مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۱-۳۵، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۶۷-۷۴

Original Article

مدل‌سازی پایداری حوضه‌ی دریاچه‌ی ارومیه با استفاده از شبکه‌های بیزی پویا

وحید خداکرمی * **(استادیار)**
مونا شیرازی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

تراز دریاچه‌ی ارومیه طی چند دهه‌ی اخیر به دلیل توسعه‌ی ناپایدار و برداشت‌های بی‌رویه از منابع آبی و همچنین گرم شدن دما و بروز خشک‌سالی کاهش چشمگیری داشته است. این مقاله به ارائه‌ی مدلی برای ارزیابی پایداری دریاچه‌ی ارومیه با استفاده از شبکه‌ی بیزی می‌پردازد. ابتدا مدلی پایه به منظور در نظرگرفتن عوامل مختلف تأثیرگذار در تراز آبی ارائه می‌شود. به منظور اطمینان از قابل قبول بودن صحت مدل، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های موجود مقایسه شده است. سپس تجزیه‌وتحلیل حساسیت انجام می‌شود. قابلیت‌های مدل در پیش‌بینی حجم آب دریاچه طی اعمال سیاست‌های احیا با استفاده از سناریوهای مختلف تحلیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با اعمال سیاست‌های تأمین منابع آب اضافی در یک بازه‌ی زمانی ۱۰ ساله تراز آب دریاچه می‌تواند به سطح پایداری برسد. اما در صورت ادامه‌ی شرایط خشک‌سالی، پایداری دریاچه به شدت در خطر است.

واژگان کلیدی: مدیریت پایداری، حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه، شبکه‌های بیزی.

v.khodakarami@basu.ac.ir
momashkh@gmail.com

۱. مقدمه

مدیران و تصمیم‌گیرندگان برای درک کارآمدی تصمیمات مختلف به مدل‌سازی نیاز دارند. مدل‌ها باید دارای انعطاف پذیری باشند؛ زیرا مفاهیمی که در مدل‌ها به کار می‌رود متفاوت است. حتی اگر مخاطرات زیست محیطی کاملاً مشابه تکرار شود، باز هم مدیران و تصمیم‌گیرندگان با شرایط متفاوتی روبه‌رو خواهند شد به این علت که اهداف، اولویت‌ها، نقش ذی‌نفعان مختلف و دسترسی به اطلاعات درباره‌ی زیست‌بوم‌ها و منابع منحصربه‌فرد است. تصمیم‌گیری در حوزه‌های مختلف مدیریت محیط‌زیست دارای عدم قطعیت[۱]، عدم درک کامل سیستم و پیچیدگی است. نبود داده‌های کافی از جمله دیگر مشکلات مدل‌سازی این زیست‌بوم‌هاست. در چنین موارد تصمیم‌گیری، نمی‌توان منتظر درک قطعی از فرایند سیستم‌های فعلی و آینده بود و نیاز به رویکرد بر پایه‌ی عدم قطعیت خواهد بود. روش‌های مدل‌سازی بیزی به عنوان ابزار پشتیبانی از تصمیم‌گیری کاربرد فراوانی در این حوزه دارند و کاربرد آنها در طول دو دهه اخیر رشد فزاینده‌یی در حوزه‌ی محیط‌زیست داشته است.[۱] استفاده از شبکه‌های بیزی[۲] در مدل‌سازی محیط‌زیست و مسائل مدیریت منابع آب در اوایل دهه‌ی ۱۹۹۰ توسط محققان ذیربط[۲و۳] آغاز شد. تعدادی از مقالات که در حوزه‌ی محیط‌زیست و استفاده از شبکه‌های بیزی مورد استفاده قرار گرفته است، به قرار زیر می‌باشد: بارتون و همکارانش یک مقاله‌ی مروری درباره‌ی مدیریت منابع و محیط‌زیست با استفاده از شبکه‌ی بیزی ارائه کردند و هدف آنان بررسی مسائل و مشکلات مدیریتی در محیط‌زیست بوده است.[۴] همچنین لندرویت و همکارانش در یک مقاله‌ی مروری به استفاده از شبکه‌های بیزی در خدمات زیست‌بوم پرداختند.[۵] لانینی و همکارانش در یک مطالعه‌ی موردی در دره‌ی هالت فرانسه به ارزیابی اثرات مدیریت آب با استفاده از شبکه‌های بیزی پرداختند.[۶] کشتکار و همکارانش مدل شبکه‌ی بیزی برای ارزیابی پایداری کیفیت آب در منطقه‌ی نیمه‌خشک را ارائه کردند.[۷] پالینو و همکارانش از شبکه‌های بیزی برای بررسی جریانات زیست‌محیطی و خدمات زیست‌بوم در حوضه‌ی موری دارلینگ[۳] استرالیا استفاده کردند.[۸] مهاجرانی و همکارانش با استفاده از شبکه‌ی بیزی به مدیریت کمّی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی پرداخته‌اند.[۹] مقاله‌یی با عنوان رویکرد بیزی به سمت تسهیل تحقیقات در انطباق تغییرات آب‌وهوایی در بخش کشاورزی جنوب آفریقا ارائه شده است. این تحقیق به بررسی حساسیت[۴] بخش کشاورزی به تغییرات آب‌وهوایی و تأثیر آن در دسترسی به منابع آبی و ارزیابی فعل و انفعالات پیچیده بین انسان و طبیعت می‌پردازد.[۱۰]

اخیرا در مقاله‌یی اسپرتو و همکاران[۱۱] به مرور کاربردهای شبکه‌های بیزی به عنوان ابزاری جامع در مواجهه با عدم قطعیت و پیچیدگی‌های مدیریت محیط زیست و بحث در مورد قابلیت‌ها و همچنین محدودیت‌های این ابزار پرداختند. از نظر آنها این ابزار ضمن داشتن قابلیت‌های متعدد شامل امکان در نظرگرفتن هم‌زمان چندین عامل در یک چارچوب، انعطاف‌پذیری در مواجهه با عدم قطعیت و امکان تحلیل سناریو دارای دو محدودیت اصلی نیز هست. اولی در نظر نگرفتن پویایی زمانی و مکانی و دومی مشکل اعتبارسنجی کمّی این نوع مدل‌هاست.

مقاله‌ی حاضر سعی دارد تا با استفاده از شبکه‌های بیزی پویا (DBN) [۵] به

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۶/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۲/۹، پذیرش ۱۳۹۶/۱۲/۲۳.
DOI:10.24200/J65.2019.7249.1776

توسعه‌ی مدل‌سازی عوامل مؤثر در عدم قطعیت با در نظر گرفتن دوره‌های زمانی و ارائه‌ی کاربردی از آن در مدل‌سازی پایداری دریاچه‌ی ارومیه بپردازد.

دریاچه‌ی ارومیه جزو زیست‌بوم‌های کاملاً منحصربه‌فرد در جهان است که حفظ و حراست از آن یکی از وظایف مهم ملی و بین‌المللی است. متأسفانه در سال‌های اخیر به علت مشکلات مختلف و پیچیده، تراز آب[۶] دریاچه به شدت کاهش‌یافته و ادامه‌ی حیات دریاچه به خطر افتاده است. مجموعه‌ی عوامل انسانی و طبیعی مختلف مانند اجرای طرح‌های متعدد توسعه‌ی منابع آب، توسعه‌ی روز افزون بخش کشاورزی، تغییر الگوی کشت و تولید محصولات پرآب در سطح حوضه، بهره‌وری پایین مصرف آب و عدم حفاظت مؤثر از منابع زیست‌محیطی حوضه و از طرف دیگر نوسانات اقلیمی و کاهش میزان بارش‌ها و رواناب‌ها در سطح حوضه چنین شرایطی را برای پهناورترین دریاچه‌ی داخلی ایران به همراه داشته است. به عبارت بهتر عدم جریان آب کافی به دریاچه در سالیان اخیر منجر به تشدید روند کاهش تراز دریاچه و کاهش سطح و حجم آن شده است. پژوهش‌های بسیاری در رابطه با مسائل و مشکلات دریاچه‌ی ارومیه صورت گرفته است و از روش‌هایی برای مدل‌سازی این حوضه‌ی آبی استفاده شده است که می‌توان به پژوهش‌های زیر اشاره کرد: طالب‌زاده و همکاران در پژوهشی به تجزیه‌وتحلیل عدم قطعیت برای پیش‌بینی نوسانات سطح دریاچه با استفاده از مدل‌های ANN [۷] و ANFI [۸] پرداختند.[۱۲] مقاله‌ی حسن‌زاده و همکاران که در راستای تعیین عوامل اصلی در کاهش سطح دریاچه است، از روش پویاشناسی سیستم استفاده کردند.[۱۳] مسئله‌ی دریاچه‌ی ارومیه به عنوان یک حوضه‌ی آبی دارای عدم قطعیت در متغیرهای تأثیرگذار و پیچیدگی بالا در روابط متقابل بین زیرسیستم‌هاست. در نتیجه با توجه به مزیت‌ها و برتری‌های روش مدل‌سازی بیزی می‌توان از این ابزار برای مدل‌سازی پایداری دریاچه ارومیه استفاده کرد.

۲. پایداری[۹]

دریاچه‌ها بخش مهمی از منابع آبی در جهان هستند. اما اغلب با نگاه به پیشینه‌ی دریاچه‌ها به وجود مشکلات و مسائل زیست‌محیطی زیادی پی خواهیم برد که در حال حاضر نگهداری و حفظ آن‌ها را منوط بر برنامه‌ریزی مدیران و دانشمندان این حوضه کرده است. دریاچه‌ها دارای اهمیت زیادی از لحاظ مزایای فیزیکی، زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی هستند. از لحاظ فیزیکی، آنها مخازن ذخیره‌سازی آب و محل تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی‌اند؛ از لحاظ محیط‌زیست آن‌ها حافظ گستره‌ی وسیعی از اشکال زیستی (پرندگان مهاجر، پستانداران، ماهی‌ها، دوزیستان، خزندگان و بسیاری از گونه‌های گیاهی) هستند؛ از لحاظ اقتصادی آن‌ها طیف گسترده‌یی از محصولات ارزشمند را ارائه می‌کنند؛ از لحاظ اجتماعی تعداد زیادی از افراد برای حفظ امرار معاش از آنها استفاده می‌کنند؛ اما با وجود اقدامات مهم صورت گرفته بسیاری از این دریاچه‌ها تحت تنش شدید و در حال تبدیل شدن به محیط مرده هستند.[۱۴] رابرت گودلند معنای پایداری محیط‌زیست به عنوان نگهداری از سرمایه‌های طبیعی را یک مفهوم جدا، اما متصل به پایداری اجتماعی و اقتصادی بیان می‌کند.[۱۵]

اولین بار هلینگ[۱۶] روشی جدید برای مدل‌سازی زیست‌بوم شناختی پیشنهاد کرد که پویایی و پیچیدگی در مسئله‌ی پایداری را در نظر می‌گرفت. این روش بر تجمیع، کل‌نگری و عدم قطعیت به عنوان عناصر کلیدی برای مدیریت مؤثر زیست‌بوم‌های پیچیده تأکید داشت. در دهه‌های اخیر کاربردهای این روش در حوزه‌های مختلف پایداری منابع طبیعی از جمله مراتع[۱۷] ، جنگل‌داری[۱۸]، تالاب[۱۹] و دریاچه[۲۰] مورد مطالعه قرارگرفته است. در هندوستان[۲۱] و چین[۲۲] مطالعاتی در مورد بررسی عوامل مؤثر بر پایداری دریاچه‌های در معرض خطر انجام شده است.

یکی از جنبه‌های مطالعات پایداری بررسی ظرفیت تحمل زیست‌بوم در مقابل اختلالات است. انعطاف‌پذیری[۱۰] به معنی قابلیت جذب و تطابق با اختلالات و تغییرات با مقیاس کم است. ایده‌ها و تحقیقات متعددی صرف ترکیب مفهوم انعطاف‌پذیری در مطالعات پایداری زیست‌بوم‌ها شده است.[۲۳ و ۲۴]

نقاط آستانه[۱۱] نشان دهنده‌ی بیشینه‌ی ظرفیت تحمل زیست‌بوم و حد انعطاف‌پذیری آن است که عبور از آن به فروپاشی فاجعه‌بار و در بعضی مواقع غیرقابل برگشت زیست‌بوم و به دنبال آن به تبعات اقتصادی و اجتماعی جبران‌ناپذیر منجر خواهد شد. تراز آب دریاچه‌های در خطر شاخص مناسبی برای سنجش انعطاف‌پذیری آنها در مقابله با تغییرات اقلیمی و همچنین عوارض ناشی از دخالت انسان است.

در این مقاله به ارزیابی و سنجش عوامل تأثیرگذار بر تراز آب دریاچه‌ی ارومیه با هدف حفظ انعطاف‌پذیری و دست‌یابی به پایداری زیست‌بوم شناختی آن می‌پردازیم. بر اساس مطالعات انجام شده طی دهه‌ی اخیر، مادامی‌که سطح آب دریاچه بالاتر از تراز ۱۲۷۴،۱ متر از سطح دریاهای آزاد در نوسان باشد دریاچه پایدار خواهد بود و به عملکرد عادی زیست‌بوم شناختی خود برای حفظ تنوع زیستی و تولید آرتیمیا (گونه‌ی جانوری نادر دریاچه) ادامه خواهد داد. افت تراز آب دریاچه از میزان مذکور اثری منفی بر کارکردهای زیست‌بوم شناختی دریاچه خواهد گذاشت.[۲۵]

۳. شبکه‌های بیزی

شبکه‌های بیزی روش‌های مدل‌سازی قدرتمندی هستند که ویژگی‌های اساسی از استدلال‌های محتمل (استدلال در شرایط عدم اطمینان) را از طریق ریاضیات و روش‌های کارآمد تکرار می‌کنند. آنها اولین بار از طریق روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین ارائه شدند.[۲۶] شبکه‌های بیزین، ساختارهایی گرافیکی برای نمایش روابط احتمالی میان تعداد زیادی متغیر و انجام استنباط احتمالی با آن متغیرها هستند.[۲۷] شبکه‌های بیزی گراف‌های بدون چرخه‌ی جهت‌دار(DAG) [۱۲] هستند، که گره‌های آنها در مفهوم قاعده‌ی بیز نشان دهنده‌ی متغیرهاست. این گره‌ها می‌توانند مقادیر قابل مشاهده، متغیرهای پنهان، پارامتر یا فرض‌های نامعلوم باشند. یال‌های این شبکه بیان‌گر وابستگی‌های شرطی هستند. هر گره دارای یک تابع احتمال است که شامل احتمال اولیه[۱۳] (برای گره‌های بدون والدین) یا احتمالات شرطی[۱۴] مربوط به حالات مختلف گره‌های والدین است.[۲۸] این روش بر مبنای محاسبات احتمالات شرطی است. رابطه‌ی ۱، قضیه‌ی بیز را نشان می‌دهد.

$$P(a/b) = \frac{P(b/a) \times P(a)}{P(b)} \qquad (۱)$$

که در آن $P(a)$، احتمال وقوع پیشامد a، $P(b)$ احتمال وقوع پیشامد b، $P(b/a)$ احتمال شرطی پیشامد b است. $P(a/b)$ احتمال شرطی پیشامد a است. در حالی که BN یک مدل ایستا و ارائه‌یی از توزیع احتمال مشترک در یک نقطه‌ی زمانی ثابت است. یک شبکه‌ی بیزی پویا می‌تواند تکاملی از یک سیستم در طول زمان را ارائه کند. به طور خاص، DBN برای نمایش متغیرها در زمان‌های متغیر در ساختار همان شبکه ارائه می‌شوند. یکی از محبوب‌ترین روش‌ها برای مدل‌سازی زمان در BN است.[۱۸] نرم‌افزارهای متعددی برای ساخت شبکه‌های بیزی و همچنین

شکل ۱. موقعیت دریاچه‌ی ارومیه روی نقشه ایران.

انجام استنتاج احتمالات بین متغیرهای شبکه در دسترس‌اند. در این تحقیق از نرم‌افزار Agena Risk [15] استفاده شده است.

۴. منطقه‌ی مورد مطالعه

حوضه‌ی آبریز دریاچه ارومیه[16] با وسعت تقریبی ۵۲۰۰۰ کیلومترمربع در ناحیه‌ی کوهستانی شمال غربی ایران و بین استان‌های آذربایجان غربی، شرقی و کردستان واقع شده است (شکل ۱). این دریاچه در میان یک حوضه‌ی آبریز بسته واقع شده است و کلیه‌ی آب‌های سطحی و زیرزمینی از مناطق پیرامون به سمت دریاچه سرازیر می‌شوند. موقعیت خاص حوضه از لحاظ زمین‌شناسی، میزان تبخیر بالا و تجمع مداوم املاح در آن منجر شده و دریاچه به یک پهنه‌ی آبی فوق‌العاده شور تبدیل شده است. این دریاچه توسط تعدادی تالاب اقماری آب شیرین احاطه شده که مجموعه‌ی این تالاب‌ها یک منطقه‌ی مهم زیست‌بومی در اطراف دریاچه به وجود آورده است. این حوضه‌ی آبریز در ارتفاعی بین ۱۲۸۰ تا ۳۶۰۰ متر بالاتر از سطح دریا قرار گرفته است که پست‌ترین نقطه‌ی آن دریاچه ارومیه و دشت‌های وسیع اطراف آن است.[۲۳]

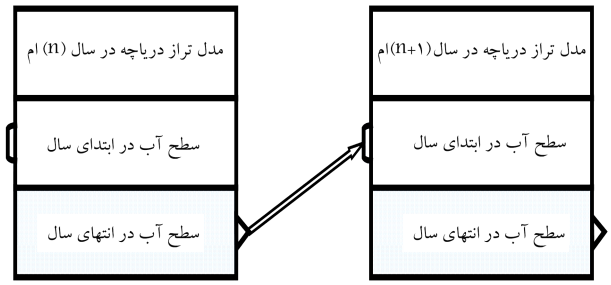
عوامل مؤثر در ایجاد خشک‌سالی و نابودی زیست‌بوم دریاچه را می‌توان به‌صورت زیر تقسیم کرد:

عوامل طبیعی: مانند کاهش نزولات جوّی، افزایش دما. مهم‌ترین عامل طبیعی را می‌توان همان تغییر اقلیم منطقه دانست.

عوامل انسانی: مانند افزایش جمعیت و در پی آن برداشت بیش از حد مجاز از آب رودخانه‌ها برای بخش کشاورزی و همچنین برداشت غیرمجاز از آب‌های زیرزمینی از طریق حفر چاه‌های متعدد، احداث بزرگراه شهید کلانتری بر روی دریاچه، احداث سدهای متعدد.

۵. ساختار مدل

مدل شبکه‌ی بیزی در این مسئله به منظور بررسی نتایج حاصل از اقدامات مدیریتی و سیاست‌های اعمالی در حفظ و نگهداری حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه ارائه شده است. در مرحله‌ی اول از ساخت مدل، سوابق و اطلاعات گذشته و همچنین اقدامات انجام شده‌ی مرتبط و پیامدهای آن‌ها بررسی شده است. سپس مقالات



شکل ۲. ساختار پویای شبکه بیزی در دو سال آبی متوالی.

و منابع موجود در ادبیات برای درک بهتر مسئله و شناخت متغیرها و روابط بین آنها مورد مطالعه قرارگرفت. پس از مشخص کردن متغیرهای تأثیرگذار و روابط آنها شبکه ترسیم خواهد شد. پس از ترسیم شبکه نیازمند اطلاعات و داده‌ها برای پرکردن جدول احتمال شرطی (CPT) [17] خواهیم بود. در این پژوهش با استفاده از ترکیبی از داده‌های کمّی و کیفی مدل تکمیل شده است. داده‌های کمّی با تجزیه‌وتحلیل داده‌های گذشته ایجاد شده است و داده‌های کیفی با بهره‌گیری از نظرات کارشناسان استخراج شده است. در تلاش برای مدل‌سازی پایداری دریاچه‌ی ارومیه مهم‌ترین متغیر قابل‌اندازه‌گیری حجم (تراز) آب است. این متغیر ضمن این‌که تحت تأثیر عوامل مختلف و غیرقطعی است، در دوره‌های زمانی مختلف تغییر می‌کند و پویاست؛ با ایجاد پیوند بین سال‌های آبی متفاوت یک مدل پویا برای بررسی روند تغییرات حجم آب در چند دوره ایجاد می‌شود. همان طورکه در شکل ۲ نمایش داده شده است حجم آب اولیه به عنوان گره ورودی و حجم نهایی آب به عنوان گره خروجی تعریف می‌شود. حجم نهایی آب در یک سال آبی به عنوان ورودی اولیه‌ی آب در سال آینده در نظرگرفته می‌شود؛ این روند ادامه می‌یابد تا میزان حجم آب در سال آبی مورد نظر به دست آید؛ بنابراین، ابتدا یک مدل پایه ارائه می‌شود که به تخمین حجم آب دریاچه با توجه به عوامل ورودی و خروجی در هر دوره می‌پردازد. سپس مدل پویا از اتصال دوره‌های متوالی به هم ایجاد می‌شود که امکان بررسی دوره‌های زمانی چندساله را ایجاد می‌کند. بدین‌ترتیب سیاست‌های شناسایی شده برای احیای دریاچه از جمله افزایش در میزان آب ورودی و کاهش برداشت بخش کشاورزی بررسی می‌شود و به پیش‌بینی تغییرات حجم آب دریاچه و رسیدن به سطح زیست‌بوم شناختی برای داشتن یک زیست‌بوم پایدار در دوره‌ی ۱۰ ساله پرداخته می‌شود.

۱.۵. مدل شبکه‌ی تغییرات حجم آب دریاچه‌ی ارومیه

معادله‌ی کلی برای تخمین حجم آب در هر سال به صورت رابطه‌ی ۲ است:

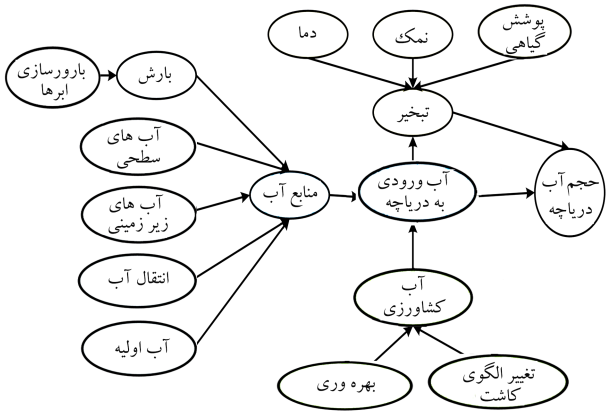
$$I - O = \Delta S \qquad (۲)$$

I: کل جریان ورودی به دریاچه (بارش، جریان ورودی از رودخانه و جریان ورودی از آب‌های زیرزمینی)

O: کل جریان خروجی (تبخیر از سطح دریاچه)

ΔS: تغییرات در میزان ذخیره‌ی آب است.

شکل ۳ مدل شبکه‌ی بیزی تغییرات حجم آب را نشان می‌دهد. این مدل میزان حجم آب در یک سال آبی را با توجه به عوامل تأثیرگذار ورودی و خروجی نشان می‌دهد. برای بررسی تغییرات حجم آب در چندین دوره، نیازمند یک مدل پویا خواهیم بود. گره منابع آبی تعریف شده در مدل از مجموع آب‌های



شکل ۳. ساختار شبکه‌ی بیزی تغییرات حجم آب دریاچه‌ی ارومیه.

سطحی، آب‌های زیرزمینی و بارش مستقیم بر سطح دریاچه به دست می‌آید. گره بارورسازی یک سیاست بهبودی و تأثیرگذار در افزایش بارندگی است. در مدل پیش‌بینی حجم آب دریاچه، آب انتقالی از دیگر منابع و آب انتقالی از پشت سد نیز به آن اضافه می‌شود. گره «منابع آب» برآوردی از جمع منابع ورود آب به دریاچه است. تعداد حالات آن به صورت بازه‌های پیوسته است که از طریق بررسی داده‌های گذشته بیشینه و کمینه‌ی حجم آب منابع در دسترس به دست آمده است. جدول احتمالات شرطی با استفاده از روش فرمول نویسی در نرم‌افزار ایجاد شده است. همان طور که در معادله‌ی ۳ نشان داده شده است گره منابع آبی حاصل جمع کلیه‌ی منابع آبی ورودی به دریاچه است.

$$water\ resource = Initial\ water + rainfull + surface\ runoff\ groundwater + transfer\ water + releasing\ water \quad (۳)$$

بخش کشاورزی در این مدل یک عامل کاهنده در میزان آب ورودی در دریاچه در نظر گرفته شده است که تحت تأثیر میزان بازده آبیاری و تغییرات در الگوی کشت است. با افزایش بازده آبیاری از میزان هدر رفت در بخش آب کشاورزی کاسته شده و سهم ورودی آب به دریاچه افزایش می‌یابد. با توجه به افزایش زمین‌های کشاورزی و تغییر الگوی کشت به سمت کشت آبی و کاهش کشت دیم میزان مصرف آب افزایش می‌یابد که با تغییرات در این الگو می‌توان از مصرف آب در این حوضه کاست. جدول احتمال شرطی آن بر اساس حالات مختلف تغییر الگوی کشت و بازده آبیاری پر شده است. پس از آن میزان آب ورودی به دریاچه از اختلاف منابع آبی موجود و میزان مصرف بخش کشاورزی به دست آمده است. این گره نیز مانند گره منابع آبی از معادله‌ی ۴ برای ایجاد جدول احتمال شرطی استفاده می‌کند.

$$water\ entering\ the\ lake = Max(۰, water\ resource\ agricaltural\ water) \quad (۴)$$

گره تبخیر در شبکه‌ی ارائه شده تحت تأثیر شوری آب، دمای هوا و پوشش گیاهی تعریف می‌شود. با توجه به سه حالت میزان تبخیر بر اساس ضریبی از حجم آب ورودی به دریاچه است. برای مثال در صورتی که دما و شوری آب پایین باشد و پوشش گیاهی مناسب نباشد و حجم آب ورودی بین بازه ۸۰۰۰-۵۰۰۰ باشد، میزان تبخیر برابر با ۶۸ درصد از آب ورودی خواهد بود. در آخر حجم نهایی آب دریاچه طبق معادله‌ی ۵ از اختلاف آب ورودی به دریاچه و میزان تبخیر به دست می‌آید.

$$the\ volume\ of\ lake = Max(۰, waterentering\ the\ lake - evaporation) \quad (۵)$$

این مدل بدون اعمال سیاست‌های بیان شده برای مشخص کردن تغییرات حجم در سال‌های گذشته استفاده می‌شود. پس از مقایسه با داده‌های واقعی و اطمینان ازکارکرد صحیح مدل با اعمال سیاست‌ها به پیش‌بینی حجم آب پرداخته می‌شود.

۶. اعتبارسنجی[۱۸] مدل

همان طورکه قبلاً اشاره شد برای اطمینان ازکارکرد صحیح مدل نیاز به اعتبارسنجی است. اعتبارسنجی حجم آب در سال‌های آبی ۱۳۸۹ - ۱۳۸۵ با میزان حجم به دست آمده از طریق مدل مقایسه می‌شود. طریقه‌ی محاسبه‌ی میزان حجم آب توسط مدل به این صورت است که داده‌های موجود در سال ۱۳۸۴ در رابطه با بارندگی، آب‌های سطحی، دما، شوری و . . . در مدل پایه‌ی مربوط به سال ۱۳۸۵ وارد می‌شود و پس از اجرای مدل میزان حجم آب در سال ۱۳۸۵ به دست می‌آید و با ایجاد ارتباط بین حجم آب اولیه و حجم نهایی آب در مدل، به همین ترتیب میزان حجم آب در سال‌های آتی به دست خواهد آمد. در راستای ارزیابی عملکرد مدل از شاخص‌های ارزیابی ضریب تعیین (R^2)[۱۹] و روش مجذور حداقل مربعات (RMSE)[۲۰] برای مقایسه‌ی سطح آب مشاهده شده و سطح آب شبیه‌سازی شده استفاده می‌شود. رابطه‌های ۶ و ۷ برای اعتبارسنجی در دیگر پژوهش‌ها به کار رفته‌اند.[۹]

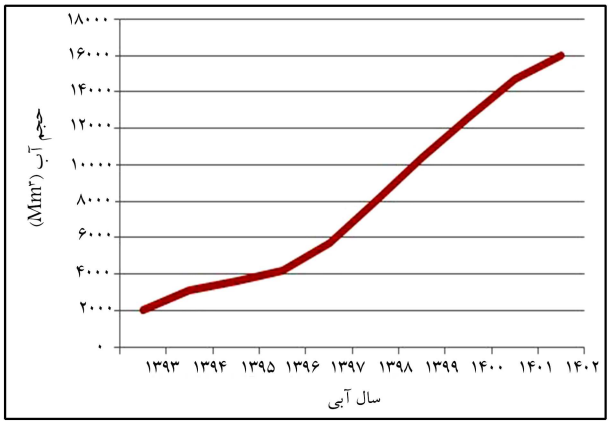
$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - \bar{Q})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - \bar{Q})^2 \sum_{i=1}^{n}(S_i - \bar{S})^2}} \right)^2 \quad (۶)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - Q_i)^2}{N}} \quad (۷)$$

که در آن S_i حجم آب شبیه‌سازی شده در دوره‌ی iام، $\overline{S}$ میانگین حجم آب شبیه‌سازی شده، Q_i مقادیر واقعی حجم آب در دوره‌ی iام، $\overline{Q}$ میانگین واقعی مقادیر حجم آب و N تعداد دوره‌ی شبیه‌سازی است.

پس از محاسبه با استفاده از معادلات، میزان ضریب تعیین ۴/۹۷٪ مجذور حداقل مربعات ۰/۵۱ به دست آمد که نشان دهنده‌ی تطبیق قابل قبول مدل با سیستم واقعی است.

با توجه به وضعیت کنونی دریاچه، رویکرد اصلی در برنامه‌ی احیای دریاچه‌ی ارومیه تثبیت شرایط کنونی و حفظ پیکره‌ی آبی در چند سال اول و جلوگیری از خشک شدن کامل دریاچه است. افزایش ورودی طبیعی رودخانه‌ها، انتقال پساب تصفیه‌خانه‌های شهرهای اطراف، انتقال آب به پیکره (کاهش تلفات)، انتقال آب از سیلوه و زاب و صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی حوضه‌ی آبریز و همچنین رهاسازی آب از سد به عنوان منابع تأمین آب اضافی برای احیای دریاچه در نظر گرفته شده است. پیش‌بینی شده است که با اعمال این سیاست‌ها در یک بازه‌ی زمانی ۱۰ ساله تراز آب دریاچه‌ی ارومیه به ۱۲۷۴/۱ متر یا همان تراز زیستی خواهد رسید؛ اما با توجه به این‌که هر راهبرد با خطر مواجهه با مشکلات پیش‌بینی نشده روبروست، لازم است که این‌گونه عدم قطعیت‌ها در نظرگرفته شوند و ریسک راهبرد تدوین شده به دقت محاسبه شود.



شکل ۴. تغییرات حجم آب بعد از اعمال سیاست‌ها.

ایجاد پایداری در وضعیت مدیریت منابع و مصارف آب در سطح حوضه‌ی دریاچه‌ی ارومیه، تنها راهکار حفظ بلندمدت دریاچه و احیای آن است. پس تمرکز بر کاهش مصارف آبی در سطح حوضه به‌ویژه در بخش کشاورزی از طریق اتخاذ راهکارهای مناسب و انجام سرمایه‌گذاری‌های لازم و توسعه‌ی فنّاوری از رویکردهای اصلی احیای دریاچه ارومیه است.

مدل ارائه شده در این مقاله ضمن مشخص کردن چگونگی روند احیا پیش‌بینی و تجزیه و تحلیل دقیق‌تری را در اختیار مدیران قرار می‌دهد. با توجه به مدل می‌توان نقاط ضعف و قوت تصمیمات را مشخص کرد و در صورت هرگونه رویداد (تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی) در طول اجرای برنامه، با تصمیمات جدیدتر بهترین و مقرون به‌صرفه‌ترین اقدامات مدیریتی را اعمال کرد.

پس از اجرای مدل پیش‌بینی، میزان حجم آب MCM [21] ۱۶۰۰۰ به دست آمد که نشان دهنده‌ی آن است که سیاست‌های اعمالی موفق بوده است و دریاچه تا پایان برنامه‌ی احیا به حجم زیست‌بوم شناختی خواهد رسید. شکل ۴ روند احیای دریاچه را طی سال‌های آتی نشان می‌دهد.

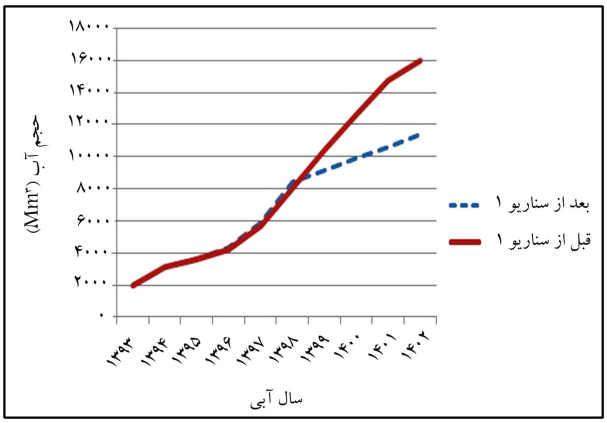
۷. تحلیل مدل

نتایج این مدل با استفاده از قابلیت پیش‌بینی، قابلیت تشخیص[22] و تجزیه و تحلیل سناریوها برای کمک کردن و جهت دادن به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و همچنین بررسی اثرات تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مختلف بررسی می‌شود. در قسمت قبل قابلیت پیش‌بینی مدل با بیان مثالی از احیای دریاچه و تغییرات حجم آب در دوره‌ی ۱۰ ساله بیان شد. در این قسمت به بررسی سناریوهای محتمل مسئله خواهیم پرداخت.

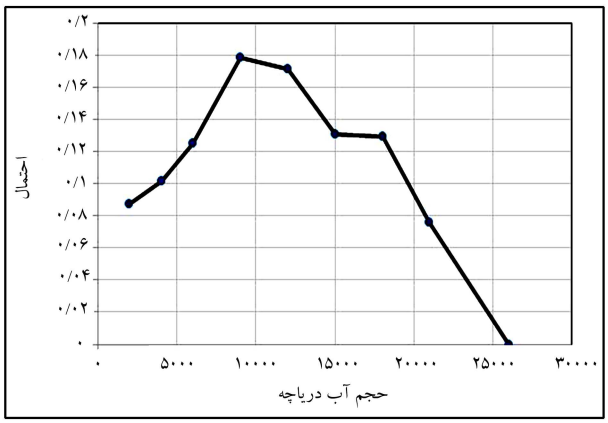
یکی از ویژگی‌های مهم شبکه‌های بیزی امکان انجام تحلیل حساسیت متغیرهای مختلف بر روی یکدیگر در قالب تحلیل‌های «چه می‌شود اگر؟» [23] است. میزان تبخیر و رواناب‌های سطحی دارای عدم قطعیت است و در صورت عدم تخمین صحیح می‌تواند برنامه‌ی احیا و نجات دریاچه ارومیه را با مخاطره روبه‌رو کند. در همین راستا در ادامه سعی می‌شود تا با طراحی و اجرای سناریوهای مدیریتی تصمیمات مناسبی را درباره‌ی پیش‌بینی تغییرات حجم تحت تأثیر این عوامل اتخاذ نمود. در ادامه به عنوان نمونه سه سناریو مورد بررسی قرار می گیرد.

سناریوی اول: وقوع خشک‌سالی و افزایش تبخیر

در تحلیل حساسیت، تبخیر جزو مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در حجم آب دریاچه



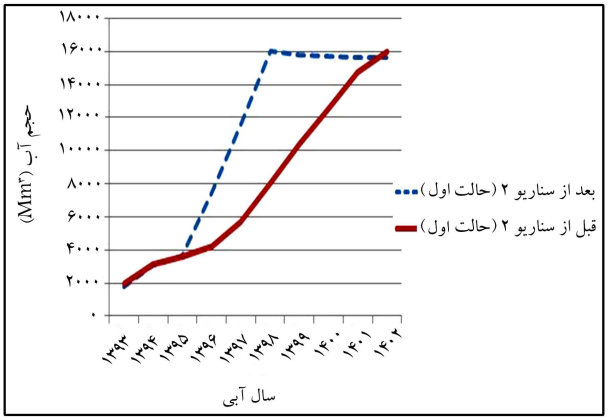
شکل ۵. تغییرات حجم آب بعد از اعمال سناریوی خشک‌سالی.



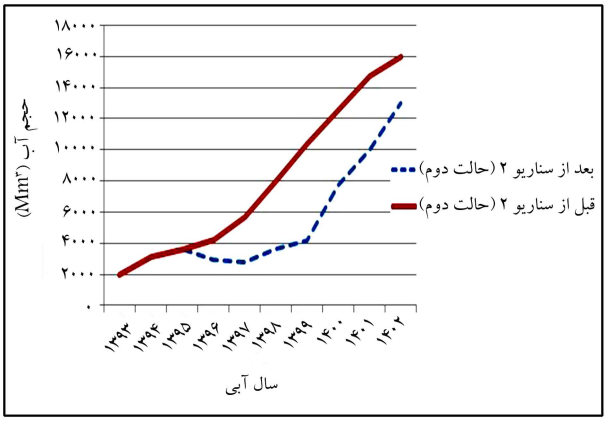
شکل ۶. گراف احتمال تغییرات حجم در سال ۱۳۹۹.

قلمداد می‌شود. ولی میزان تبخیر به دلایل مختلف از جمله تغییرات اقلیمی و عوامل انسانی متغیر است.

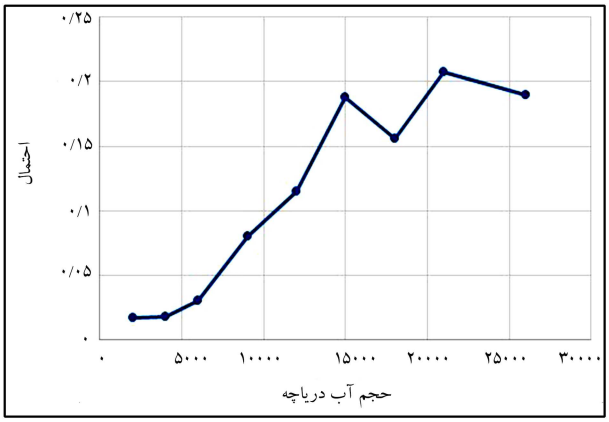
در صورت رخداد پدیده‌ی خشک‌سالی، دمای هوا و نمک و پوشش گیاهی دستخوش تغییر می‌شوند. شبیه‌سازی این سناریو با اعمال تغییرات در حالت‌های گره‌های مربوطه (از طریق ورود مشاهده[24] در مقادیر آن‌ها) و اجرای مجدد مدل انجام می‌شود. در شکل ۵ تغییرات حجم قبل از اعمال سناریو و بعد از سناریو طی سال‌های ۱۳۹۳-۱۴۰۲ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد در صورت افزایش تبخیر دریاچه و ادامه‌ی این روند دریاچه به سطح زیست‌بوم شناختی نخواهد رسید. این انحراف از سال ۱۳۹۹ ایجاد می‌شود. همچنین شکل ۶ احتمالات مربوط به تغییرات حجم آب در سال ۱۳۹۹ در این سناریو را به عنوان نمونه نشان می‌دهد. میانگین تابع احتمال حجم آب تقریباً ۹۰۰۰MCM است. از جمله قابلیت‌های مدل، توانایی در روزآمدسازی احتمالات بعد از انجام مشاهده در هر متغیر است. در همین راستا در صورت مشاهده‌ی انحراف در هر یک از سال‌ها می‌توان سیاست‌هایی را برای احیای دریاچه ایجاد کرد. با اعمال سیاست‌هایی از جمله لایروبی دریاچه و برداشت نمک (این سیاست با نمک مرغوب دریاچه خود یک سیاست درآمدزا خواهد بود) می‌توان از میزان شوری آب کاست یا با کاشت و احیای پوشش گیاهی اطراف دریاچه به کاهش تبخیر کمک کرد. همچنین می‌توان از سیاست‌هایی چون بارورسازی ابرها استفاده کرد. حتی در صورت تشدید شرایط خشک‌سالی نیاز به محدودیت بیشتر در بخش کشاورزی خواهد بود؛ زیرا عواقب ناشی از خشک شدن دریاچه بسیار پرخطر و دارای هزینه‌های چندین برابر خواهد بود.



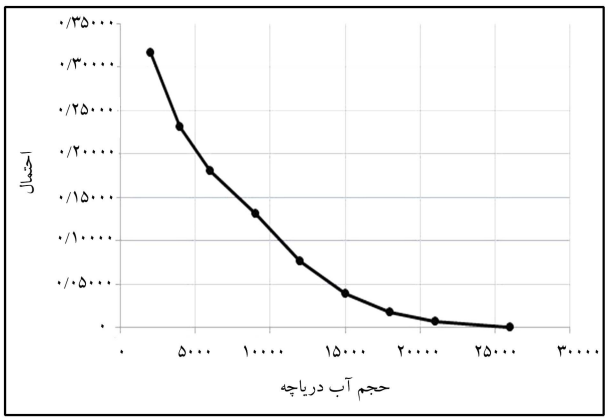
شکل ۷. تغییرات حجم آب بعد از اعمال سناریوی دوم (اول پر آبی بعد خشک‌سالی).



شکل ۹. تغییرات حجم آب بعد از اعمال سناریوی سوم (اول خشک‌سالی بعد آبی).



شکل ۸. گراف احتمالات تغییرات حجم آب در سال ۱۳۹۸ در سناریوی دوم.



شکل ۱۰. گراف احتمالات تغییرات حجم آب در سال ۱۳۹۸ در سناریوی سوم.

سناریوی دوم: دوره‌یی خشک‌سالی بعد از دوره‌یی پربارش

فرض کنید در دهه‌ی آینده در سال‌های اول پرآبی و سال‌های آخر خشک‌سالی اتفاق بیفتد. این سناریو در شبکه به‌این صورت تعریف می‌شود که طی سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۸ (دوره پر بارش) میزان بارندگی و رواناب‌های سطحی افزایش و از طرف دیگر دمای هوا و شوری آب کاهش می‌یابد. سپس در سال‌های ۱۳۹۹-۱۴۰۲ (دوره خشکسالی) بارندگی کاهش و دما و شوری آب افزایش یافته است. پس از اجرای مدل مشخص شد که در صورت ادامه‌ی روند سیاست‌ها تا پایان سال ۱۴۰۲ فقط میزان ۴۰۰MCM از میزان میانگین حجم آب کاهش می‌یابد. شاید تصور شود در راستای کاهش هزینه‌ها با وجود پرآبی طی سال‌های اولیه نیازی به اعمال سیاست‌ها نیست یا اجرایی شدن درصدی از سیاست‌ها کفایت کند؛ اما نتایج مدل با این دیدگاه متفاوت است. در شکل ۷ مشاهده می‌شود با اجرایی شدن این سناریو و ادامه‌ی حفظ روند اعمال سیاست‌ها شرایط احیای دریاچه و رسیدن به سطح زیست‌بوم‌شناختی حفظ خواهد شد، فقط روند احیا سریع‌تر انجام خواهد شد و تا پایان سال ۱۳۹۸ دریاچه احیا می‌شود. پس از آن و با شروع دوره خشک‌سالی با ادامه‌ی روند اعمال سیاست‌های پیشین دریاچه شرایط زیست‌بوم شناختی خود را حفظ خواهد کرد. همچنین شکل ۸ احتمالات مربوط به تغییرات حجم آب در این سناریو را به عنوان نمونه در سال ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. میانگین تابع احتمال حجم آب تقریبا ۱۶۰۰۰MCM است.

سناریوی سوم: دوره‌یی پربارش بعد از دوره‌یی خشک‌سالی

این سناریو به این صورت تعریف می‌شود که طی سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۹ دمای هوا و شوری آب افزایش و میزان بارندگی و رواناب‌های سطحی کاهش می‌یابد. در سال‌های ۱۴۰۰-۱۴۰۲ با افزایش بارندگی میزان دما و شوری آب کاهش پیدا می‌کند. روند تغییرات حجم آب در شکل ۹ نشان می‌دهد که با ادامه‌ی روند اعمال سیاست‌ها روند احیای دریاچه با این سناریو دچار اختلال خواهد شد. در این حالت نیازمند استفاده از سیاست‌های بارورسازی ابرها و کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی خواهیم بود؛ یا شاید لازم باشد کشاورزی برای مدتی به علت احیای دریاچه صورت نگیرد و امرار معاش کشاورزان در این مدت با پرداخت هزینه‌های زندگی تأمین شود. همچنین شکل ۱۰ احتمالات مربوط به تغییرات حجم آب در این سناریو را به عنوان نمونه در سال ۱۳۸۹ نشان می‌دهد. میانگین تابع احتمال حجم آب تقریباً ۴۵۰۰ MCM است.

۸. نتیجه‌گیری

دریاچه‌ی ارومیه یک زیست‌بوم منحصربه‌فرد است که نقش اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مهمی را در منطقه ایفا می‌کند. به دلیل توسعه‌ی نامتوازن و ناپایدار طی سال‌های اخیر تراز آبی این دریاچه به شدت کاهش یافته است. در این مقاله نشان داده شد که چگونه با مدل‌سازی شبکه‌ی بیزی پویا می‌توان عوامل تأثیرگذار بر حجم آب دریاچه‌ی ارومیه و در نتیجه پایداری آن را مدل‌سازی، اندازه‌گیری و پیش‌بینی کرد. پس از تکمیل شبکه ابتدا داده‌های حجم آب به دست آمده توسط مدل با داده‌های موجود مقایسه شد تا از صحت مدل اطمینان حاصل شود.

همان طور که بیان شد پایداری دریاچه به معنای رسیدن دریاچه به سطح زیست‌بوم شناختی است. در این پژوهش به منظور بهبود شرایط دریاچه و رسیدن به پایداری سیاست‌هایی از جمله انتقال آب و کاهش مصرف آب بخش کشاورزی در برنامه‌یی ۱۰ ساله در مدل اعمال شد. نتایج شبیه‌سازی مدل ارائه شده به‌روشنی تأثیر سیاست‌های اعمالی بر حجم آب دریاچه را نشان داد که در پی آن حجم آب دریاچه به ۱۶۰۰۰MCM (سطح زیست‌بوم شناختی) رسید. همچنین نتایج این مدل در قالب تجزیه و تحلیل سناریوها برای کمک کردن و جهت دادن به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و همچنین بررسی اثرات تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

از مزایای این روش امکان ترکیب انواع مختلف داده‌ها، ارائه‌ی عدم قطعیت و توانایی در روزآمدسازی مدل در صورت ارائه‌ی دانش و اطلاعات جدید است. در شبکه‌ی بیزی بیشتر از داده‌های گسسته برای مدل‌سازی استفاده می‌شود؛ اما در این پژوهش با ترکیبی از داده‌های پیوسته و گسسته به مدل‌سازی مسئله پرداخته شد.

از دیدگاه کاربردی مدل ارائه شده ضمن مشخص کردن چگونگی روند احیا، امکان پیش‌بینی و تجزیه‌وتحلیل بهتری را در اختیار مدیران قرار می‌دهد. علاوه بر قابلیت‌های پیش‌بینی که از طریق تحلیل سناریوهای مختلف صورت گرفت، پویایی مدل اجازه می‌دهد که در طول دوره‌ی طولانی احیای دریاچه از طریق پایش شرایط و تغییرات مشاهده شده (اقلیمی و فعالیت‌های انسانی) وضعیت پایداری آبی را روزآمد کرد و در صورت ضرورت به اصلاح و بازنگری در اقدامات اجرایی برای حفظ دریاچه پرداخت.

مدل ارائه شده در این مقاله مدل اولیه‌یی است که قابلیت توسعه دارد. البته باید در نظر داشت که در نظرگرفتن جزئیات بیشتر در مدل نیازمند دسترسی به اطلاعات بیشتر و شناسایی روابط بین عوامل مختلف دارد که در بسیاری موارد ناشناخته‌اند. اعتبارسنجی کمّی چنین مدل‌هایی از دیگر محدودیت‌های آنهاست.[۱۱] اولاً در مدل‌هایی که به پیش‌بینی رفتار سیستم‌های پیچیده در آینده می‌پردازند و اطلاعات و مشاهدات زیادی از نحوه‌ی تعامل عوامل وجود ندارد، اطمینان از اعتبار نتایج کمّی مدل مشکل و گاهی غیرممکن است. در چنین مواردی از سایر روش‌های اعتبارسنجی مثل ارزیابی توسط خبره، مقایسه با مطالعات گذشته، استفاده از اطلاعات مقایسه‌یی و تحلیل سناریو استفاده می‌شود.

محورهای متعددی برای تحقیقات آتی قابل پیشنهاد است که برخی از مهم‌ترین آن‌ها به شرح زیر است:

- توسعه‌ی جزئیات مدل - با افزودن متغیرهای دیگر می‌توان به افزایش دقت مدل و امکان در نظرگرفتن عوامل جزئی‌تر و بیشتر در مسئله پرداخت.
- توسعه‌ی ساختار مدل - با در نظرگرفتن عواقب ناشی از ناپایداری دریاچه شامل عواقب اقتصادی، اجتماعی و انسانی و همچنین بررسی اقدامات و روش‌های ممکن برای مقابله با آنها.
- در نظرگرفتن عامل هزینه - با هدف انجام تحلیل‌های هزینه منفعت و مقایسه بین تصمیمات و راهکارهای مختلف می‌توان هزینه‌های مشهود و نامشهود مربوط به عوامل تأثیرگذار و همچنین تصمیمات و اقدامات اصلاحی را به چارچوب مدل اضافه کرد.

پانوشت‌ها

1. uncertainty
2. baysian network
3. murray–darling Basin
4. sensitivity analysis
5. dynamic bayesian network
6. balance water
7. artificial neural network
8. adaptive neuro-fuzzy inference
9. sustainability
10. resilience
11. threshold
12. directed acyclic graph
13. prior probability
14. conditional probability
15. www.agenarisk.com
16. Urmia lake basin
17. conditional probability table
18. validation
19. coefficient of determination
20. root mean square error
21. million cubic meters
22. detection
23. “what if” analysis
24. euidence

منابع (References)

1. Varis, O. “Bayesian decision analysis for environmental and resource management”, *Environmental Modelling and Software*, **12**, pp. 177-185 (1997).
2. Varis, O., Kettunen, J. and Sirviö. “Bayesian influence diagram approach to complex environmental management including observational design”, *Occupational Statistics and Data Analysis*, **9**, pp. 77-91 (1990).
3. Haas, T. C. “A bayesian belief network advisory system for aspen regeneration”, *Forest Science*, **2**, pp. 627-654 (1991).
4. Barton, D., Kuikka, S., Varis, O. and et al. “ Bayesian networks in environmental and resource management”, *Integrated Environmental Assessment and Management*, **3**, pp. 418-429 (2012).

5. Landuyt, D., Broekx, S., D'hondt, R. and et al."A review of bayesian belief networks in ecosystem service modeling", *Environmental Modelling & Software*, **46**, pp. 1-11 (2013).
6. Lanini, S. "Water managment impact assessment using a baysian network model", *7th International Conference on Hydroinformatics HIC, Nice*, FRANCE (2006).
7. Keshtkar, A. R., Salajeghehb, A., Sadoddinc, A. and et al. "Application of bayesian networks for sustainability assessment in catchment modeling and management (case study: the hablehrood river catchment)", *Ecological Modelling*, **8**, pp. 48-54 (2013).
8. Frank, S., Pollino, C. and Dol, P. "Using bayesian networks to link environmental flows to ecosystem services in the murray-darling basin, australia", *7th International Congress on Environmental Modeling and Software, San Diego, USA*, (2014).
9. Mohajerani, H., Kholghi, M., Mosaedi, A. and et al. "Quantitative management of groundwater using bayesian decision network", *Journal of Water and Soil*, **26**(6), pp. 1522-1534 (2013).
10. Musango, J. K. and Peter, C. "A bayesian approach towards facilitating climate change adaptation research on the south african agricultural sector", *Research In Agricultural And Applied Economics*, **46**, pp. 245-259 (2007).
11. Sperotto, A., Molina, J., Torresan, S. and et al. "Reviewing bayesian networks potentials for climate change impacts assessment and management: a multi-risk perspective", *Journal of Environmental Management*, **202**, pp. 320-331 (2017).
12. Talebizadeh, M. and Moridnejad, A. "Uncertainty analysis for the forecast of lake level fluctuations using ensembles of ANN and ANFIS models", *Expert Systems with Applications*, **38**, pp. 4126-4135 (2011).
13. Hassanzadeh, E., Zarghami, M. and Hassanzadeh, Y. "Determining the main factors in declining the urmia lake level by using system dynamics modeling", *Water Resources Management*, **26**, pp. 129-145 (2011).
14. Abha, L. S. and Khundrakpam, M. "Dying wetlands: a threat to livelihoods of loktak lake dwellers", *Journal of Physical Sciences*, **2**, pp. 107-116 (2012).
15. Goodland, R. "The concept of environmental sustainability", *Annual Review of Ecological Systems*, **26**, pp. 1-24 (1995).
16. Holling, C. S. "Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems", *Ecosystems*, **4**, pp. 390-405 (2001).
17. Janssen, M. A., Anderies, J. M. and Walker, B. H. "Robust strategies for managing rangelands with multiple stable attractors", *Environmental Economics and Management*, **47**, pp. 140-162 (2004).
18. Ludwig, D., Walker, B.H. and Holling, C.S. "Models and metaphors of sustainability, stability, and resilience", In Gunderson, L.H. and Pritchard, L. Eds., Resilience and the Behavior of Large-Scale Systems. pp. 21-48 Washington, DC: Island Press (2002).
19. Gunderson, L. "Managing surprising ecosystems in southern florida", *Ecological Economics*, **37**, pp. 371-378 (2001).
20. Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J. M. and et al. "From metaphor to measurement: resilience of what to what?", *Ecosystems*, **4**, 765-781 (2001).
21. Singh, A. L. and Moirangleima, K. "Dying wetlands: a threat to livelihoods of loktak lake dwellers", *Greener Journal of Physical Sciences*, **2** (4), pp. 107-116 (2012).
22. Pu, Z., Wang, H., Bian, H. and et al. "Sustainable lake basin water resource governance in china: the case of tai lake", *Sustainability*, **7**, pp. 16422-16434 (2015).
23. Sidle, R. C., Benson, W. H., Carriger, J. F. and et al. "Broader perspective on ecosystem sustainability: consequences for decision making", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**(23), pp. 9201-9208 (2013).
24. Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A. and et al. "Catastrophic shifts in ecosystems", *Nature*, **413**(6856), pp. 591-596 (2001).
25. Lotfi, A., *The Wetland Book, Lake Uromiyeh*, pp 1-15, Springer Netherlands (2017).
26. Pearl, J. "Distributed revision of composite beliefs", *Artificial Intelligence*, **33**, pp. 173- 215 (1987).
27. Pearl, J. "Evidential reasoning using stochastic simulation of causal models", *Artificial Intelligence*, **32**, pp. 245-257 (1987).
28. Dean, T. and Kanazawa K. "A model for reasoning about persistence and causation", *Computer Intelligence*, **5**, pp. 142-50 (1988).