریسک کمی آب (ریسک فیزیکی)، کیفی آب (ریسک شیمیایی) و اکوسیستم آبی (ریسک بیولوژیکی) بود. آنها برای محاسبهٔ ریسک اکولوژیکی، از ارتباط بین شاخص‌های میزان تأمین نیاز جریان زیست‌محیطی، شاخص ریسک اکولوژیکی رودخانه، شاخص نسبی کیفی رسوبات و شاخص زیستی استفاده کردند و با وزن‌دهی به هر شاخص و جمع‌کردن آنها، ریسک کلی را به دست آوردند [۱۳].

همچنین، برای نخستین‌بار ساختار منحصربه‌فردی برای تحلیل ریسک کفایت، عدالت و بازده تحویل آب در سامانه‌های انتقال و تحویل آب کشاورزی ارائه شد که با استفاده از روش تحلیل ریسک «درخت خطا» بحران یا رویداد نامطلوب «عدم مطلوبیت تأمین و تحویل» تعیین شد. سپس، عوامل منجر به وقوع این رویداد نامطلوب شامل مخاطرات طبیعی و تهدیدهای انسانی و عملکردی در قالب رویدادهای پایه و میانی در ساختار درخت خطا جای گرفتند [۱۴].

به طور کلی، بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد تا کنون پژوهشی در بخش تحلیل ریسک به‌وسیلهٔ درخت خطا برای منابع آب در سطح حوضه انجام نگرفته است و از رویکرد احتمالاتی درخت خطا برای دستیابی به یک شاخص جامع و یکپارچه که پوشش‌دهندهٔ عمدهٔ شاخص‌ها در حوضه باشد، استفاده نشده است. به همین منظور، شاخص‌های ریسک که در پژوهش حاضر بحث می‌شود به صورت جامع‌تر و چندبعدی ریسک حوضه را بررسی خواهند کرد. از این رو، مشکلات چند سال اخیر حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه مربوط به عوامل گسترده و پیچیده هستند که نیازمند به‌کارگیری رویکردی جامع به منظور شناسایی عوامل شکست در سطح حوضه خواهند بود. به همین منظور، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و شناسایی کل عوامل تهدیدکنندهٔ حوضهٔ آبریز از نظر

1. Pandora
2. Model-Based Dependability Analysis
3 .Luanhe

Archive of SID

www.SID.ir

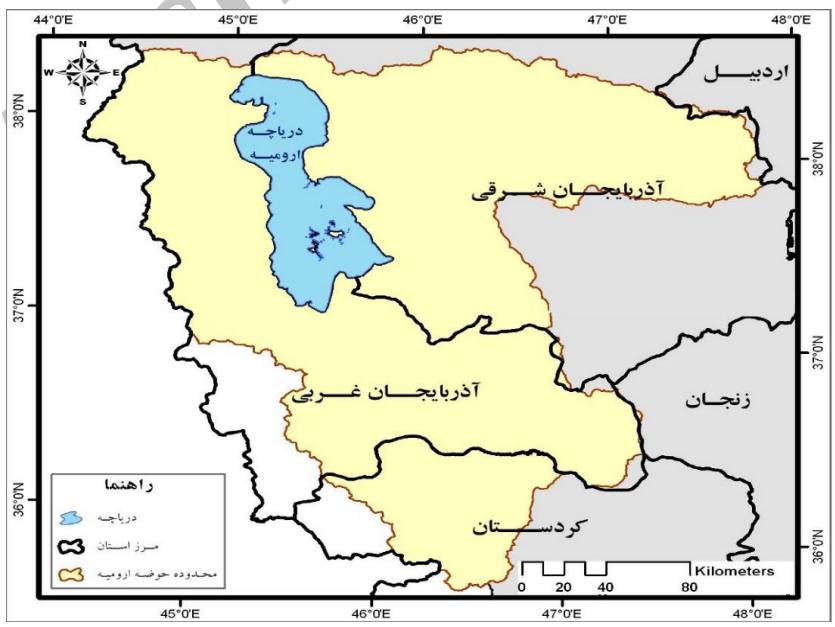
کمبود و کیفیت آب، شرایط اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی انجام شده است تا یک شاخص جامع برای پوشش ریسک‌های کلی حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه (رویداد رأس) ارائه شود. به منظور ایجاد یک شاخص کلی برای ارزیابی ریسک حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه به وسیلهٔ درخت خطا، از شاخص‌های ارائه‌شده توسط محققان مختلف و نیز سازمان‌های معتبر صندوق جهانی طبیعت (WWF) و بخش سرمایه‌گذاری و توسعهٔ آلمان (DEG) استفاده شد. چارچوب کلی ارائه‌شده در سطح حوضهٔ آبریز می‌تواند به عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری به منظور مقایسهٔ وضعیت حوضه‌های آبریز اصلی و فرعی از نظر ابعاد اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، محیط زیستی و... باشد.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مطالعه‌شده

حوضهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه، در شمال غرب ایران، با مساحت حدود ۵۲ هزار کیلومترمربع، یکی از شش حوضهٔ آبریز اصلی کشور است. مهم‌ترین رودخانه‌ها و مسیل‌هایی که مستقیم به این دریاچه می‌ریزند، عبارت‌اند از: زرینه‌رود، سیمینه‌رود، مهابادچای، گدار، بار اندوز، شهر چای، روضه، نازلو، شیواسان، زولا. این دریاچه بزرگ‌ترین آبگیر داخلی کشور و خاورمیانه است و از نظر وسعت، بیستمین دریاچهٔ بزرگ و از لحاظ شوری، دومین دریاچهٔ شور جهان بعد از بحرالمیت محسوب می‌شود، همچنین زیستگاه یک گونهٔ منحصربه‌فرد سخت‌پوست از جنس آرتمیا و دومین زیستگاه بزرگ این جنس در جهان است [۱۵]. موقعیت کلی دریاچهٔ ارومیه و مرز حوضهٔ آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

شرایط کنونی دریاچهٔ ارومیه پیامد توسعهٔ ناموزون و ناپایدار در حوضهٔ آبریز آن و برداشت بی‌رویه از منابع آب تجدیدپذیر حوضه به‌ویژه در دو دههٔ اخیر است. مجموعه عوامل انسانی و طبیعی مختلف مانند اجرای طرح‌های متعدد توسعهٔ منابع آب، توسعهٔ روزافزون بخش کشاورزی، تغییر الگوی کشت و تولید محصولات پرآب در سطح حوضه، بهره‌وری کم مصرف آب و عدم حفاظت مؤثر از منابع زیست‌محیطی و اکولوژیکی حوضه و از طرف دیگر، نوسانات اقلیمی و کاهش میزان بارش‌ها و رواناب‌ها در سطح حوضه، چنین شرایطی را برای پهناورترین دریاچهٔ داخلی ایران به همراه داشته است [۱۶]. بر اساس شواهد موجود و نیز تجارب به‌دست‌آمده از دریاچه‌هایی با وضعیت مشابه ارومیه در سطح جهان، بدون شک تداوم روند خشکی دریاچهٔ ارومیه خسارت‌ها و آسیب‌های بسیاری را بر سلامت و بهداشت ساکنان حوضه و معیشت آنها، تخریب اکوسیستم و بخش کشاورزی حوضهٔ تخریب اراضی و باغ‌ها به همراه خواهد داشت.



شکل ۱. موقعیت منطقهٔ مطالعه‌شده

Archive of SID

www.SID.ir

مراحل انجام پژوهش

در پژوهش حاضر برای تعیین عوامل مؤثر در شکست کمی و کیفی حوضهٔ آبریز ارومیه از روش درخت خطا استفاده شده است. گام‌های انجام تحقیق بر اساس روش یادشده به شرح زیر است:

گام نخست، بررسی گزارش‌ها و بازدیدهای میدانی:

نخستین گام در آنالیز درخت خطا، شناخت کامل و دقیق حوضه است. برای دسترسی به اطلاعات دقیق و جزئی در به‌خطرافتادن کل حوضهٔ آبریز می‌توان از منابع مختلفی نظیر نقشه‌ها، نمودارها، گزارش‌های میدانی، دستورالعمل‌های عملیاتی، مصاحبه با کارشناسان و همچنین مقایسهٔ حوضه با حوضه‌های مشابه استفاده کرد.

گام دوم، تعیین معیارهای ارزیابی کمی و کیفی منابع آب:

بعد از شناخت کامل حوضهٔ آبریز، معیارها و شاخص‌های تأثیرگذار در حوضهٔ آبریز در تمامی جنبه‌ها نظیر عوامل کمی، کیفی، اکولوژیکی و اقتصادی و اجتماعی از شاخص‌های ارائه‌شده توسط سازمان‌های معتبر صندوق جهانی طبیعت (WWF) و شرکت توسعه و سرمایه‌گذاری آلمانی (DEG) و دیدگاه‌های کارشناسان جمع‌آوری شد.

گام سوم، تعیین رویدادهای رأس، میانی و پایه:

رویداد رأس «ریسک شکست حوضهٔ آبریز» یک رویداد نامطلوب است که در بالاترین سطح درخت خطا قرار گرفته و تکرار نمی‌شود. بنابراین، در صورت وقوع، مخاطرات زیادی را به وجود می‌آورد. از این رو، برای تعیین کلیهٔ عوامل دخیل در وقوع رویداد رأس باید از رویدادهای میانی و پایهٔ متناسب با رویداد بالایی خود استفاده کرد تا درنهایت رویداد نامطلوب تعیین شود.

گام چهارم، تدوین و اجرای درخت خطا:

با استفاده از دروازه‌های منطقی (شامل دروازه‌های «و» و «یا») رویدادهای میانی و رویدادهای پایه به یکدیگر وصل می‌شوند که در نهایت به رویداد رأس منجر خواهند شد. به دلیل اهمیت زیاد این دروازه‌ها، مفهوم مختصری از این دو دروازه در درخت خطا می‌پردازیم که نماد هر یک، مقابل آنها نشان داده شده است.

دروازهٔ «و»: وقتی شکست خروجی رخ می‌دهد که تمام ورودی‌ها به وقوع بپیوندد.

دروازهٔ «یا»: وقتی شکست خروجی رخ می‌دهد که حداقل یکی از ورودی‌ها به وقوع بپیوندد.

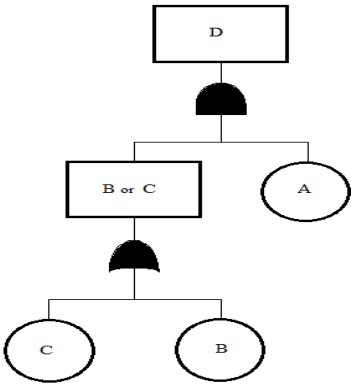
گام پنجم، تحلیل کمی رویدادهای پایه و رویداد رأس:

تحلیل کمی رویدادهای پایه: برای تعیین احتمال شکست رویدادهای پایه در ساختار درخت خطا می‌توان به سوابق اطلاعات ثبت‌شده در مورد شکست رویدادهای پایهٔ مد نظر مراجعه کرد. برای تعیین احتمال شکست رویدادهای پایه امکان دارد سابقهٔ اطلاعاتی دربارهٔ منابع آب، ایستگاه‌های هیدرومتری و روند تغییرات آنها، اطلاعات و آمار از مصارف منابع آب سطحی و زیرزمینی و اطلاعات کیفی آنها ناقص بوده و یا اصلاً وجود نداشته باشد. به ناچار، باید سراغ دیدگاه های کارشناسان و طراحان رفت. بنابراین، کارشناسان و صاحب‌نظران شامل اساتید دانشگاه، متخصصان وزارت نیرو، کارشناسان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی و افراد صاحب‌نظر در ستاد احیای دریاچهٔ ارومیه با اشراف کامل بر حوضهٔ ارومیه دیدگاه‌های خود را به صورت متغیرهای کیفی یا زبانی در قالب پرسشنامه اعمال کردند که احتمال شکست معادل با عبارت های بیانی «کم»، «خیلی کم»، «متوسط»، «زیاد»، «خیلی زیاد» به‌ترتیب برابر ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ ۰/۹ است. از این رو، به هر متغیر زبانی یک مقدار احتمال نسبت داده شد که با استفاده از میانگین احتسابی، احتمال شکست هر رویداد پایه محاسبه شد.

تحلیل کمی رویداد رأس: محاسبات درخت خطا بر اساس قوانین بولین است. در محاسبهٔ رویداد رأس، رویدادهای پایه به وسیلهٔ دروازه‌های منطقی AND و OR به رویدادهای میانی متصل می‌شوند تا به رویداد رأس ختم شود. اگر لزوماً شکست هم‌زمان دو رویداد شکست رویداد بیشتر را رقم بزند، دروازهٔ «AND» و اگر شکست حداقل یکی از آنها به شکست رویداد بالاتر منجر شود، دروازهٔ «OR» متصل‌کنندهٔ آن دو خواهد بود. در شکل ۲ شکست «D» به عنوان رویداد رأس در نظر گرفته شده است و بین دو رویداد پایه شکست «B» و شکست «C» دروازهٔ «OR» به کار رفته است؛ اما بین رویداد فرعی شکست «B» یا «C» و رویداد پایهٔ «A»، دروازهٔ «AND» دیده می‌شود. دروازه‌های منطقی به‌کار برده‌شده در درخت خطا بر اساس روابط ۱ و ۲ برآورد می‌شوند [۱۷]:

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲. ساختار درخت خطای ساده

دروازهٔ AND:

$$P=\prod_{i=1}^{n}P_i \qquad (۱)$$

دروازهٔ OR:

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

که P احتمال هر رویداد پایه، P_i مقدار احتمال شکست رویداد پایهٔ i ام است، i شمارنده، n تعداد رویدادهای ورودی متصل به دروازه‌اند.

گام ششم: بهبود سطح اطمینان‌پذیری بر اساس رتبه‌بندی رویدادهای پایه:

اگر احتمال شکست رویداد رأس که از مرحلهٔ قبلی به دست آمد رضایت‌بخش باشد، کار تحلیل درخت خطا تمام شده است، اما اگر رضایت بخش نبود، نیاز به کاهش احتمال شکست رویداد رأس و انجام اقدامات اصلاحی دارد. درواقع، سیستم وارد فاز مدیریت ریسک خواهد شد که در صورت زیادبودن احتمال رویداد رأس، رتبه‌بندی رویدادهای پایه بر اساس سهم آنها در وقوع رویداد رأس مطرح خواهد شد. یکی از ابزارهای مفید در این زمینه، اندازه‌گیری اهمیت رویدادهای پایه و یا حتی رویدادهای میانی است که موجب افزایش قابلیت اطمینان می‌شود. روابط بسیاری در زمینهٔ اندازه‌گیری اهمیت پیشنهاد شده اند؛ برای بررسی توزیع شکست در هر زیرشاخه (شکست کمی، کیفی، اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی) در پژوهش حاضر از شاخص بیرنبام[1] استفاده شد. هر یک از این رویدادهای پایه در شکست رویداد بالایی خود سهم متفاوتی دارند. شاخص بیرنبام از رابطهٔ ۳ محاسبه و برآورد می‌شود [۱۸].

$$BI=Q_{q_i=1}-Q_{q_i=0} \qquad (۳)$$

در این رابطه $Q_{q_i=1}$ تابع فازی احتمال شکست رویداد رأس زمانی است که شکست رویداد پایه i ام به طور کامل رخ دهد و $Q_{q_i=0}$ تابع فازی احتمال شکست رویداد رأس زمانی است که شکست رویداد پایه i ام اصلاً رخ ندهد. هر چه میزان شاخص بزرگ‌تر باشد، سهم رویداد پایه در وقوع رویداد رأس بیشتر است.

نتایج و بحث

شرح درخت خطای حوضهٔ آبریز ارومیه

برای ارزیابی ریسک کل حوضه ۳۶ تهدید به عنوان رویداد پایهٔ درخت خطا مشخص شدند. این خطاها شامل خطاهای عملکردی و طبیعی بودند که برای دسترسی سریع به عوامل شکست حوضه، مطابق جدول ۱ با توجه به نوع عملکردشان نشان داده شده‌اند. مشکلات چند سال اخیر حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه مربوط به عوامل گسترده و پیچیده‌ای هستند که نیازمند به‌کارگیری یک رویکرد جامع به منظور شناسایی عوامل شکست در سطح حوضه خواهند بود. یافتن یک شاخص کلی، برای پوشش ریسک‌های کلی حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه از جهات مختلف کمبود، کیفیت منابع آب، اکولوژیکی و وضعیت اقتصادی اجتماعی موجب خواهد شد تا شناخت و تسلط کافی ایجاد شود؛ به منظور ایجاد یک شاخص کلی و جامع برای ارزیابی ریسک حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه به وسیلهٔ درخت خطا، از شاخص‌های ارائه‌شده توسط محققان مختلف و نیز سازمان‌ها و منابع معتبر استفاده شد. شکل ۳ ساختار درخت خطای ریسک شکست حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه را نشان می‌دهد. ریسک شکست کلی حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه (رویداد رأس) در صورت وقوع حداقل یکی از شکست‌های کمی، کیفی، اکولوژیکی، اقتصادی، اجتماعی رخ خواهد داد. با توجه به گستردگی درخت خطای تدوین‌شده در تحقیق حاضر و همچنین به‌منظور ارائهٔ جزئیات کامل هر قسمت، شاخه‌های شکست اصلی حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه با نماد مثلث به صورت مجزا شرح داده شده است. بنابراین، رویدادهای میانی، پایه و دروازه‌های منطقی در ساختار درخت خطا به‌ترتیب با «E[2]»، «BE[3]» و «AND، OR» نمایش داده شدند. در شکل‌های ۳ تا ۷ احتمال وقوع رویداد رأس بر اساس احتمال نسبت داده‌شده

1. Birnbaum Index

2. Event
3. Basic Event

Archive of SID

www.SID.ir

به رویدادهای پایه به دست خواهند آمد و برای استفاده از دروازه‌های منطقی باید به درک عمیقی از ارتباط میان رویداد میانی و رویدادهای پایه داشت، چون در صورت انتخاب دروازهٔ منطقی نامناسب، احتمال ریسک رویداد رأس نیز از مقدار حقیقی خود فاصله خواهد گرفت.

درخت خطای حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه به پنج رویداد فرعی شکست کمیت آب، شکست کیفیت آب، شکست اکولوژیکی، شکست اقتصادی، و شکست اجتماعی منشعب می‌شود که درخت خطا در پنج گام به‌ترتیب شرح داده خواهند شد.

شکست کمی حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه یکی از شکست‌های مهم تأثیرگذار در وقوع رویداد رأس و مهم‌ترین رویداد فرعی درخت از نظر تأمین آب کافی برای حوضه دریاچهٔ ارومیه است که با دو زیرشاخهٔ منشعب در شکل ۴ نشان داده است. ریسک کل حوضه به دلیل کمبود آب، از وقوع حداقل یکی از شکست‌های عوامل مخرب انسانی یا عوامل مخرب طبیعی رخ می‌دهد. از عوامل تأثیرگذار انسانی در کمبود منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضهٔ آبریز می‌توان به ساخت سازه‌های آبی بیش از حد، صادرات آب در زمان کم‌آبی، برداشت بی‌رویه از منابع سطحی و زیرزمینی، کشت بیش از حد محصولات پرمصرف، تلفات ناشی از نبود بهره‌برداری صحیح مخازن یا ترکیدگی و پوسیدگی لوله‌های انتقال اشاره کرد. پدیده‌هایی همچون خشکسالی تجمعی (خشکسالی هیدرولوژیکی، هواشناسی، زراعی) و تغییرات اقلیمی در یک دههٔ اخیر ازجمله عوامل طبیعی‌ای هستند که موجب کاهش رواناب سطحی، میانگین بارندگی و کاهش تراز آب دریاچه می‌شوند و کمبود منابع آب در طول حوضه را در پی خواهند داشت.

جدول ۱. رویدادهای پایه درخت خطای حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه

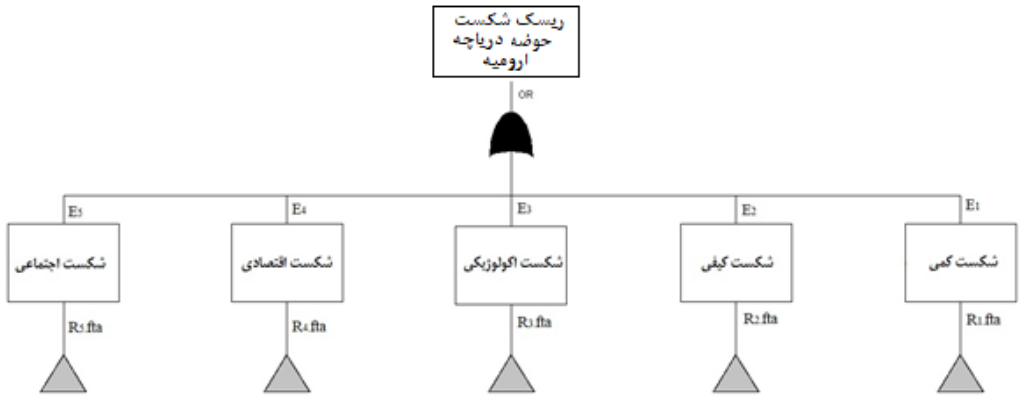
شماره	رویداد پایه	نوع	شماره	رویداد پایه	نوع
۱	الگوی کشت نامناسب	عملکردی	۱۹	ورود فاضلاب صنعتی به آب سطحی	عملکردی
۲	بی‌توجهی به آب مجازی	عملکردی	۲۰	ورود فاضلاب کشاورزی به آب سطحی	عملکردی
۳	قیمت نامناسب آب	عملکردی	۲۱	شوری در آب سطحی	عملکردی
۴	حفر چاه‌های غیرمجاز	عملکردی	۲۲	ورود فاضلاب صنعتی (شکست اکولوژی)	عملکردی
۵	برداشت بی‌رویهٔ آب در مصارف صنعتی، خانگی و کشاورزی (شکست کمی)	عملکردی	۲۳	ورود فاضلاب کشاورزی (شکست اکولوژی)	عملکردی
۶	احداث بیش از حد سد (شکست کمی)	عملکردی	۲۴	ورود فاضلاب خانگی (شکست اکولوژی)	عملکردی
۷	تلفات ناشی از انتقال، توزیع آب، و مصرف آبیاری	عملکردی	۲۵	دسترسی‌نداشتن به آب باکیفیت برای انواع گونه‌های زیستی	عملکردی
۸	تغییر اقلیم	طبیعی	۲۶	دسترسی‌نداشتن به آب کافی برای انواع گونه‌های زیستی	عملکردی
۹	خشکسالی هواشناسی	طبیعی	۲۷	عدم رهاسازی حقابهٔ زیست‌محیطی	عملکردی
۱۰	خشکسالی هیدرولوژیکی	طبیعی	۲۸	فرسایش و رسوب	عملکردی
۱۱	خشکسالی کشاورزی	طبیعی	۲۹	کمبود منابع مالی	عملکردی
۱۲	احداث بیش از حد سد (شکست کیفی)	عملکردی	۳۰	بی‌توجهی به ارزش اقتصادی آب	طبیعی
۱۳	برداشت از چاه‌های غیرمجاز	عملکردی	۳۱	سیلاب	طبیعی
۱۴	برداشت بی‌رویهٔ آب در مصارف صنعتی، خانگی و کشاورزی (شکست کیفی)	عملکردی	۳۲	نبود روش‌های نوین آبیاری	عملکردی
۱۵	شوری در آب زیرزمینی	عملکردی	۳۳	سامان‌دهی نامناسب خاک اراضی کشاورزی	عملکردی
۱۶	ورود فاضلاب صنعتی و خانگی به آب زیرزمینی	عملکردی	۳۴	ناسالم‌بودن سیستم‌های انتقال آب	عملکردی
۱۷	ورود فاضلاب کشاورزی به آب زیرزمینی	عملکردی	۳۵	پایین‌بودن سطح آگاهی	عملکردی
۱۸	ورود فاضلاب خانگی به آب سطحی	عملکردی	۳۶	حکمرانی نامناسب	عملکردی

Archive of SID

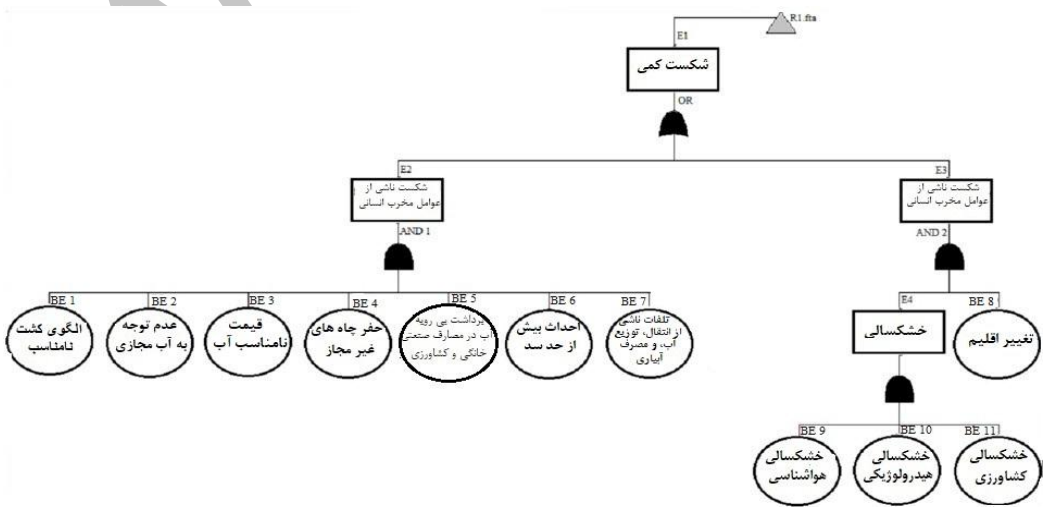
www.SID.ir

طرح‌های مدیریت کیفیت منابع آب در حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه مستلزم قانون‌گذاری، ایجاد ساختارها و فعالیت‌های مدیریتی در برآوردن اهداف متصور برای منابع آب است. نگرش تدوین معیارهای مطلوب برای کیفیت مناسب آب، مشابه سایر منابع زیست‌محیطی، این است که ابتدا پتانسیل اثر سوء ناشی از ترکیب آلاینده‌ها ارزیابی شود. یکی از علل ریسک و شکست حوضهٔ آبریز ارومیه نداشتن کیفیت مناسب در آب‌های سطحی و زیرزمینی است که در شکل ۵ نشان داده شده است. از این رو، آلودگی‌های واردشده از طریق فاضلاب‌های خانگی، صنعت و کشاورزی به منابع آب سطحی و زیرزمینی موجب کاهش کیفیت آب خواهد شد. همچنین، یکی دیگر از علل کاهش کیفیت آب زیرزمینی، وقوع «افت بیش از حد سطح آبخوان» است. این رویداد به دلیل برداشت غیرمجاز از چاه، احداث سازه‌های آبی و برداشت‌های مازاد بر مصرف استاندارد موجب افزایش آلاینده‌ها خواهد شد.

با توجه به شکل ۶، رویداد میانی مهم دیگر، شکست اکولوژیکی است. این شکست خطرات تهدیدکنندهٔ زیستگاه انواع گونه‌های زیستی در حوضه را بررسی می‌کند. وضعیت زیست‌محیطی دریاچهٔ ارومیه با تمام جوانب زمین‌شناسی، اقتصادی، اجتماعی، منابع آب، هوا، اقلیم و... آن طی سالیان گذشته دست‌خوش تغییر شده و روند نزولی را طی کرده است. به تبع ادامهٔ پذیرش آثار منفی در هر اکوسیستم طبیعی، در انتها به تخریب آن اکوسیستم منجر می‌شود که این امر تبعاتی همچون ایجاد اکوسیستم‌های جدید با پتانسیل زیاد ایجاد تخریب بر محیط زیست پیرامونی را به همراه خواهد داشت. وضعیت دریاچهٔ ارومیه و تالاب‌های اطراف آن نیز خارج از این قاعده نیست.

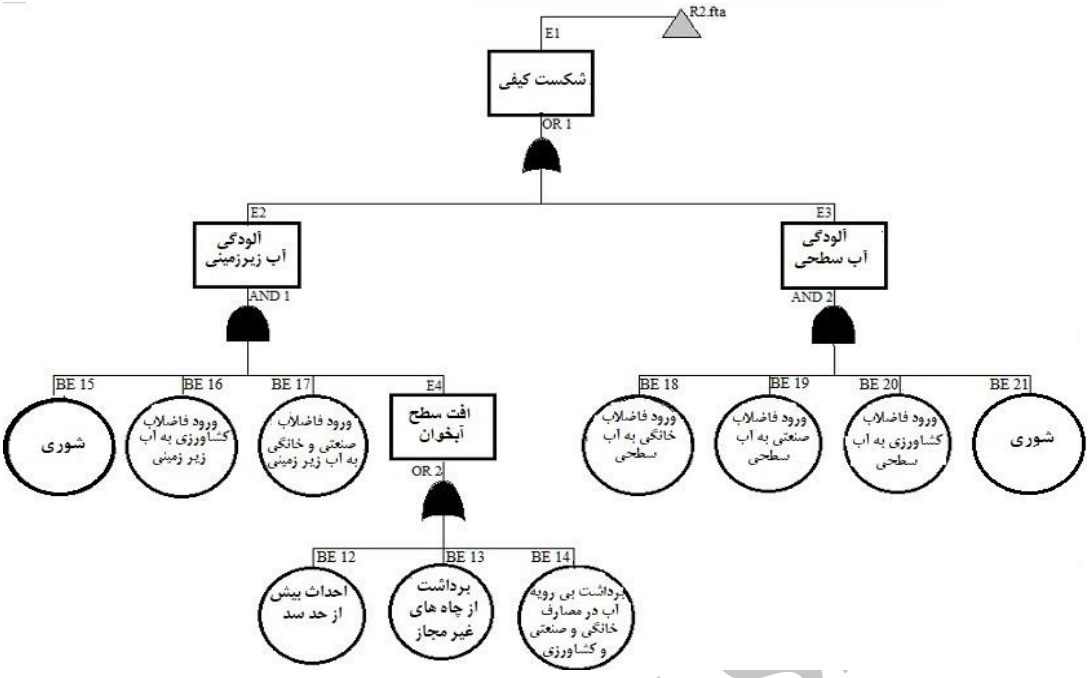


شکل ۳. درخت خطای ریسک شکست حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه

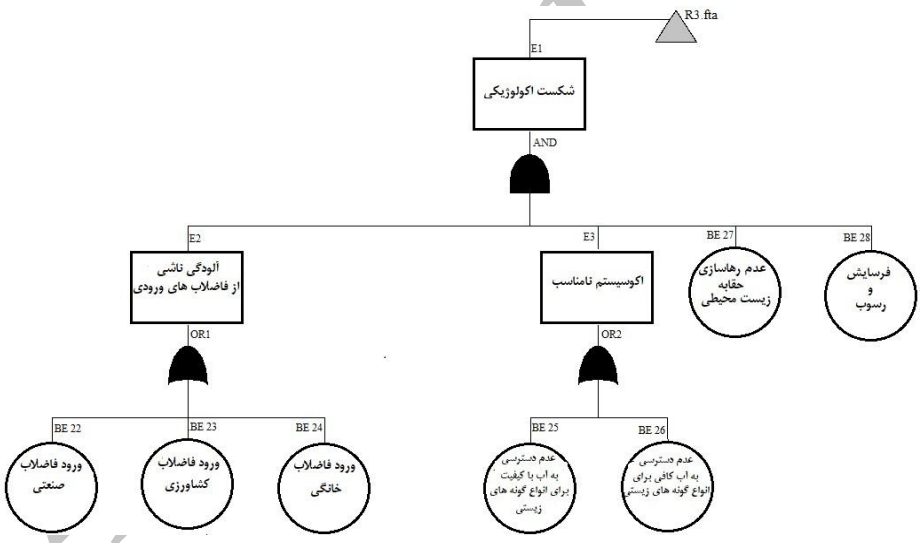


شکل ۴. درخت خطای حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه- شکست کمی

www.SID.ir



شکل ۵. درخت خطای حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه- شکست کیفی



شکل ۶. درخت خطای حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه- شکست اکولوژیکی

از عواملی که محیط زیست حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه را به خطر می‌اندازند می‌توان به مهم‌ترین آن یعنی عدم رهاسازی حقابهٔ زیست‌محیطی (تأمین‌نشدن حداقل تراز اکولوژیکی برای بقای جانوران) و نیز فرسایش و رسوب اشاره کرد. آلودگی‌های ورودی از فاضلاب‌های خانگی، صنعتی و کشاورزی موجب بر هم زدن تعادل محیط زیست حوضه خواهند شد.

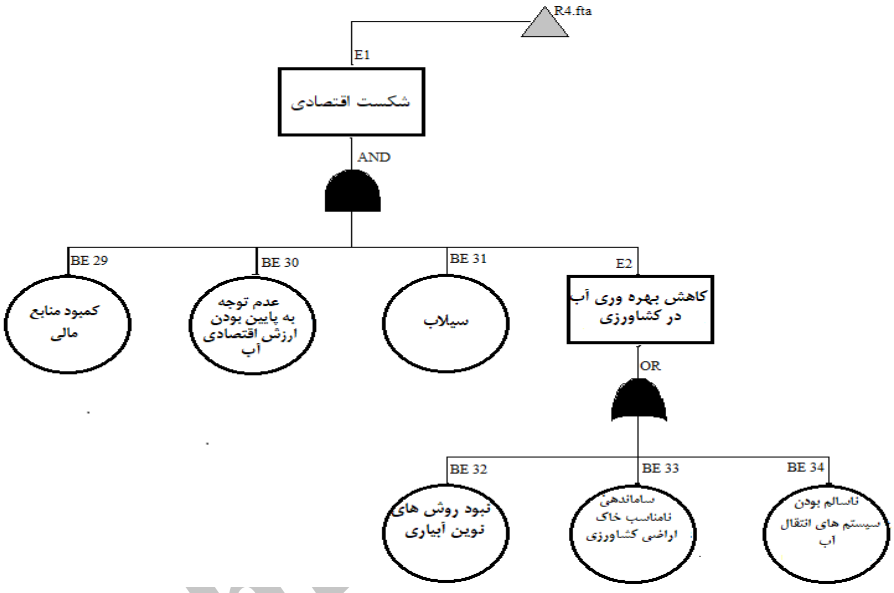
با توجه به شکل ۷ از دیگر رویدادهای تهدیدکنندهٔ حوضهٔ آبریز ارومیه، ریسک ناشی از اقتصاد حوضه است. ازجمله عوامل مؤثر می‌توان به کاهش بهره‌وری آب در کشاورزی (ناشی از عوامل نبود روش‌های نوین آبیاری، ساماندهی نامناسب خاک اراضی کشاورزی و سالم‌نبودن سیستم‌های انتقال آب)، بی‌توجهی به ارزش اقتصادی آب و نیز کمبود منابع مالی اشاره کرد.

با توجه به شکل ۸ عوامل وقوع شکست اجتماعی مؤثر در شکست حوضه نشان داده شده است. از مهم‌ترین عوامل مشکلات اجتماعی می‌توان به پایین‌بودن سطح آگاهی حوضه‌نشینان و حکمرانی نامناسب اشاره کرد.

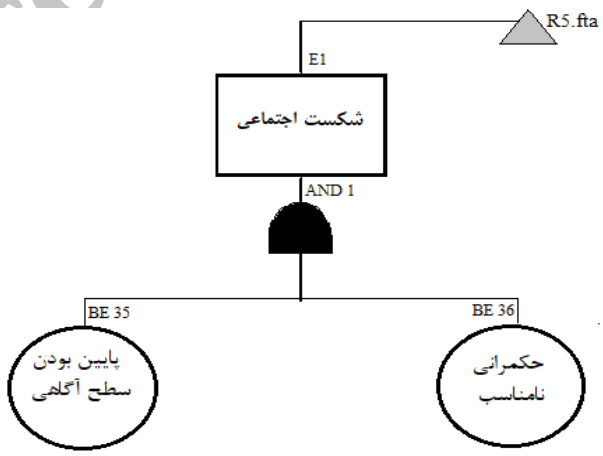
www.SID.ir

حکمرانی نامناسب ناشی از عواملی همچون نبود برنامه‌ریزی مناسب در تأمین و تقاضای آب و قوانین نامناسب در نظر گرفته‌شده در حوضه است. همچنین، بخشی‌نگری و محلی‌گرایی که همراه با تمهیدات سیاسی و فشار عوامل ذی‌نفع محلی برای عمران ناحیه‌ای صورت می‌گیرد، سبب عدم تعادل در فرایند توسعهٔ بخش‌ها و زیربخش ها در کل حوضهٔ آبریز شده است. فشار فزاینده به محیط، رقابت در برداشت، تخصیص و مصرف آب برای پاسخ‌گویی به نیازهای فوری، زمینه برای بحران مهندسی حوضه که انعکاس آن در دریاچهٔ ارومیه نمود بارز یافته را فراهم ساخته است. ناآگاهی حوضه‌نشینان ارومیه یکی از دلایل مهم به‌وجودآمدن وضعیت فعلی است. شکست اجتماعی حوضهٔ دریاچه با استفاده از دروازهٔ AND به وجود می‌آید، یعنی در صورت وقوع هم‌زمان هر دو رویداد پایهٔ ۳۵ و ۳۶ این شکست رخ می‌دهد.

برای طراحی شکل‌های ۳ـ ۸ از محیط نرم‌افزار OPEN FTA استفاده شده است.



شکل ۷. درخت خطای حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه ـ شکست اقتصادی



شکل ۸. درخت خطای حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه ـ شکست اجتماعی

Archive
www.SID.ir

اجرای مدل تحلیل ریسک و تحلیل کمی «ریسک شکست حوضهٔ آبریز ارومیه»

به دلیل کم‌بودن اطلاعات دقیق از عوامل منجر به رویداد نامطلوب، به‌ناچار برای تحلیل کمی رویداد رأس باید از دیدگاه‌های متخصصان کمک گرفت. در پژوهش حاضر دیدگاه‌های ۲۰ کارشناس متشکل از هیئت‌علمی، متخصصان بخش حوضهٔ آبریز ارومیه در شرکت مدیریت منابع آب ایران و وزارت نیرو، افراد صاحب‌نظر در ستاد احیای دریاچهٔ ارومیه، و همچنین کارشناسان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی به‌صورت متغیرهای زبانی و کیفی در قالب پرسشنامه دریافت شد. در جدول ۲ احتمال تجمیع‌شده از دیدگاه‌های کارشناسان برای رویدادهای اولیه نشان داده شده است؛ برای محاسبهٔ احتمال رویداد رأس از محیط نرم‌افزار تحلیل ریسک درخت خطا OPEN FTA استفاده شد. ابتدا، احتمالات و شمارهٔ مربوط به هر رویداد پایه به نرم‌افزار وارد شد. سپس، این نرم‌افزار با به‌کارگیری دروازه‌های منطقی AND/OR برای محاسبهٔ ریسک شکست حوضه اجرا شد. با توجه به جدول ۳، احتمال شکست رویدادهای فرعی شکست کمی، شکست کیفی، شکست اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی به‌ترتیب ۰/۲۱۷، ۰/۱۱۶، ۰/۱۷۳، ۰/۰۲۱ و ۰/۲۴۷ به دست آمد که از میان آنها، رویداد فرعی «شکست اجتماعی» بیشترین احتمال شکست را دارد. درنهایت، احتمال شکست رویداد رأس «ریسک شکست حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه» برابر ۵۷ درصد به دست آمد. به دلیل احتمال زیاد رویداد رأس، رتبه‌بندی رویدادهای پایه بر اساس سهم آنها در وقوع رویداد رأس مطرح خواهد شد.

جدول ۲. احتمال شکست هر رویداد پایه بر اساس دیدگاه‌های کارشناسان

رویداد پایه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
احتمال شکست	۰/۸۷	۰/۶۳	۰/۸۶	۰/۸۹	۰/۹	۰/۶۳	۰/۶۵	۰/۵۷	۰/۴۷	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۴۳
رویداد پایه	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
احتمال شکست	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۴	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۲	۰/۴۶	۰/۵	۰/۴۵	۰/۲۴	۰/۴	۰/۳
رویداد پایه	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶
احتمال شکست	۰/۳۴	۰/۴۳	۰/۶	۰/۶۸	۰/۴	۰/۱۴	۰/۵	۰/۴۶	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۵۵	۰/۴۵

جدول ۳. تخمین احتمال شکست رویداد رأس

شکست کمی	شکست کیفی	شکست اکولوژیکی	شکست اقتصادی	شکست اجتماعی
۰/۲۱۷	۰/۱۱۶	۰/۱۷۳	۰/۰۲۱	۰/۲۴۷
احتمال شکست رویداد رأس: ۰/۵۷				

اندازه‌گیری اهمیت رویدادهای پایه

برای رتبه‌بندی رویدادهای پایه و بررسی تأثیر هر یک از این رویدادها بر رویداد رأس از شاخص بیرنبام مطابق رابطهٔ ۳ استفاده شد. مطابق جدول ۴ رویدادهای پایه بر اساس بیشترین تأثیر در رویداد رأس طبق شاخص بیرنبام به صورت نزولی مرتب شده‌اند که هرچه مقدار شاخص بیرنبام زیاد باشد، رویداد پایه اهمیت یا اثر بیشتری در رویداد رأس خواهد داشت. مطابق جدول ۴، رویدادهای مؤثر در ریسک شکست حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه بر اساس شاخص بیرنبام، رویدادهای ۳۶، ۳۵، ۲۷، ۷، ۶ به‌ترتیب، «حکمرانی نامناسب»، «کم‌بودن سطح آگاهی حوضه‌نشینان»، «عدم رهاسازی حقابهٔ زیست‌محیطی»، «تلفات ناشی از انتقال آب و مصرف آبیاری» و «احداث بیش از حد سد» هستند. در ادامه، سهم هر یک از رویدادهای پایه در شکست رویدادهای فرعی «شکست کمی، کیفی، اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی» به طور جداگانه بررسی شد تا تأثیرگذارترین رویدادهای پایه بر رویداد فرعی مربوط به آن مشخص شود. به همین ترتیب، مقادیر BI مربوط به رویداد فرعی «شکست کمی» در جدول ۵ نشان داده شده است که رویداد «تلفات ناشی از انتقال آب و مصرف آبیاری» در حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه بیشترین سهم را در کمبود منابع آب داشته است. با توجه

Archive of SID

www.SID.ir

به روش آبیاری در این حوضه، تلفات ناشی از مصارف کشاورزی زیاد است و همه‌ساله حجم درخور توجهی از منابع آبی استفاده‌شده از طریق تبخیر در مزارع و همچنین به دلیل نشت از تأسیسات آب‌رسانی، ترکیدگی لوله و نبود بهره‌برداری صحیح از مخازن آب از دسترس خارج می‌شود. بنابراین، باید برای جلوگیری از این تلفات آب در صورت امکان راه‌کارهای مدیریت تقاضای آب کشاورزی در نظر گرفته شوند. نمایش نزولی و از چپ به راست شاخص بیرنبام در جدول ۶ نشان می‌دهد مؤثرترین رویدادهای مربوط به «شکست کیفی» بر اساس سهم هر یک در وقوع رویداد رأس به‌ترتیب «شوری در آب‌های زیرزمینی» «ورود فاضلاب کشاورزی به آب زیرزمینی» و «ورود فاضلاب صنعتی و خانگی به آب زیرزمینی» هستند.

وضعیت زیست‌محیطی دریاچهٔ ارومیه با تمام جوانب زمین‌شناسی، اقتصادی، اجتماعی، منابع آب، هوا، اقلیم و... آن در روال سالیان گذشته دستخوش تغییر شده و روند نزولی را طی کرده است. به طبع ادامهٔ پذیرش آثار منفی به تخریب اکوسیستم این حوضه منجر خواهد شد. در حال حاضر، بسیاری از کارکردهای اکولوژیکی و اقتصادی - اجتماعی دریاچهٔ ارومیه و تالاب‌های حاشیه‌ای آن مختل شده و خسارت محسوس و نامحسوس این اختلال نه‌تنها طبیعت منطقه، بلکه معیشت‌های محلی و جوامع انسانی را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد. بنابراین، برقراری برنامه‌ریزی اساسی و درازمدت برای حفظ تعادل اکولوژیکی حوضه امری اجتناب‌ناپذیر است. با توجه به رویدادهای نشان داده‌شده در جدول ۷، رویدادهای «عدم رهاسازی حقابهٔ زیست‌محیطی» و «فرسایش و رسوب» بیشترین سهم را در شکست اکولوژیکی دریاچهٔ ارومیه دارند؛ همچنین رویداد عدم رهاسازی حقابهٔ زیست‌محیطی سهم زیادی در وقوع ریسک کل حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه داشت. از این رو، تأمین‌نشدن نیاز زیست محیطی دریاچه موجب از بین رفتن گونه‌های مختلف و نادر ازجمله آرتمیا خواهد شد. «عدم تأمین منابع مالی» در برنامهٔ زمان‌بندی‌شده موجب تأخیر در اجرای پروژه‌های احیای دریاچهٔ ارومیه خواهد شد که عامل مهمی در به بهره‌برداری نرسیدن پروژه‌های احیای دریاچهٔ ارومیه خواهد بود. از این رو، با توجه به جدول ۸ «کمبود منابع مالی» که بر اساس شاخص BI بیشترین سهم را در وقوع شکست اقتصادی حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه دارند. فقدان جامعه‌نگری در برنامه‌ریزی منطقه‌ای و توسعهٔ بخش‌ها، نبود قوانین مدون در حوضه و نبود برنامهٔ آمایش سرزمین (به رغم وجود اسناد برنامه) و نیز نداشتن اطلاعات کافی حوضه‌نشینان از مهم‌ترین دلایل به‌وجودآمدن وضعیت فعلی است. از این رو، در جدول ۹ رویداد «حکمرانی نامناسب» و «کم‌بودن سطح آگاهی حوضه‌نشینان» به عنوان مؤثرترین رویداد در وقوع شکست اجتماعی حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه نشان داده شده است.

جدول ۴. رتبه‌بندی رویدادهای پایهٔ درخت خطای حوضه بر اساس شاخص BI

رویداد پایه	۳۳	۳۴	۳۲	۱۲	۱۳	۱۴	۳۱	۲۹	۲۰	۱۹	۲۱	۱۸
BI	/۰۰۴۳	/۰۰۴۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸	/۰۰۹۳	/۰۰۹۵	۰/۰۱۸	۰/۰۲۳	۰/۰۳۸	۰/۰۴۲	۰/۰۴۳	۰/۰۴۶
رویداد پایه	۸	۲۲	۱۰	۲۴	۱۷	۱۶	۱۱	۹	۳۰	۲۵	۲۳	۱۵
BI	۰/۰۵۳	۰/۰۵۵	۰/۰۵۸	۰/۰۵۹	۰/۰۶۲	۰/۰۶۲	۰/۰۶۳	۰/۰۶۴	۰/۰۶۵	۰/۰۶۷	۰/۰۶۹	۰/۰۷۴
رویداد پایه	۵	۴	۱	۲۶	۳	۲۸	۲	۶	۷	۲۷	۳۵	۳۶
BI	۰/۰۸۷	۰/۰۹۲	/۰۹۴۳	/۰۹۴۴	۰/۰۹۵	۰/۱۲۶	۰/۱۳۰	۰/۱۳۰	۰/۱۳۱	۰/۱۴۸	۰/۲۵۴	۰/۳۱۱

جدول ۵. رتبه‌بندی رویدادهای پایهٔ زیرشاخهٔ شکست کمی بر اساس شاخص BI

رویداد پایه	۸	۱۰	۱۱	۹	۵	۴	۱	۳	۲	۶	۷
BI	۰/۰۹۸	۰/۱۰۷	۰/۱۱۶	۰/۱۱۹	۰/۱۶۰	۰/۱۶۹	۰/۱۷۳	۰/۱۷۵	۰/۲۳۱	۰/۲۳۹	۰/۲۴۰

جدول ۶. رتبه‌بندی رویدادهای پایهٔ زیرشاخهٔ شکست کیفی بر اساس شاخص BI

رویداد پایه	۱۲	۱۳	۱۴	۲۰	۱۹	۲۱	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵
BI	۰/۰۱۹	۰/۰۲۱	۰/۰۲۳	۰/۰۸۰۲	۰/۰۸۷	۰/۰۸۹	۰/۰۹۵	۰/۱۵۵	۰/۱۵۵	۰/۱۸۲

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۷. رتبه‌بندی رویدادهای پایهٔ زیرشاخهٔ شکست اکولوژیکی بر اساس شاخص BI

رویداد پایه	۲۲	۲۴	۲۳	۲۵	۲۶	۲۸	۲۷
BI	۰/۱۰۶	۰/۱۱۶	۰/۱۳۵	۰/۱۵۸	۰/۱۸۳	۰/۲۵۱	۰/۲۸۸

جدول ۸. رتبه‌بندی رویدادهای پایهٔ زیرشاخهٔ شکست اقتصادی بر اساس شاخص BI

رویداد پایه	۳۴	۳۳	۳۲	۳۱	۲۹	۳۰
BI	۰/۰۰۹	۰/۰۱۰	۰/۰۱۲	۰/۰۴۲	۰/۰۵۳	۰/۱۵۱

جدول ۹. رتبه‌بندی رویدادهای پایهٔ زیرشاخهٔ شکست اجتماعی بر اساس شاخص BI

رویداد پایه	۳۵	۳۶
BI	۰/۴۵	۰/۵۵

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر برای نخستین‌بار ریسک کل منابع آب یک حوضهٔ آبریز با استفاده از روش تحلیل ریسک درخت خطا بررسی شد. رویداد نامطلوب، ریسک کل حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه در نظر گرفته شد. کلیهٔ عوامل منجر به شکست حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه بر اساس شاخص‌های ارائه‌شده توسط محققان مختلف و همچنین سازمان‌های معتبر در قالب ۳۶ رویداد پایه شناسایی شدند؛ که با بهره‌گیری از دیدگاه ها و تجربیات متخصصان طی پرسشنامه‌ای به هریک از این رویدادهای پایه احتمال وقوعی به صورت متغیر زبانی نسبت داده شد. مقادیر احتمالاتی برای هر رویداد پایه در بازهٔ صفر تا یک متناسب با هر متغیر زبانی انتخاب شد. بنابراین، با میانگین‌گیری از مقادیر به‌دست‌آمده از دیدگاه‌های ۲۰ کارشناس مقادیر احتمال وقوع هر رویداد پایه به نرم‌افزار OpenFTA وارد شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، احتمال شکست «ریسک کل حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه» ۵۷ درصد بود. با توجه به زیادبودن احتمال شکست رویداد رأس، به منظور مدیریت ریسک اهمیت رویدادهای پایه با استفاده از شاخص BI اندازه‌گیری شد. پس از رتبه‌بندی کلیهٔ رویدادهای پایه مشخص شد که رویدادهای «حکمرانی نامناسب»، «کم‌بودن سطح آگاهی حوضه‌نشینان» و «عدم رهاسازی حقابهٔ زیست‌محیطی» بیشترین سهم را در به‌خطرافتادن کل حوضهٔ ارومیه داشتند. در ضمن، از شاخص BI برای رتبه‌بندی رویدادهای فرعی نیز بهره گرفته شد. در بین پنج رویداد فرعی شکست کمی، کیفی، اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی، رویداد شکست اجتماعی به دلیل احتمال شکست زیادی که دارد، در شکست رویداد رأس مؤثرتر است. با توجه به اینکه کلیهٔ خطرات مربوط به حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه به صورت جامع و یکپارچه در درخت خطای ارائه‌شده مد نظر قرار گرفته است، ساختار درخت خطای حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه ارائه‌شده در پژوهش حاضر می‌تواند به‌عنوان یک معیار جامع برای دیگر حوضه‌های کشور با مقیاس‌های مختلف به کار گرفته شود تا وضعیت کلی حوضه ها مقایسه شوند. برای انجام تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود با توجه به اطلاعات درازمدت (۴۰ ساله) و کوتاه‌مدت (۱۰ ساله) از حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه با انجام محاسبات عددی برای هر یک از شاخص‌ها، نتایج به‌دست‌آمده با دیدگاه‌های کارشناسی در پژوهش حاضر مقایسه و سنجیده شود. در پژوهش‌های قبلی از رویکرد احتمالاتی درخت خطا برای دستیابی به یک شاخص جامع و یکپارچه که پوشش‌دهندهٔ عمدهٔ شاخص‌های کمیت و کیفیت آب، اکوسیستم جانداران آبزی و اقتصادی و اجتماعی در حوضه باشد، کاری انجام نشده است. همچنین، در تحقیقات پیشین ریسک‌پذیری حوضه‌های آبریز از روش‌های تجمیع وزنی و میانگین‌گیری برای بیان اهمیت و رتبه‌بندی شاخص‌ها استفاده شده است. در پژوهش حاضر با استفاده از روش تحلیل ریسک درخت خطا یک شاخص جامع برای پوشش کلیهٔ تهدیدهای حوضهٔ آبریز ارائه شد. شاخص جامع به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر می‌تواند برای بهبود وضعیت

Archive of SID

www.SID.ir

دیگر حوضه‌های آبریز کشور در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار گیرد. همچنین، پیشنهاد می‌شود موضوع عدم قطعیت‌های ناشی از قضاوت کارشناسان بر مبنای منطق فازی یا شبکهٔ بیزین در حوضه مدل شوند. با تبدیل درخت خطا به شبکهٔ بیزین، می‌توان از قابلیت‌های هر دو مدل در بحث روابط علت و معلولی و نیز امکان برقراری ارتباطات بین لایه‌های علت استفاده کرد. در نهایت، با کمی‌سازی رویدادهای پایه، اطلاعات و آمار دقیق از ریسک‌پذیری و اطمینان‌پذیری حوضهٔ آبریز به دست خواهد آمد.

قدردانی

به این وسیله از کارشناسان محترم شرکت مدیریت منابع ایران، وزارت نیرو و ستاد احیای دریاچهٔ ارومیه که در انجام پژوهش حاضر همکاری کردند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

منابع

[1]. 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.

[2]. Babel MS, Pandey VP, Rivas AA, Wahid SM. Indicator-based approach for asses sing the vulnerability of freshwater resources in the Bagmati River basin, Nepal. Environmental management. 2011; 48(5):1044-1059.

[3]. Lindhe A, Norberg T, Rosen L. Approximate dynamic fault tree calculations for modelling water supply risks. Reliability Engineering & System Safety. 2012; 106:61-71.

[4]. Wei N, Qiu YA, Gan HO, Niu CU, Liu JI, Gan YO, Zhou N. Water risk assessment for river basins in China based on WWF water risk assessment tools. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 2014; 364:299-304.

[5]. Gain AK, Giupponi C. A dynamic assessment of water scarcity risk in the Lower Brahmaputra River Basin: An integrated approach. Ecological indicators. 2015; 48:120-131.

[6]. 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.

[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]. 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.

[9]. Kabir S, Walker M, Papadopoulos Y, Rüde E, Securius P. Fuzzy temporal fault tree analysis of dynamic systems. International Journal of Approximate Reasoning. 2016; 77:20-37.

[10]. Oroojloo M, Hashemy S.M, Roozbahani A. Risk Assessment of main transmission line in Irrigation Networks with Application of Fuzzy Hierarchical method.. Journal of Water and Soil Conservation, 2017; 24(5):25-47.

[11]. Kabir S. An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis. Expert Systems with Applications. 2017; 77:114-135.

[12]. Asiabi Hir, R., Mostafazadeh, R., Raoof, M., Esmali Ouri, A. Multi-criteria evaluation of water poverty index spatial variations in some watersheds of Ardabil Province. Iranian journal of Ecohydrology, 2017; 4(4): 997-1009

[13]. Bao K, Liu JL, You XG, Shi X, Meng B. A new comprehensive ecological risk index for risk assessment on Luanhe River, China. Environmental geochemistry and health. 2017:1-14.

[14]. Babaei, M., roozbahani, A., Hashemy shahdany, S. Risk Assessment of Agricultural Water Conveyance and Delivery Systems by Fault Tree Analysis Method for West Dez Main Irrigation Canal. Journal of Water Research in Agriculture. 2018; 31(4): 655-668. [Persian]

[15]. Iranian Society of Consulting Engineers, Sustainability evaluation of development process and consequences of it in Urmia Lake. 2011 Autumn, 62 pp. [Persian]

[16]. Urmia Lake Restoration Program, Investigating and analyzing of the economic and social status in Urmia Lake Basin. 2017 Jan, 83 pp. [Persian]

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

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

Archive of SID

www.SID.ir